



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

(11) BR 112014014565-2 B1



(22) Data do Depósito: 13/12/2012

(45) Data de Concessão: 28/06/2022

(54) Título: SISTEMA DE DETECÇÃO ACÚSTICA DE FIBRA ÓPTICA DISTRIBUÍDA

(51) Int.Cl.: G01S 3/80.

(30) Prioridade Unionista: 15/12/2011 US 61/576192.

(73) Titular(es): SHELL INTERNATIONALE RESEARCH MAATSCHAPPIJ B.V..

(72) Inventor(es): JOHANNIS JOSEPHUS DEN BOER; ALBENA ALEXANDROVA MATEEVA; JEREMIAH GLEN DRIVE; JEFFREY JOSEPH MESTAYER; WILLIAM BIRCH; JORGE LOUIS LOPEZ; KEEPS HORNMAN; BORIS NIKOLAEVICH KUVSHINOV.

(86) Pedido PCT: PCT US2012069464 de 13/12/2012

(87) Publicação PCT: WO 2013/090544 de 20/06/2013

(85) Data do Início da Fase Nacional: 13/06/2014

(57) Resumo: SISTEMA DE DETECÇÃO ACÚSTICA DE FIBRA ÓPTICA DISTRIBUÍDA. É descrito um sistema de detecção acústica de fibra óptica distribuída que compreende um corpo alongado com uma superfície externa, uma fibra óptica disposta na superfície externa em um primeiro ângulo de enrolamento predeterminado, e dispositivo transmissor e receptor de luz oticamente conectado na fibra. O corpo alongado pode incluir pelo menos uma face substancialmente plana, e/ou uma camada de elastômero intumescível envolvendo o corpo, e/ou um tubo elastomérico externo envolvendo a camada de elastômero. Pode haver pelo menos uma almofada de sensor disposta na camada externa, a almofada de sensor compreendendo uma elemento de enrijecimento e pelo menos uma fibra longitudinal afixada nela ou embutida nela. Pode haver um corpo de material protetor envolvendo o tubo, que pode ter uma superfície externa que inclui pelo menos uma face substancialmente plana e pelo menos uma almofada de sensor disposta no corpo.

“SISTEMA DE DETECÇÃO ACÚSTICA DE FIBRA ÓPTICA DISTRIBUÍDA”

CASOS RELACIONADOS

[0001] Este pedido reivindica prioridade do pedido U.S. número de série 61/576.192, depositado em 15 de dezembro de 2011 e incorporado aqui pela referência.

CAMPO DA INVENÇÃO

[0002] A invenção diz respeito a dispositivos de fibra óptica e, em particular, a um conjunto de Detecção Acústica Distribuída (DAS) de fibra óptica que é adaptado para detectar a magnitude e direção de sinais acústicos, e particularmente aqueles sinais que estão deslocando EM um ângulo ou substancialmente perpendiculares ao dispositivo.

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

[0003] Várias tentativas têm sido feitas para prover capacidades de detecção no contexto de exploração, produção e monitoramento de petróleo, com variados graus de sucesso. Recentemente, essas tentativas incluíram o uso de cabos de fibra óptica para detectar energia acústica. Em virtude de os cabos tipicamente compreenderem fibra ópticamente condutora contendo uma pluralidade de heterogeneidades retrodispersivas ao longo do comprimento da fibra, tais sistemas permitem a medição distribuída de mudanças no comprimento do caminho óptico ao longo de uma fibra óptica pela medição da luz retrodispersa de uma entrada de pulso na fibra. Em virtude de eles permitirem detecção distribuída, tais sistemas podem ser referidos como si.s "detecção acústica distribuída" ou "DAS". Um uso de sistemas DAS é em aplicações sísmicas, nas quais fontes sísmicas em locais conhecidos transmitem sinais acústicos na formação, e/ou fontes sísmicas passivas emitem energia acústica. Os sinais são recebidos em sensores sísmicos depois de atravessar e/ou refletir na formação. Os sinais recebidos podem ser processados para dar informação a respeito da formação através da qual eles

passaram. Esta tecnologia pode ser usada para registrar uma variedade de informação sísmica. Uma outra aplicação é no campo de aplicação em poço e monitoramento de fluido acústico.

[0004] Sistemas DAS tipicamente detectam retrodispersão de laser de pulso curto (1 - 10 metros) de impurezas ou heterogeneidades na fibra óptica. Se a fibra for deformada por uma onda sísmica incidente, então: 1) a distância entre impurezas muda e 2) a velocidade dos pulsos laser muda. Ambos esses efeitos influenciam o processo de retrodispersão. Observando-se mudanças no sinal retrodisperso é possível reconstruir a amplitude da onda sísmica. O primeiro dos efeitos referidos aparece somente se a fibra for estirada ou comprimida axialmente. O segundo efeito está presente no caso de deformações da fibra axiais bem como radiais. O segundo efeito, entretanto, é diversas vezes mais fraco do que o primeiro. Além disso, deformações radiais da fibra são significativamente amortecidas por materiais envolvendo a fibra. Em decorrência disto, um sistema DA convencional com uma fibra reta é principalmente sensível a ondas sísmicas polarizadas ao longo do eixo do cabo, tais como ondas de compressão (P) propagando ao longo do cabo ou ondas de cisalhamento (S) propagando perpendicularmente ao cabo. A intensidade do sinal varia aproximadamente como $\cos 2\theta$, onde θ é o ângulo entre o eixo da fibra e a direção de propagação da onda (para ondas P). Assim, embora exista uma variedade de sistemas DAS comercialmente disponíveis que têm sensitividade variável, alcance dinâmico, resolução espacial, linearidade, etc., todos esses sistemas são basicamente sensíveis a deformação axial. Sinais acústicos que deslocam normais ao eixo da fibra podem algumas vezes ser referidos como sinais "transversais" e, para ondas P, resultam em deformação radial na fibra. Assim, à medida que o ângulo entre a direção de deslocamento do sinal acústico e o eixo da fibra aproxima-se de 90°, cabos DAS ficam muito menos sensíveis ao sinal e podem até mesmo não conseguir detectá-lo.

[0005] Consequentemente, é desejável prover um cabo melhorado que é mais sensível a sinais que deslocam normais ao seu eixo e que permite distinguir deformação radial da deformação axial. Sensitividade a ondas transversais é particularmente importante para aplicações sísmicas ou microssísmicas, com cabos na superfície ou na subsuperfície. Além da sensitividade transversal, é também desejável prover detecção de três componentes (3C), a partir dos quais a direção de deslocamento do sinal detectado pode ser determinada.

BREVE SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0006] A presente invenção fornece um sistema de cabo de fibra óptica melhorado para detecção acústica distribuída que é mais sensível a sinais que deslocam normais ao seu eixo e é assim mais capaz de distinguir deformação radial de deformação axial no sistema. Sinais acústicos que deslocam normais ao eixo do cabo podem algumas vezes ser referidos como sinais "transversais" e resultam em deformação radial na fibra. A presente invenção também fornece detecção de três componentes (3C), a partir dos quais a direção de deslocamento do sinal detectado pode ser determinada.

[0007] De acordo com algumas modalidades, um sistema de detecção acústica de fibra óptica distribuída compreende um corpo alongado com uma superfície externa, uma fibra óptica disposta na superfície externa em um primeiro ângulo de enrolamento predeterminado, e dispositivos de transmissão e recepção de luz oticamente conectados na fibra para, respectivamente, transmitir um sinal óptico na fibra e receber um componente retrodisperso do sinal da fibra. O sistema pode adicionalmente incluir uma segunda fibra óptica disposta na superfície externa em um segundo ângulo e enrolamento predeterminado. Os ângulos de enrolamento podem ser medidos com relação a um plano normal ao eixo do corpo e o primeiro ângulo de enrolamento pode ser 90° e o segundo ângulo de enrolamento pode ser menos que 45° .

[0008] O sistema pode adicionalmente incluir uma terceira fibra

disposta na superfície externa em um ângulo de enrolamento entre 90° e 45°. Pelo menos uma das fibras pode incluir redes de Bragg.

[0009] O corpo pode ter uma seção transversal circular ou uma seção transversal elíptica e pode incluir uma camada de elastômero intumescível envolvendo o corpo.

[00010] Uma haste de detecção pode ser disposta no corpo alongado e pode conter pelo menos uma fibra adicional. A (s) fibra (s) adicional(s) pode(m) ser substancialmente reta(s), helicoidal(s) ou sinuosa(s).

[00011] O sistema pode adicionalmente incluir uma camada de elastômero intumescível entre a haste de detecção e o corpo alongado. Adicionalmente, ou alternativamente, o sistema pode incluir uma primeira camada de bainha no exterior do corpo e cobrindo a fibra. A primeira camada de bainha pode ter uma seção transversal externa oval. O corpo alongado pode ter uma seção transversal não circular com um maior semieixo e a primeira camada de bainha pode ser configurada de forma que seu maior semieixo seja perpendicular ao maior semieixo do corpo alongado.

[00012] O sistema pode incluir uma segunda fibra óptica enrolada no exterior da primeira camada de bainha. A primeira fibra e a segunda fibra podem definir diferentes ângulos de enrolamento. O sistema pode incluir uma segunda camada de bainha no exterior da primeira camada de bainha e cobrindo a segunda fibra. Pelo menos uma das camadas de bainha preferivelmente compreende uma poliamida ou material com uma impedância elástica similar.

[00013] Outras modalidades de um sistema de detecção acústica de fibra óptica distribuída compreendem um corpo alongado com uma superfície externa que inclui pelo menos uma face substancialmente plana, uma primeira fibra óptica alojada no corpo, e dispositivo de transmissão e recepção de luz oticamente conectados na fibra para transmitir um sinal óptico na fibra e receber um componente retrodisperso do sinal da fibra. O corpo pode ter uma

seção transversal poligonal ou triangular. A primeira fibra pode ser sinuosa e o sistema pode incluir uma segunda fibra sinuosa definindo um plano perpendicular ao plano da primeira fibra. O sistema pode incluir uma terceira fibra que pode ser substancialmente reta ou helicoidal, e pode definir um ângulo de enrolamento com relação a um plano normal ao eixo do corpo. O ângulo de enrolamento pode ser menos que 45° ou menos que 30°.

[00014] Em modalidades preferidas, a face substancialmente plana pode ter uma aparência visual que é diferente da aparência do resto da superfície externa.

[00015] Ainda outras modalidades da invenção incluem um sistema de detecção acústica de fibra óptica distribuída compreendendo um tubo interno, uma camada de elastômero intumescível envolvendo o tubo, um tubo de elastômero intumescível envolvendo a camada de elastômero e definindo uma coroa anular com ela, e pelo menos uma almofada ou tira de sensor disposta no tubo de elastômero, cada almofada de sensor compreendendo um elemento de enrijecimento e pelo menos uma fibra longitudinal afixada nele ou embutida nele. O sistema pode incluir pelo menos quatro almofadas de sensor dispostas no tubo de elastômero. Pelo menos uma fibra óptica pode ser alojada no tubo interno.

[00016] O tubo interno pode compreender um tubo de aço, e a camada de elastômero e o tubo de elastômero podem ser configurados de maneira tal que, quando eles intumescerem, a coroa anular desaparece. A camada elastomérica é adicionalmente configurada de maneira tal que, quando ela intumescer sem ser limitada, seu diâmetro excede um valor predeterminado que é selecionado para corresponder ao diâmetro interno de um furo na terra. O tubo de elastômero pode ser adicionalmente configurado de maneira tal que, quando ele intumesce em um furo de sondagem, a(s) almofada(s) de sensor é/são disposta(s) na superfície externa do tubo de elastômero. A fibra longitudinal em cada almofada de sensor pode ser sinuosa, e/ou cada almofada de sensor pode incluir

uma fibra longitudinal sinuosa e uma fibra longitudinal reta. Pelo menos uma das fibras ópticas pode conter redes de Bragg.

[00017] Ainda outras modalidades de um sistema de detecção acústica de fibra óptica distribuída para uso em uma superfície compreendem um tubo interno alojando pelo menos uma fibra óptica, um corpo de material protetor envolvendo o tubo, o corpo tendo uma superfície externa que inclui pelo menos uma face substancialmente plana, e pelo menos uma almofada ou tira de sensor disposta no corpo, a almofada de sensor compreendendo um elemento de enrijecimento e pelo menos uma fibra longitudinal afixada nela ou embutida nela. Pelo menos uma almofada de sensor pode também incluir pelo menos uma fibra sinuosa afixada nela ou embutida nela. O sistema pode incluir pelo menos duas almofadas de sensor que incluem cada qual pelo menos uma fibra sinuosa afixada nela ou embutida nela, e as duas almofadas de sensor podem ser mutuamente perpendiculares. Pelo menos uma almofada de sensor pode ser adjacente à face plana.

[00018] O tubo interno pode também alojar pelo menos uma linha de transmissão elétrica. O sistema pode adicionalmente incluir uma âncora que é configurada para ficar disposta sobre o corpo e inclui pelo menos um braço para ancorar a âncora e o corpo na superfície. O braço pode ser reto ou curvo.

[00019] Na forma aqui usada, as expressões "propagando ao longo da fibra" e "propagando perpendicular à fibra", quando usadas em referência a um sinal acústico, devem ser entendidas referindo-se a ondas P que são polarizadas ao longo de sua direção de propagação.

BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[00020] Para um entendimento mais detalhado da invenção, é feita referência aos desenhos anexos, em que:

[00021] A fig. 1 é uma vista lateral esquemática de um cabo construído de acordo com uma modalidade da invenção;

[00022] A fig. 2 é uma vista de extremidade esquemática da

modalidade da fig. 1;

[00023] A fig. 3 é uma seção transversal esquemática de um cabo construído de acordo com uma outra modalidade da invenção;

[00024] A fig. 4 é uma seção transversal axial esquemática de um sistema de detecção óptica de acordo com a invenção em um furo de sondagem;

[00025] A fig. 5 é uma outra vista do sistema da figura 3 depois do intumescimento de uma camada intumescível;

[00026] A fig. 6 é uma outra vista do sistema da figura 4 mostrando a colocação de uma haste de detecção no sistema;

[00027] A fig. 7 é uma outra vista do sistema da figura 5 depois do intumescimento de uma segunda camada intumescível;

[00028] A fig. 8 é uma ilustração esquemática de um sistema de detecção óptica de acordo com uma outra modalidade;

[00029] A fig. 9 é uma ilustração esquemática de um sistema de detecção óptica de acordo com uma outra modalidade;

[00030] A fig. 10 é uma vista de extremidade esquemática do sistema da figura 9;

[00031] A fig. 11 é uma seção transversal axial de um sistema de detecção óptica de acordo com uma outra modalidade;

[00032] A fig. 12 é uma seção transversal feita ao longo das linhas 12-12 da fig. 11;

[00033] A fig. 13 é uma seção transversal axial esquemática do sistema da figura 11 em um furo de sondagem;

[00034] A fig. 14 mostra o sistema da figura 13 depois do intumescimento de duas camadas intumescíveis;

[00035] A fig. 15 é uma seção transversal axial esquemática de uma modalidade da invenção configurada para uso na superfície da terra; e

[00036] As figs. 16 e 17 são modalidades alternativas de um

dispositivo de suporte para uso com a presente invenção.

DESCRÍÇÃO DETALHADA DE UMA MODALIDADE PREFERIDA

Cabo DAS com fibras enroladas helicoidalmente para melhor sensitividade transversal

[00037] Um aspecto da presente invenção compreende uma fibra DAS helicoidalmente enrolada em um cabo ou mandril com o propósito de prover maior sensitividade transversal. Uma fibra enrolada helicoidalmente sempre incluirá porções da fibra que formam ângulos relativamente pequenos com a onda incidente, independentemente do ângulo de incidência. Considerando que o cabo e fibra são perfeitamente acoplados na formação, pode-se determinar a sensitividade angular da fibra S projetando a deformação da onda ao longo do eixo da fibra. Isto dá:

$$S = \cos^2 \theta \sin^2 \alpha + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \alpha}{2}$$

[00038] onde α é o ângulo de enrolamento, isto é, o ângulo entre a fibra e um plano perpendicular ao eixo do cabo ou mandril, e θ é o ângulo de incidência com relação ao eixo do cabo do mandril.

[00039] As figuras 1 e 2 são vistas lateral e de extremidade esquemáticas, respectivamente, de um sistema de detecção óptica 10 compreendendo uma fibra 11 enrolada helicoidalmente com um ângulo de enrolamento α em torno de um cabo 12 com um eixo 14. Embora não descrito com detalhes aqui, entende-se que os sistemas de detecção óptica revelados a seguir são usados em conjunto com dispositivo transmissor e receptor de luz óptico que são conectados na fibra para transmitir um sinal óptico na fibra e receber um componente retrodisperso do sinal transmitido pela fibra.

[00040] O caso de uma fibra reta corresponde ao ângulo de enrolamento $\alpha = 90^\circ$. Se o ângulo de enrolamento for cerca de $\alpha = 35^\circ$, então a sensitividade da fibra não dependerá do ângulo θ e será igual a $S = 1/3$. Como pode-se ver, uma fibra helicoidalmente enrolada não muda a sensitividade

geral do sistema, mas redistribui-a em três direções espaciais.

[00041] A sensitividade S citada refere-se ao comprimento de fibra unitário. O comprimento da fibra L_f é igual a $L_f = L_c / \operatorname{sen} a$, onde L_c é o comprimento do cabo ao longo do qual a fibra é enrolada. A sensitividade de uma fibra helicoidalmente enrolada por comprimento de cabo unitário é assim $(1/\operatorname{sen} a)$ vezes maior que o valor de S referido. Consequentemente, usando uma fibra helicoidalmente enrolada, é possível não somente aumentar a sensitividade transversal do sistema, mas também sua sensitividade geral pelo empacotamento de mais comprimento de fibra no mesmo comprimento de cabo, comparado com uma fibra reta. Alternativamente, usando uma fibra enrolada e diminuindo o comprimento de cabo dos canais de detecção, a resolução espacial pode ser aumentada, mantendo ainda a mesma sensitividade de uma fibra reta.

[00042] Os conceitos aqui descritos podem ser implementados usando uma, duas ou três fibras com diferentes ângulos de enrolamento. Modalidades preferidas do sistema de detecção incluem pelo menos uma fibra com um ângulo de enrolamento de 90° , isto é, paralela ao eixo do cabo, e uma fibra com um ângulo de enrolamento menor que 45° . Modalidades ainda mais preferidas incluem uma terceira fibra com um ângulo de enrolamento entre 45° e 90° . Fibras com diferentes ângulos de enrolamento têm diferentes sensitividades direcionais e, comparando suas respostas, pode-se determinar a direção de propagação da onda com relação ao eixo da fibra.

[00043] Além do mais, múltiplas fibras podem ser enroladas dentro de um único cabo em diferentes raios. Alternativamente, múltiplos cabos, cada qual com uma única fibra helicoidalmente enrolada, podem ser usados. Ainda adicionalmente, embora certas modalidades estejam reveladas em termos de uma fibra que é enrolada em um corpo cilíndrico, entende-se que a fibra não precisa realmente circundar o corpo, mas pode, em vez disso, mudar ou inverter a direção de maneira a definir segmentos de fibra com um ângulo de

enrolamento predeterminado alternando com curvas ou segmentos inversos.

[00044] Assim, como mostrado na figura 3, uma modalidade preferida particular compreende um revestimento interno 15, uma primeira camada de bainha 16, e uma segunda camada de bainha 17. Enrolada no revestimento 15 e coberta pela camada de bainha 16 fica uma pluralidade (três, como ilustrado) de fibras ópticas 18. Fibras 18 são preferivelmente enroladas em um primeiro ângulo de enrolamento com relação ao plano normal ao eixo do cabo. Similarmente, uma pluralidade (três, novamente, como ilustrado) de fibras ópticas 19 é preferivelmente enrolada no revestimento 16 e coberta pela camada de bainha 17. As fibras 19 são preferivelmente enroladas em um segundo ângulo de enrolamento que é diferente do primeiro ângulo de enrolamento de fibras 18. Em uma modalidade preferida, uma das fibras 18 ou 19 é reta, isto é, com um ângulo de enrolamento de 90° , e a outra é enrolada com um pequeno ângulo de enrolamento, isto é, um ângulo de enrolamento menor que 45° com relação ao plano normal ao eixo do cabo. O uso de diferentes ângulos de enrolamento fornece diferentes sensibilidades direcionais das quais, comparando suas respostas, é possível determinar a direção de propagação da onda com relação ao eixo da fibra. Entende-se que fibras adicionais com ângulos de enrolamento adicionais podem também ser incluídas.

[00045] Apenas a título de exemplo, um sistema de detecção óptica pode incluir uma primeira, fibra reta, uma segunda fibra com um ângulo de enrolamento de 30° com relação ao plano normal ao eixo do cabo, e uma terceira fibra com um ângulo de enrolamento entre 30° e 90° . A fibra enrolada a 30° dá exatamente 2 m de fibra por 1 m de axial comprimento e a terceira fibra permite verificação de dados das outras duas fibras.

[00046] Em modalidades tal como a da figura 3, as camadas de bainhas podem ser construídas de polímeros de poliamida, por exemplo, Náilon 12, ou outros materiais adequados cujas impedâncias elásticas não diferem significativamente da impedância da formação. As fibras 18 e 19 podem ser

qualquer fibra óptica firmemente amortecida adequada tal como é conhecido na técnica. O interior do revestimento 15 pode ser vazio ou cheio com fluidos, tais como água subterrânea, água da formação, gel, ou outros fluidos adequados.

[00047] No caso de um acoplamento não perfeito entre o cabo e a formação, a sensitividade da fibra tem a forma

$$S = \cos^2 \theta \sin^2 \alpha + (A + B \sin^2 \theta) \cos^2 \alpha$$

onde A e B são constantes cujos valores dependem das propriedades do material do cabo e formação.

[00048] A escolha do material do cabo depende do propósito concreto do sistema DAS. Por exemplo, um cabo relativamente rígido com um módulo de Young de diversos GPa fornece um baixo contraste de material com a formação, que corresponde a $A = 0$ e $B = 0,5$ na equação anterior. Um cabo como este tem melhor sensitividade direcional do que um cabo mais flexível. O uso de tais cabos pode ser preferível em um ambiente de furo de sondagem ou se o cabo for enterrado profundamente na subsuperfície. No caso de cabos macios, o valor de A pode ser muito maior que 1. O sinal de tais cabos terá pouca dependência da propagação do ângulo da onda, mas tais cabos terão uma maior sensitividade geral. Isto é importante para cabos enterrados que ficam próximos da superfície, onde a pressão da onda incidente é muito baixa.

[00049] Os valores A e B dependem da construção do cabo e das propriedades acústicas do meio em volta (V_p , V_s , densidade). Na superfície próxima, essas propriedades do meio variam com o tempo por causa de mudanças sazonais, chuva, etc. Essas variações produzem levando erroneamente a efeitos de lapso de tempo que tendem mascarar os verdadeiros sinais de lapso de tempo provenientes de processos do reservatório. Uma maneira de superar este problema é medir os sinais sísmicos ao longo do cabo em função do ângulo de incidência e determinar os valores A e B *ab initio*. Uma abordagem como esta pode não ser prática em geral, mas pode ser viável em aplicações de lapso de tempo, isto é, determinando somente mudanças em

A e B, informação que seria usada para aumentar a fidelidade do processamento de lapso de tempo.

[00050] Uma fibra enrolada em um cilindro circular, entretanto, não discrimina ondas propagando normalmente ao eixo do cabo de diferentes direções azimutais. Sensitividade azimutal pode ser adicionada usando formas de enrolamento de hélices, por exemplo, elíptica, que permitem detecção de todos três componentes das ondas incidentes.

Cabo DAS com capacidade de visualização de trajetória do cabo embutida (RTCM)

[00051] Em algumas modalidades, o cabo poderia incluir uma fibra de detecção de deformação distribuída (DSS) similar àquela usada em sistemas de monitoramento de compactação em tempo real (RTCM). Em sistemas RTCM, é usada uma fibra óptica que contém centenas de redes de Bragg em fibra óptica (FBGs) enroladas em um tubular. Em virtude de a fibra ser helicoidalmente enrolada, a resposta da deformação pode ser decomposta em diferentes modos de deformação (dobramento, ovalização, deformação axial) e as saídas da decomposição podem ser usadas para produzir uma imagem tridimensional da forma do tubular.

[00052] O mesmo princípio pode ser aplicado no cabo revelado nesta presente invenção de maneira a medir a trajetória do furo a partir da deformação no cabo, que é importante saber em algumas aplicações sísmicas. Nesta modalidade, uma fibra adicional contendo FBGs pode ser embutida no abo ou uma das fibras usadas para DAS pode conter FBGs com comprimentos de rede de onda que são suficientemente diferentes do comprimento de onda de interrogação do sistema DAS. A unidade de interrogação RTCM registraria a deformação no cabo depois/durante instalação para medir a forma do cabo e inferir a trajetória (azimute, profundidade, etc.) do furo. A partir da trajetória do furo, a localização dos canais DAS pode ser derivada no espaço em relação à(s) fonte(s) sísmica(s) na superfície e até a formação.

[00053] Além do mais, este cabo pode ser usado como um monitor permanente da geomecânica do campo. Pelo monitoramento da mudança na forma do cabo com o tempo, é possível medir a quantidade de subsidência da superfície causada pela produção de óleo e gás. Esta informação, quando combinada com os dados sísmicos do DAS, pode melhorar o entendimento da dinâmica do reservatório e a geomecânica de um campo produtor.xxx

Metodologia de desdobramento para permitir registro de baixo ruído e fonte sísmica virtual

[00054] Para aplicações sísmicas de superfície, o cabo de detecção óptica incorporando os presentes conceitos pode ser desdobrado em um ou mais trechos na superfície da terra ou no leito oceânico, ou dentro de um furo de pequeno diâmetro, ou "furo de dados," em formações consolidadas na subsuperfície ou leito oceânico. Este modo de desdobramento tende fornecer dados de melhor qualidade com conteúdo de maior frequência e permite monitoramento sísmico de fonte virtual. Ele também reduz a pegada ambiental do sistema de detecção.

[00055] Furos de pequeno diâmetro adequados podem ser feitos usando técnicas de perfuração de baixo custo, tais como perfuração direcional horizontal (HDD) ou com jateamento de água. Perfurações HDD e com jato de água são frequentemente usadas para instalar infraestrutura tais como cabos de telecomunicações, energia, tubulações de gás etc. O furo horizontal ou desviado pode correr diversas dezenas ou centenas de metros abaixo na superfície e pode ter centenas ou mesmo milhares de metros de comprimento.

[00056] Uma vez que um furo de dados tenha sido feito, existem várias maneiras de instalar o sistema de detecção óptica. Uma maneira é empurrar um tubo contendo o sistema de detecção óptica adentro no furo, por meio disto usando a mangueira ou tubo de perfuração, se estiver ainda no furo, como uma guia para posicionar o tubo de detecção dentro do furo. Depois que o tubo de detecção estiver no lugar, a mangueira ou tubo de perfuração pode ser removida do furo.

[00057] Em ainda outras modalidades (não mostradas), a(s) fibra(s) óptica(s) é(são) integradas na parede da mangueira e tubo de alta pressão usada pelo sistema de perfuração. Nessas modalidades, uma vez que o furo de dados tenha sido feito, a mangueira/tubos de pressão incorporando o sistema de detecção são deixados para trás no furo.

[00058] Em outras modalidades, o furo de dados pode incluir uma saída da superfície. Neste caso, o sistema de detecção pode ser puxado para dentro do furo via a saída da superfície quando a coluna de perfuração estiver sendo recuperada do furo.

[00059] Em algumas modalidades, o tubular contendo o sistema de detecção óptica 10 pode ter um revestimento externo compreendendo um elastômero intumescível 20, mostrado na figura 4. Como ilustrado na figura 5, o elastômero intumesce quando em contato com água da formação ou outro líquido pré-selecionado, por meio disto fixando o tubo de detecção na parede interna 22 do furo de sondagem e garantindo bom acoplamento mecânico e acústico com a formação. Elastômeros intumescíveis são conhecidos na técnica. Alternativamente, a coroa anular entre o tubo de detecção e a formação pode ser cheio com fluido, um gel ou cimento.

[00060] Referindo-se agora à figura 6, depois que o tubo de detecção tiver sido posto no lugar, uma haste de detecção separada 30 pode ser instalada dentro do tubo de detecção 10. A haste de detecção 30 pode conter uma pluralidade de fibras retas, sinuosas e/ou enroladas 32. Se enrolada (não mostrada), as fibras 32 preferivelmente têm um grande passo, isto é, um pequeno ângulo de enrolamento, por exemplo, menos que 45° e mais preferivelmente menos que 30°. Se desejado, a haste 30 pode ser centralizada e fixa dentro do tubo de detecção por meio de uma camada de borracha intumescível, fluido, gel, cimento, etc., como mostrado em 34 na figura 7.

[00061] Uma vez que um cabo reto é sensível somente em uma direção (ao longo do cabo), ele permite um particionamento simples do sinal

registrado em uma fibra enrolada em componentes ao longo do cabo e através do cabo, considerando que ambas as fibras (enroladas e retas) são feitas do mesmo material e embutidas no mesmo meio. Se elas forem de materiais diferentes ou em partes diferentes do cabo (centro vs. periferia), suas sensibilidades gerais para a deformação da formaçāo externa podem ser diferentes, isto é, elas podem ter coeficientes A e B diferentes na equaçāo anterior. Nesse caso, um cabo reto pode ainda ajudar calibrar ou limitar o particionamento do sinal da fibra enrolada, mas a calibraçāo não seria através da subtraçāo direta do componente ao longo do cabo.

Configuração do Cabo

[00062] A fim de permitir uma decomposição de um sinal em três componentes ortogonais, é necessário usar pelo menos três fibras que, em combinação, fornecem sensitividade em todas três direções. Referindo-se agora à figura 8, uma construção alternativa para um sistema de detecção óptica com 3 fibras compreende um cabo 40 com uma seção transversal triangular e pelo menos duas fibras ópticas sinuosas ortogonais 42, 44 e uma fibra 41 nela.

[00063] Uma vantagem da seção transversal triangular é que o cabo tem uma superfície inferior plana 43, que pode ser orientada fixamente com relação, por exemplo, à parede interna ou externa de um tubular, que, por sua vez, facilita a detecção azimutal. Entende-se que, embora o cabo 40 esteja mostrado com uma seção transversal triangular, qualquer polígono poderia ser adequado. Adicionalmente, caso não seja desejada uma superfície inferior plana, a seção transversal do cabo pode ser redonda, elíptica, oval, ou de qualquer outra forma. A fim de facilitar a instalação do cabo com uma orientação conhecida, a superfície inferior 43, ou toda ou uma porção de uma das outras superfícies pode ser codificada em cores ou de outra maneira marcada visualmente. Na ausência de tal indicador externo, a determinação da orientação azimutal do cabo tem que ser feita por meio de análise da primeira chegada.

[00064] Ainda referindo-se à figura 8, a fibra 42 será sensível a sinais com componentes nas direções na linha (x) e vertical (z). Similarmente, a fibra 44 será sensível nas direções na linha (x) e transversal à linha (y). A fibra 41 tem sensitividade na direção na linha (x). Considera-se que as três fibras são identicamente acopladas na formação. Dessa maneira, uma combinação das respostas das fibras 41, 42 e 44 permite uma decomposição do sinal nas direções x, y e z. Em outras modalidades (não mostradas), uma fibra sinuosa pode ser disposta ao longo de uma, duas, três, ou mais superfícies de um corpo com uma seção transversal poligonal. Assim, por exemplo, três fibras sinuosas podem ser dispostas, cada qual em um lado de um corpo com uma seção transversal triangular. Sinais dessas três fibras poderiam também ser decompostos em três conjuntos ortogonais. Tal cabo pode ser mais fácil de fabricar.

[00065] Em uma outra variação, a modalidade mostrada nas figuras 9 e 10 comprehende um cabo 46 com uma seção transversal semicircular e uma superfície inferior plana 47. No cabo 46, uma fibra 48 é helicoidalmente enrolada com um pequeno ângulo de enrolamento e uma segunda fibra 49 é sinuosa. A fibra 48 será sensível nas direções na linha (x), transversal à linha (y), e vertical (z).

[00066] Em qualquer caso, fibras retas adicionais 41 (mostradas em linha tracejada nas figuras 8 e 9) podem ser incluídas no cabo, como anteriormente discutido. A fibra reta 41 será sensível à direção na linha (x). Usando uma combinação de fibras horizontal, vertical e reta, preferivelmente registrando as mesmas condições, é possível gerar dados 3C.

Desdobramento de cabo componentes

[00067] Referindo-se agora às figuras 11 e 12, um cabo multicomponentes 50 de acordo com uma modalidade preferida comprehende um tubo interno 51, uma camada expansível 52 envolvendo o tubo 51, e um tubo expansível 60 envolvendo a camada 52. O tubo interno 51 é de

preferência substancialmente rígido e pode compreender aço, poliamida, ou similares. O tubo interno 51 pode ser cheio com um gel tal como é conhecido na técnica, ou pode ser feito sólido usando poliamida ou similares. A camada 52 é preferivelmente feita de elastômeros intumescíveis com água ou óleo, tal como conhecido na técnica. O tubo 60 é preferivelmente construído de um material deformável tal como um elastômero.

[00068] Almofadas ou tiras de sensor alongadas 62 preferivelmente estendem-se por todo o comprimento do cabo. O material do qual o tubo 60 é feito é preferivelmente flexível e elástico de maneira a permitir que ele responda à expansão da camada intumescível subjacente 52. Em modalidades preferidas, as almofadas são feitas de Náilon 11, que é preferivelmente também usado para encapsular a fibra óptica e linhas de controle hidráulicas. Náilon 11 tem uma resistência ao esmagamento acima de 100 toneladas por polegada quadrada e excelente resistência a abrasão. Em algumas modalidades, almofadas de sensor 62 definem toda ou a maior parte da superfície externa do cabo multicomponentes 50, de forma que o tubo 60 não fica exposto ou substancialmente exposto à parede do furo de sondagem. Nessas modalidades, o cabo multicomponentes 50 pode ter uma seção transversal mais ou menos quadrada. Entende-se que existe uma variedade de configurações nas quais almofadas de sensor e/ou camadas protetoras adicionais podem ser aplicadas na superfície externa do tubo 60, ou próximas a esta.

[00069] O propósito do tubo 60 é proteger e manter as fibras de detecção desejadas (descrito a seguir) em posição enquanto correm no furo. O material preferivelmente dá suporte mecânico, mas é flexível o bastante para ser empurrado como um balão contra a parede do furo durante instalação (descrito a seguir).

[00070] Durante instalação do cabo, a coroa anular entre 52 e 60 fica preferivelmente vazia e selada, ou cheia com um fluido que não ativará os componentes expansíveis.

[00071] Uma ou mais fibras ópticas retas ou substancialmente retas 54 são alojadas no tubo 51 e uma ou mais fibras sinuosas 64 são providas dentro do tubo expansível 60. Em modalidades preferidas, cada fibra sinuosa 64 é embutida ou montada em uma almofada ou tira de sensor alongada 62 com um módulo de Young relativamente alto, por exemplo, 500 a 5.000 MPa. Em algumas modalidades, uma fibra reta opcional 57 (mostrada na figura 11 somente) é incluída com cada fibra sinuosa 64 em uma ou mais das almofadas de sensor 62.

[00072] Em algumas modalidades preferidas, como ilustrado, existem quatro almofadas de sensor 62 uniformemente espaçadas azimuthalmente em torno do tubo 60. Esta modalidade fornece dois conjuntos de fibras que são sensíveis em dois planos perpendiculares. Dispor dois conjuntos de fibras para cada orientação fornece uma redundância adequada, por exemplo, em caso de as almofadas de sensor 62 torcerem quando pressionadas contra a parede irregular de um furo de sondagem imperfeitamente modelado. Opcionalmente, a fibra sinuosa 64 em uma almofada pode ter um período diferente, similar a um "ângulo de enrolamento" diferente daquele na almofada oposta. Assim, os conceitos de multiângulos de enrolamento anteriormente discutidos poderiam ser usados em conjunto com este desenho de cabo.

[00073] Fibras sinuosas 64 e fibra retas opcionais 57 podem ser embutidas em almofadas de sensor 62 em um processo de extrusão. Almofadas de sensor 62 podem compreender qualquer material de extrusão adequado tais como os conhecidos na técnica, incluindo polímeros de poliamida, metal, ou cerâmica.

[00074] De volta agora às figuras 13 e 14, o cabo multicomponentes 50 está mostrado em um furo de sondagem ou furo de dados 72 que foi perfurado ou de outra maneira provido na subsuperfície 70. O cabo multicomponentes 50 pode ser empurrado ou puxado para dentro do furo de dados por qualquer meio adequado. Como anteriormente mencionado, o espaço anular entre o tubo interno 51 e o tubo 60 é mantido selado durante instalação de maneira a

impedir que o material intumescível 52 ative.

[00075] Uma vez que o cabo multicomponentes 50 esteja no lugar, material(s) intumescível(s) da camada 52 pode(s) ser levado a intumescer pelo bombeamento de fluido apropriado (por exemplo, água) através da coroa anular entre a camada 52 e o tubo 60. Como mostrado na figura 14, quando o intumescimento é completado, a camada 52 e o tubo 60 ocuparão todo o espaço entre o tubo interno 51 e a parede do furo. O tubo interno 51 ficará substancialmente centralizado no furo e fibras sinuosas 64 serão colocadas em proximidade com a parede do furo. Em modalidades preferidas, a camada 52, o tubo 60 e almofadas de sensor 62 são configuradas de maneira tal que, quando o intumescimento termina, as almofadas de sensor 62 são pressionadas contra a parede do furo de dados 72.

[00076] O cabo multicomponentes 50 fornece operacionalidade 3C com bom acoplamento acústico com a formação. Adicionalmente, uma vez que ele pode ser usado em um furo de dados de pequeno diâmetro, o cabo multicomponentes 50 permite desdobramento de custo relativamente baixo e pegada HSE bastante reduzida.

[00077] Embora as figuras 13 e 14 descrevam cabo multicomponentes 50 com relação a um furo de dados, entende-se que o cabo 50 é igualmente adequado para aplicações de superfície. Apenas a título de exemplo, a modalidade mostrada na figura 15 compreende um sistema de detecção óptica 80 configurado para uso na superfície da terra. Como o cabo multicomponentes 50, o sistema de detecção óptica 80 inclui um tubo interno 51 que aloja uma ou mais fibras ópticas 54. Além do mais, o tubo 51 pode alojar uma ou mais linhas de comunicação ou de transmissão de energia 55. Alternativamente, as fibras ópticas e os cabos elétricos podem estar em tubos separados (não mostrados). Envolvendo o tubo 51 está um corpo alongado 82 com pelo menos uma superfície inferior plana 83 e uma superfície superior 84 que pode ser arredondada. Também como o cabo multicomponentes 50, o

sistema de detecção óptica 80 inclui pelo menos uma, e preferivelmente uma pluralidade, de almofadas de sensor 62 que incluem cada qual pelo menos uma fibra sinuosa 64. As almofadas 62 são preferivelmente arranjadas de forma que as fibras 64 sejam sensíveis aos sinais que são normais ao eixo do sistema 80. Como na modalidade ilustrada na figura 15, uma almofada é preferivelmente colocada adjacente à superfície inferior 83. Em outras modalidades preferidas, pelo menos uma almofada é substancialmente vertical.

[00078] O corpo 82 é preferivelmente construído de um material com um módulo de Young, similar ou maior que o Módulo de Young da almofada de sensor 62 ou materiais similares aos materiais de encapsulação usados para fibra óptica e linhas de controle hidráulicas de subsuperfície, como são conhecidas na técnica, de maneira a prover resistência a esmagamento e abrasão.

[00079] Em modalidades preferidas, o sistema 80 é usado na superfície da terra para monitorar sinais sísmicos que deslocam através da subsuperfície. Assim, ele pode ser usado em conjunto com uma âncora no terreno 90 tal como está mostrado na figura 16. A âncora 90 preferivelmente inclui braços 92 através dos quais prendedores adequados podem ser usados para ancorar o sistema. Similarmente, se for desejável afixar o sistema 80 em uma superfície curva, os braços 92 podem ser curvados, como mostrado na figura 17. O sistema 80 pode ser usado para detecção de subsuperfície ou tubulação e conjunto com uma âncora e/ou adesivo ou outro dispositivo de fixação.

[00080] Além das várias aplicações supramencionadas, os sistemas de detecção óptica aqui descritos podem ser usados como cabos flutuadores rebocados ou desdobrados no leito oceânico (OBC). Espera-se que este sistema DASs em aplicações subaquáticas funcionem melhor do que em cabos enterrados no solo em virtude da ausência ondas de superfície submarinas e em virtude de o meio acústico submarino ser estável com o

tempo e não ser afetado por mudanças sazonais.

[00081] As modalidades aqui descritas podem ser usadas vantajosamente sozinhas ou em combinação umas com as outras e/ou com outros conceitos de fibra óptica. Os métodos e aparelho aqui descritos podem ser usados para medir tempos de chegada e formas de onda de sinais acústicos e em particular ondas acústicas transversais. Os tempos de chegada e formas de onda dão informação a respeito da formação e podem ser usados em várias técnicas sísmicas.

[00082] Em ainda outras aplicações, os métodos e aparelho aqui descritos podem ser usados para detectar eventos microssísmicos e os dados coletados usando a presente invenção, incluindo sinais de onda transversais, podem ser usados em localização microssísmica. Nessas modalidades, os dados são usados para gerar coordenadas de um evento microssísmico. Em ainda outras aplicações, a capacidade de os presentes sistemas detectarem ondas transversais e ondas axiais distintamente pode ser usada em várias aplicações DAS, incluindo, mas sem limitações, detecção de intruso, monitoramento de tráfego, tubulações e outros ambientes, e monitoramento de várias condições em um furo de sondagem, incluindo entrada de fluido.

[00083] Embora modalidades preferidas tenham sido reveladas e descritas, entende-se que várias modificações podem ser feitas nelas sem fugir do escopo da invenção apresentado nas reivindicações seguintes.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de detecção acústica de fibra óptica distribuída, caracterizado pelo fato de que compreende:

um cabo (12) tendo um comprimento de cabo, o cabo compreendendo

um corpo alongado com uma seção transversal circular ou elíptica, uma superfície externa e um eixo geométrico longitudinal (14);

uma fibra óptica reta (18, 19) se estendendo paralelamente ao eixo geométrico longitudinal ao longo do comprimento do cabo, e

uma fibra óptica enrolada helicoidalmente (11) disposta na superfície externa do corpo alongado e enrolada em um primeiro ângulo de enrolamento predeterminado; e

dispositivos transmissor e receptor de luz opticamente conectados em cada uma dentre a fibra óptica reta e fibra óptica enrolada helicoidalmente para, respectivamente, transmitir sinais ópticos em cada uma dentre a fibra óptica reta e a fibra óptica enrolada helicoidalmente, e para receber um retrodisperso dos sinais da fibra óptica reta e da fibra óptica enrolada helicoidalmente.

2. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que inclui adicionalmente uma segunda fibra óptica enrolada helicoidalmente disposta na superfície externa em um segundo ângulo de enrolamento predeterminado.

3. Sistema de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que o primeiro ângulo de enrolamento predeterminado é medido com relação a um plano normal ao eixo geométrico longitudinal do corpo alongado, sendo que o primeiro ângulo de enrolamento predeterminado é menor que 45°.

4. Sistema de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que o segundo ângulo de enrolamento predeterminado é entre 90° e

45°, medido com relação a um plano normal ao eixo geométrico longitudinal do corpo alongado.

5. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que inclui adicionalmente uma camada de elastômero intumescível envolvendo o corpo.

6. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que inclui adicionalmente uma haste de detecção (30) disposta no corpo alongado e contendo pelo menos uma fibra adicional (32).

7. Sistema de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que a fibra adicional (32) é reta.

8. Sistema de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que inclui adicionalmente uma camada de elastômero intumescível (20) entre a haste de detecção (30) e o corpo alongado.

9. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que inclui adicionalmente uma primeira camada de bainha (16) no exterior do corpo alongado e cobrindo o corpo alongado e a fibra óptica reta.

10. Sistema de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que a segunda fibra óptica enrolada helicoidalmente é enrolada ao redor do exterior da primeira camada de bainha (16).

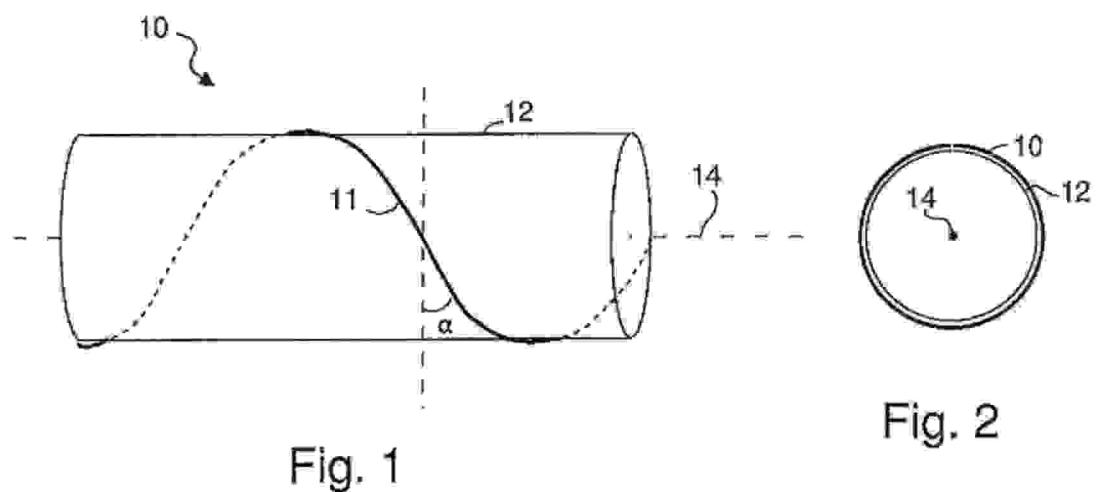


Fig. 1

Fig. 2

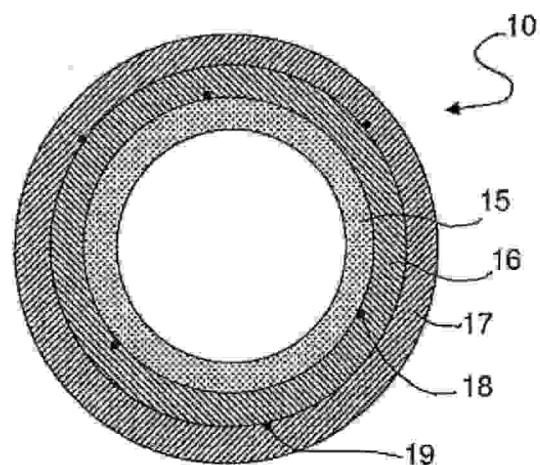


Fig. 3

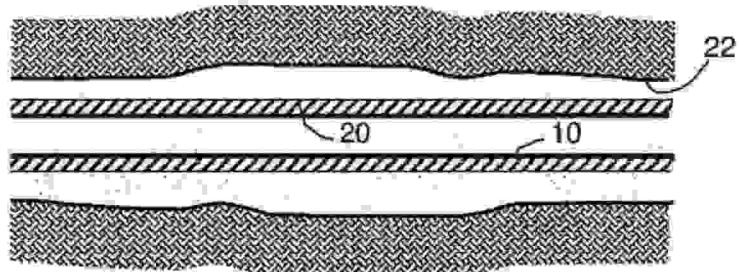


Fig. 4

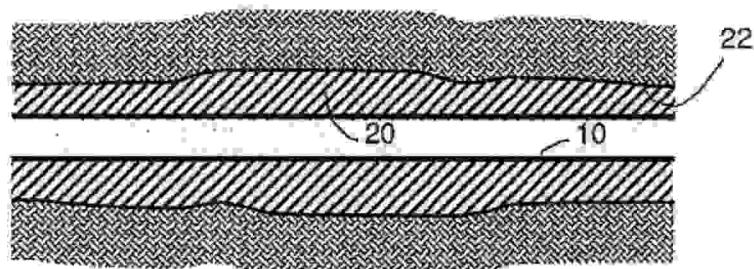


Fig. 5

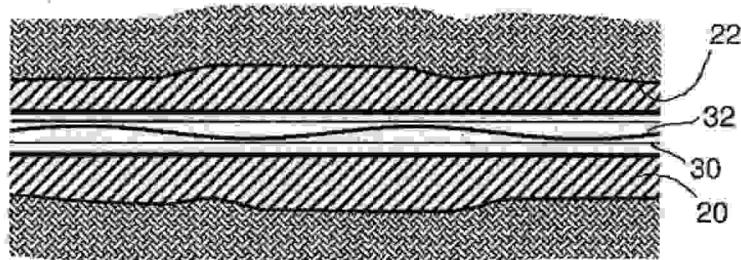


Fig. 6

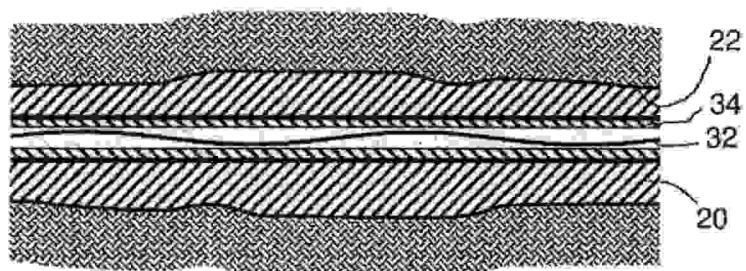


Fig. 7

Fig. 8

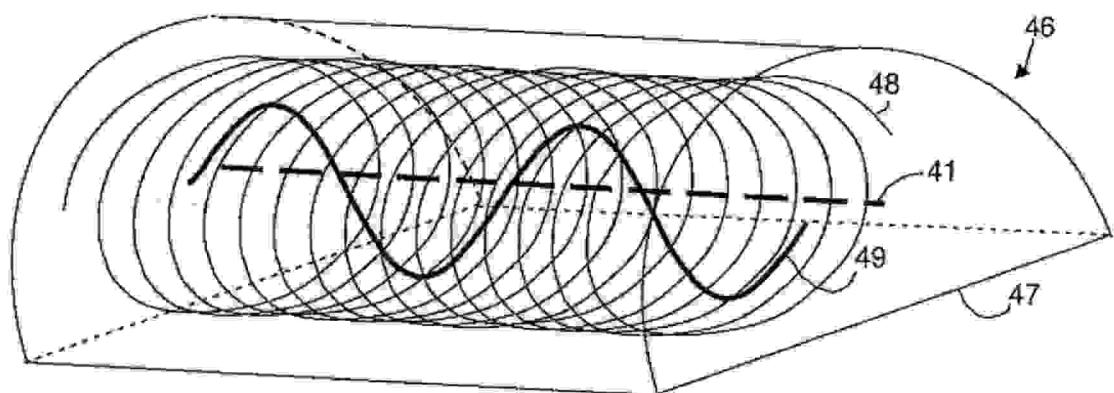
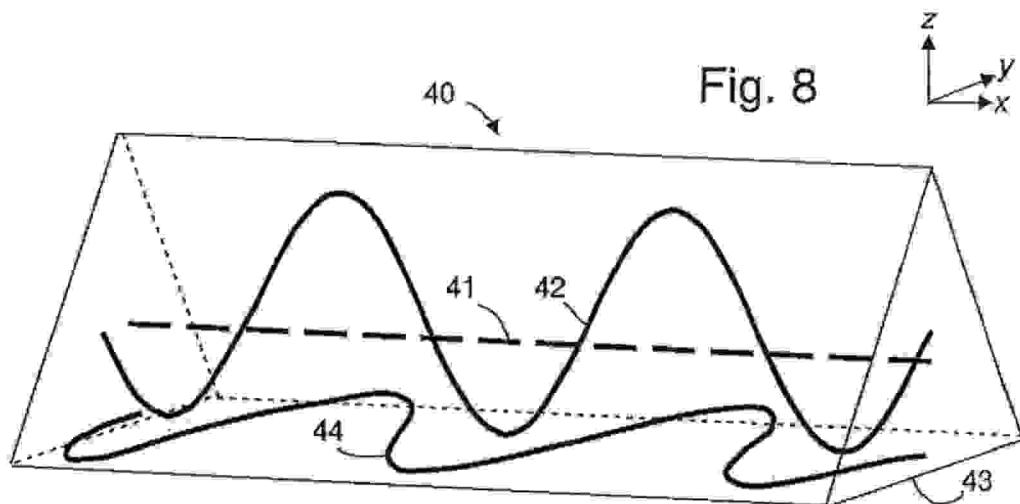
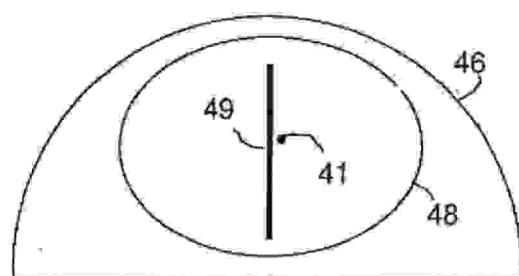


Fig. 9

Fig. 10



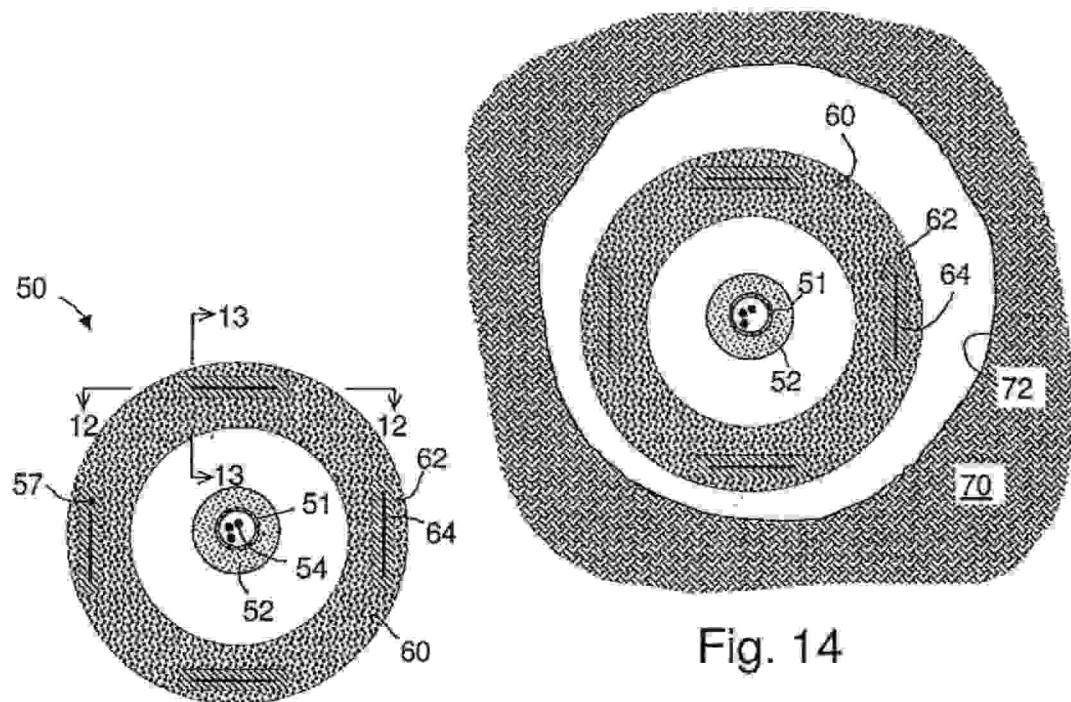


Fig. 11

Fig. 14

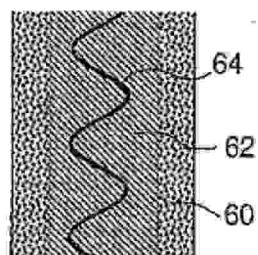


Fig. 12

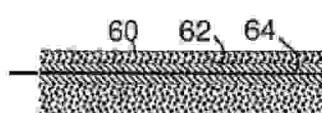


Fig. 13

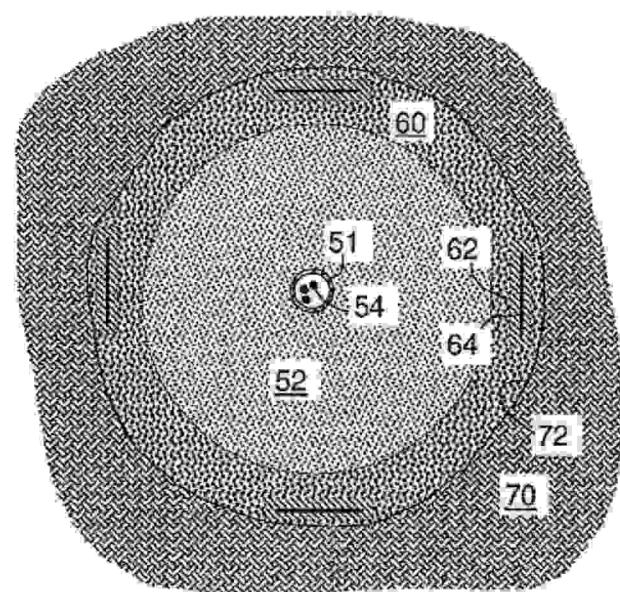


Fig. 15

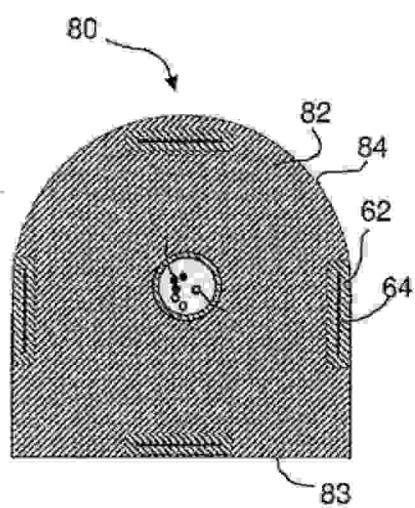


Fig. 16

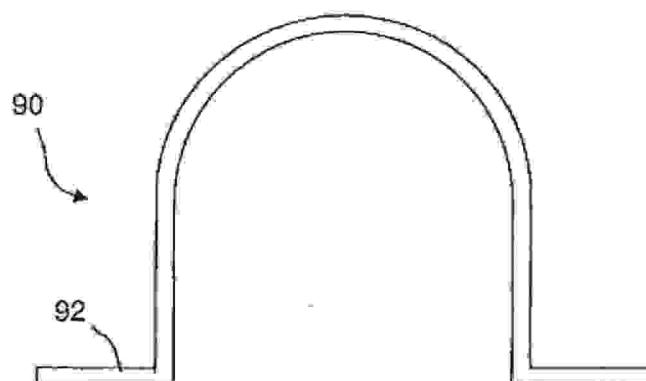


Fig. 17

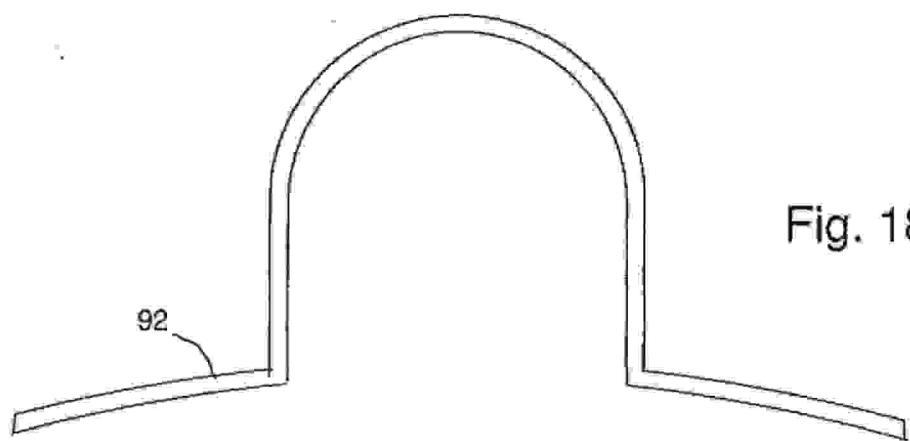


Fig. 18