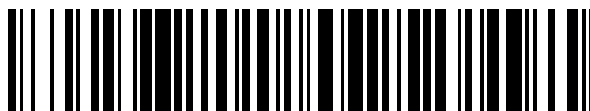


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 525 804**

51 Int. Cl.:

G01T 1/00 (2006.01)

G21C 17/108 (2006.01)

G21C 17/10 (2006.01)

G01K 11/30 (2006.01)

G01K 11/32 (2006.01)

G21C 17/112 (2006.01)

G02B 6/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.08.2009 E 09167929 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.10.2014 EP 2182388**

54 Título: **Termómetro gamma óptico**

30 Prioridad:

28.10.2008 US 259931

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

30.12.2014

73 Titular/es:

**GE-HITACHI NUCLEAR ENERGY AMERICAS LLC
(100.0%)**

**3901 CASTLE HAYNE ROAD
WILMINGTON, NC 28401, US**

72 Inventor/es:

**KOSTE, GLEN PETER;
XIA, HUA y
LEE, BOON KWEE**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 525 804 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Termómetro gamma óptico

Antecedentes de la invención**Campo de la invención**

5 En general, la invención se refiere a la monitorización del flujo de neutrones térmicos en el interior de un reactor nuclear, y en particular se refiere a un termómetro gamma óptico para su uso en una cadena de monitorización que tiene un monitor de rango de potencia local en el que la temperatura medida por el termómetro gamma óptico, en conjunto con un balance de calor de estado estable se utiliza para calibrar el monitor de rango de potencia local durante su vida útil en servicio.

10 Descripción de la técnica relacionada

En el interior de la reacción nuclear de los reactores de agua en ebullición (BWR) convencionales, es posible monitorizar el estado de la reacción ya sea por la medición del flujo de neutrones térmicos, o, alternativamente, por el flujo de rayos gamma.

15 El flujo de neutrones térmicos es la medición preferida, puesto que es directamente proporcional a la potencia y proporciona una señal rápida (instantánea) desde una cámara de fisión. La medición alternativa de la radiación gamma no tiene la respuesta rápida requerida necesaria para los requisitos de seguridad del reactor. En consecuencia, la radiación gamma medida por termómetros gamma no se utiliza para medir y controlar inmediatamente el estado de una reacción en los reactores nucleares de agua en ebullición.

20 Los reactores de agua en ebullición tienen sus flujos de neutrones térmicos supervisados por monitores de rango de potencia local, también conocidos como un sistema de monitorización de rango de potencia local (LPRM). Estos monitores de rango de potencia local incluyen un cátodo que tiene un material fisiónable que le recubre. El material fisiónable es en general una mezcla de U235 y U234. El U235 es para proporcionar una señal proporcional al flujo de neutrones y el U234 para alargar la vida del detector. Los neutrones térmicos interactúan con el U235 y producen fragmentos de fisión para ionizar un entorno de gas inerte, normalmente argón, en el interior del monitor de rango de potencia local convencional. Como consecuencia se produce un flujo de cargas eléctricas entre el ánodo y el cátodo con la corriente CC resultante. El amperaje de la corriente CC indica de forma sustancial en tiempo real el flujo de neutrones térmicos en el núcleo del reactor.

30 Los monitores de rango de potencia local de un reactor de agua en ebullición se insertan en el núcleo del reactor en cadenas. Cada cadena se extiende verticalmente y por lo general tiene cuatro monitores de rango de potencia local separados. Cada detector está conectado eléctricamente para leer el flujo de neutrones térmicos en tiempo real y para producir de salida el estado de la reacción en el interior del reactor. Se debe entender que un gran reactor puede tener del orden de 30 a 70 de tales cadenas verticales con un total de alrededor de 120 a 280 monitores de rango de potencia local. Tales monitores de rango de potencia local utilizan cantidades finitas de U235 durante su vida en servicio. En consecuencia, la sensibilidad cambia con la exposición y deben ser calibrados periódicamente.

35 La calibración se lleva a cabo en la actualidad mediante el uso de sondas circulantes en el núcleo (TIP). Estas sondas circulantes en el núcleo típicamente son retiradas del reactor, puesto que las sondas circulantes en el núcleo son de la misma construcción básica que los monitores de rango de potencia local y por lo tanto modifican su sensibilidad a lo largo de la vida en servicio debido al quemado del uranio 235.

40 Durante la operación, las sondas circulantes en el núcleo normalmente son calibradas. Tal calibración incluye la inserción por separado de aproximadamente cinco de tales sondas en una porción común de un reactor de agua en ebullición. El reactor de agua en ebullición es operado en estado estable y se le hace objeto de un balance de energía de un tipo bien conocido en la técnica. La inserción de las sondas circulantes en el núcleo se produce mediante la colocación de las sondas en un extremo de un cable semirrígido y efectuando la inserción en el interior de un sistema de tubo. Una vez que se ha producido una exploración completa del núcleo durante la operación en estado estable, se utiliza un balance de calor en combinación con las lecturas de las sondas circulantes en el núcleo para calibrar los monitores de rango de potencia local.

45 Las sondas en el núcleo se desplazan a través del reactor en un sistema de tubo diseñado especialmente. Este sistema de tubo constituye conductos de contención pasantes en el interior de la vasija del reactor. En estos conductos se colocan cables semirrígidos teniendo situadas dichos cables las TIP en el extremo distal de los mismos. Las TIP son dirigidas en el interior del sistema de tubo de accionamiento por medio de mecanismos de accionamiento grandes y todo el sistema es controlado desde una unidad de control de accionamiento electrónica.

50 Los cables pasan a través de las llamadas "válvulas de corte", pudiendo cortar tales válvulas el cable y obturar el conducto para evitar fugas a través del sistema de tubo, pudiendo ser sustanciales dichas fugas antes de que el

- 5 cable y las sondas puedan ser retirados. Los cables pasan adicionalmente a través de válvulas de cierre que admiten la sondas circulantes en el núcleo al interior de la contención de la vasija. Por último, los cables alcanzan los denominados indexadores, y a continuación el interior de la vasija del reactor. Estos indexadores proporcionan un sistema mecánico para el encaminamiento de cada una de las TIP para que pasen adyacentes al sitio de un segmento asignado de los aproximadamente 170 monitores de rango de potencia local en un reactor nuclear de agua en ebullición grande. Es normal que un indexador incluya 10 trayectos alternativos para que los siga una única sonda circulante en el núcleo durante un procedimiento de calibración.
- 10 No hace falta decir que este sistema es complicado y complejo. La calibración de cada monitor de rango de potencia local es una función de la medición de la sonda del flujo local de neutrones térmicos, así como una función de la posición del extremo del cable de inserción semirrígido. Naturalmente, esta posición del extremo del cable semirrígido tiene que ser referenciada a un trayecto alternativo adecuado para que se produzca la calibración necesaria.
- 15 Además, el sistema de tubo necesario incluye una matriz de tubos por debajo de la vasija del reactor. Normalmente estos tubos deben ser retirados para el servicio de mantenimiento por debajo de la vasija y sustituidos posteriormente.
- 20 A pesar de la presencia de ambas válvulas de cierre y válvulas de corte, el sistema permanece como una posible vía de escape para el agua que contiene partículas radiactivas del reactor. Además, el cable de retirada puede tener complicaciones mecánicas, además de ser radiactivo.
- 25 Por estas razones, recientemente se ha concebido omitir el uso de las TIP, y usar, en lugar de las TIP, otro tipo de aparato de medición de la potencia del reactor, en combinación con el sistema de LPRM. Este tipo de aparato, que se conoce como un termómetro gamma, comprende un sistema de sensores en una posición fija en el reactor que no requieren un mecanismo de accionamiento, ni implican deterioro sustancial de la sensibilidad.
- Los termómetros gamma son conocidos. En general, el termómetro gamma es un tipo de aparato de medición de la potencia del reactor, que detecta la cantidad de calor atribuible a la radiación, y en particular a los rayos gamma. En contraste con una cámara de ionización de fisión, el termómetro gamma no implica, en principio, un deterioro de la sensibilidad.
- 30 Haciendo referencia a la figura 8, un termómetro gamma típico T, como por ejemplo es conocido por el documento de patente EP 0 403 223 A2, se ilustra en un formato simple. Típicamente, el termómetro gamma T incluye una masa de metal 74 suspendida en voladizo en el interior de un tubo exterior 76. La masa de metal 74 alcanza una temperatura que depende directamente del flujo de rayos gamma.
- 35 Un termopar de lectura 78 y un termopar de referencia 80 son utilizados en un circuito en serie. Específicamente, el diferencial de temperatura entre el termopar de referencia 80 (típicamente referenciado a una porción interior del núcleo de temperatura estable) y el termopar de lectura 78 producen un voltaje en las líneas pareadas 82, 84 indicando el voltaje el flujo gamma presente que es proporcional a la potencia del reactor.
- 40 Los termómetros gamma se colocan en localizaciones fijos en el interior del reactor. Cada termómetro gamma requiere una conexión eléctrica y dispositivos electrónicos de lectura. Desafortunadamente, la producción de salida de rayos gamma medida por los termómetros gamma no proporciona una respuesta rápida a los transitorios de potencia como se requiere para la operación segura del reactor. Además, los termómetros gamma son caros y las sondas y el cableado asociado ocupan una cantidad significativa de espacio en el interior del reactor. En consecuencia, los termómetros gamma son desplegados en un número limitado y proporcionan un mapa más basto de la velocidad de reacción en el núcleo que el sistema TIP. Como consecuencia, sería deseable superar los problemas que se han mencionado anteriormente asociados con los termómetros gamma.
- 45 El documento JP 2007163209 A se refiere a un sistema de medición de la distribución de producción de salida de un reactor nuclear para proporcionar la medición durante en tiempo completo y tener una estructura sencilla, fácil de reemplazar.
- Este sistema utiliza fibras ópticas para transportar la luz dispersada de Raman para las mediciones de temperatura por rayos gamma en el interior de un núcleo de reactor nuclear.
- El documento de patente de Estados Unidos 7.336.862 B1 describe una fibra óptica que comprende una rejilla de Bragg para las mediciones de temperatura en una instalación de reactor nuclear.
- Breve resumen de la invención**
- 50 En un aspecto de la invención, se proporciona un termómetro gamma óptico de acuerdo con la reivindicación 1 de la presente memoria descriptiva.

En otro aspecto de la invención, se proporciona un reactor nuclear de acuerdo con la reivindicación 10 de la presente memoria descriptiva.

Breve descripción de los dibujos

5 Estas y otras características, aspectos y ventajas de la presente invención se entenderán mejor con la lectura de la descripción detallada que sigue con referencia a los dibujos que se acompañan, en los que los mismos caracteres representan partes similares en todos los dibujos, en los que:

10 la figura 1 es una vista esquemática de un reactor nuclear de agua en ebullición que ilustra una cadena de monitores de rango de potencia local con un termómetro gamma óptico que está instalado en un tubo de guiado en el núcleo para determinar un flujo gamma en el interior del núcleo del reactor de acuerdo con una realización de la invención;

la figura 2 es una vista en sección transversal ampliada de un monitor de rango de potencia local para la instalación en el núcleo de un reactor;

la figura 3 es un grupo constituido por un detector de rango de potencia local y un termómetro gamma óptico de acuerdo con una realización de la invención;

15 la figura 3A es una vista en sección transversal ampliada del termómetro gamma óptico de la figura 3;

la figura 4 es una vista en perspectiva en sección transversal parcial de una porción del termómetro gamma óptico de acuerdo con una realización de la invención;

20 la figura 5 es una representación gráfica de la potencia reflejada con respecto a la longitud de onda para un termómetro gamma óptico con una estructura de rejilla de Bragg sobre fibra (FBG) con diez (10) rejillas de acuerdo con una realización de la invención;

la figura 6 es un grupo constituido por un detector de rango de potencia local y un termómetro gamma óptico de acuerdo con otra realización de la invención;

la figura 6A es una vista en sección transversal ampliada del termómetro gamma óptico de la figura 6;

25 la figura 7A es un diagrama esquemático de un sistema para la medición del flujo gamma en múltiples localizaciones discretas con múltiples termómetros gamma ópticos usando un único cable de fibra óptica de acuerdo con una realización de la invención;

la figura 7B es un diagrama esquemático de un sistema para la medición del flujo gamma en múltiples localizaciones discretas con múltiples termómetros gamma ópticos que utilizan múltiples cables de fibra óptica de acuerdo con una realización de la invención;

30 la figura 7C es un diagrama esquemático de un sistema para la medición del flujo gamma continuamente a lo largo de la longitud de múltiples cables de fibra óptica, que se muestra con fines de ilustración. Este sistema no es parte de la invención; y

la figura 8 es una vista en sección transversal de un termómetro gamma convencional.

Descripción detallada de la invención

35 Haciendo referencia a la figura 1, se muestra una vasija de reactor V con su cúpula retirada y una cadena de monitores de rango de potencia local S en el proceso de inserción. Típicamente, la cadena S se inserta dentro del tubo 24. El tubo 24 comienza en la placa de núcleo 12 y se extiende a través de la parte inferior de la vasija de reactor V.

40 La porción de la cadena S en el interior del núcleo se extiende por encima del tubo 24. Una porción superior de la cadena S se ajusta a la guía superior 12. De este modo, la cadena S cuando está sujeta por último en el núcleo, se mantiene verticalmente en posición recta en exposición de medición del flujo de neutrones interior en el núcleo del reactor.

45 Haciendo referencia a la figura 1, se ilustra una sección de una vasija de reactor de agua en ebullición V. La vasija V incluye una cubierta 14 del núcleo que rodea a un núcleo 15 controlado por barras de control 16. En la porción del reactor que se muestra en la figura 1, una o más bombas de chorro 13 aspiran agua sobre la parte superior de una guía superior 12 hacia abajo en el volumen intersticial entre el lateral de la vasija V y la cubierta 14 del núcleo por medio de las bombas de chorro 13, a una cámara de sobrepresión P situada por debajo del núcleo del reactor. A continuación, el agua pasa hacia arriba a través de una placa de núcleo 17 dentro de los haces de combustible individuales del núcleo 15. El agua para las bombas de chorro se extrae en 19, entra en 18 para producir la circulación forzada requerida en el interior del reactor. Aunque en la presente memoria descriptiva se describe un reactor de

agua en ebullición, se entenderá que los principios de la invención se pueden utilizar en cualquier tipo de reactor nuclear en el que se utiliza instrumentación en el núcleo.

5 Como se muestra, un único tubo de guiado de instrumentación 24 se ilustra para la inserción de una cadena de monitores de rango de potencia local S. Se entenderá que la inserción comienza desde arriba del núcleo 15. La
 10 cadena S desde la parte superior del núcleo 15 es insertada dentro de la parte inferior del tubo de guiado 24 en el núcleo. Una obturación está constituida en la parte inferior del tubo de guiado 24 en el núcleo. La cadena se extiende desde la parte superior del núcleo 15 adyacente a la guía superior 12. El tubo de guiado 24 en el núcleo puede ser diseñado también de tal manera que se pueda acceder desde la parte inferior del núcleo del reactor 15. Cada
 15 cadena S incluye típicamente cuatro sitios de monitorización. Estos sitios de monitorización están espaciados por igual entre la guía superior 12 y la placa de núcleo 17. Se posicionan para realizar muestras en cuatro intervalos verticales sucesivos en el interior del reactor.

Aunque la ilustración de la figura 1 sólo muestra uno de estos tubos de guiado 24 en el núcleo, se entenderá que de hecho se utilizan muchos de ellos para controlar un núcleo típico 15. Por ejemplo, no es raro incluir sesenta y cuatro
 20 (64) de tales tubos de guiado de instrumentación o aproximadamente 256 monitores de rango de potencia local cableados discretamente.

Se debe entender que los monitores de rango de potencia local se combinan en diferentes grupos para producir la medición requerida. Debido a que la combinación de tales grupos no es pertinente para la presente invención y debido a que la instrumentación para la lectura de tales monitores de rango de potencia local es bien conocida, tal instrumentación no se describirá adicionalmente en la presente memoria descriptiva.

25 Haciendo referencia a la figura 2, un monitor de rango de potencia local M incluye un cátodo cilíndrico exterior 60 y un ánodo interior concéntrico y cilíndrico 62 alojado en el interior de un tubo exterior 70. El cátodo 60 adyacente al ánodo 62 está provisto de una capa fina de materiales fisionables 64. Los materiales 64 son típicamente combinaciones de U235 y U234. Como es bien conocido en la técnica, el U235 se agota durante la vida del monitor M; el U234 genera U235 de reemplazo prolongando así la vida en servicio del detector M.

30 Típicamente, el ánodo 62 está montado con bloques de aislamiento 66 en cada extremo de manera que sea concéntrico con el cátodo envolvente 60. Preferiblemente, una atmósfera de argón 68 está presente. Normalmente, un cable coaxial conduce desde el detector estando conectado el conductor central al ánodo y estando conectado el conductor exterior al cátodo. Es la corriente continua a través del cable lo que proporciona la medición del flujo de neutrones térmicos en tiempo real.

35 En operación, los neutrones térmicos impactan contra el U235 en la capa 64. Los componentes de fisión se disipan en gas de argón 68 y hacen que los electrones fluyan al ánodo con iones de polaridad opuesta al cátodo. Una corriente continua global se induce a través del cable 69 con lo que la corriente continua es leída convencionalmente. Se requiere la calibración del monitor de rango de potencia local M puesto que el componente U235 de la capa 64 varía con la vida en servicio.

40 Cuando la cadena S se inserta en el tubo de guiado en el núcleo 24 en el interior del núcleo 15 y el reactor es operado bajo condiciones de operación de estado estable, los termómetros gamma se pueden utilizar para calibrar los monitores de rango de potencia local M en conjunto con un balance de calor convencional del reactor. Típicamente, los termómetros gamma se encuentran en las proximidades de los monitores de rango de potencia local M en el interior de la cadena S. Por ejemplo, la cadena S puede contener un total de cuatro (4) detectores de rango de potencia M a diferentes alturas en el núcleo 15. En una realización, uno o más termómetros gamma pueden estar situados en la proximidad de cada detector de rango de potencia M para proporcionar una indicación del flujo gamma en localizaciones discretas en el interior del núcleo 15.

45 Por la conveniencia de referenciar al flujo gamma a la salida del balance de calor (energía), la calibración de los monitores de rango de potencia local se produce durante su vida útil en servicio. El balance de energía requerido que mide la potencia de salida de un reactor nuclear en estado estable es parte del estado de la técnica. Una vez que esto se conoce, todas las mediciones de los termómetros gamma se pueden correlacionar con la intensidad de la reacción en cualquier punto dado. Debido a que uno o dos termómetros gamma se encuentran adyacentes a cada monitor de rango de potencia local M, es posible a partir de entonces calibrar cada monitor de rango de potencia local M con la lectura de su termómetro gamma adyacente.

50 Como se ha descrito anteriormente, el termómetro gamma convencional T mide la temperatura de la masa de metal 74 mediante el uso de un termopar de lectura 78 y un termopar de referencia 80. De acuerdo con la invención, la temperatura de las masas de metal 34, 36 no se mide con el termopar de lectura 78 y con un termopar de referencia 80, sino que se hace con un sensor de fibra óptica. Como se usa en la presente memoria descriptiva, un sensor de fibra óptica es un sensor que utiliza fibra óptica, ya sea como elemento de detección ("sensores intrínsecos"), o
 55 como un medio de transmitir señales desde un sensor remoto a los componentes electrónicos que procesan las señales ("sensores extrínsecos").

Haciendo referencia a continuación a la figura 3, se muestra una porción de la cadena S que incluye un termómetro gamma óptico, mostrado en general como 30, para medir el flujo gamma en localizaciones discretas en el interior del núcleo 15, de acuerdo con una realización de la invención. La cadena S incluye un tubo de cubierta en el que hay un flujo ascendente de agua a su través. Cuando se utiliza el termómetro gamma óptico para calibrar el monitor de rango de potencia local M, es deseable que el termómetro gamma óptico 30 se encuentre en las proximidades del monitor de rango de potencia local M. En la realización ilustrada, el monitor de rango de potencia local M está separado del termómetro gamma óptico 30 por una pequeña distancia d, de manera que el flujo de neutrones en el monitor de rango de potencia local M sea esencialmente uniforme. Por ejemplo, la distancia d puede ser de aproximadamente 25,4 mm (1 pulgada). Se apreciará que la cadena S puede incluir un segundo termómetro gamma óptico situado en el lado opuesto del monitor de rango de potencia local M que podría estar separado la misma distancia d, o en una segunda distancia desde el monitor de rango de potencia local M.

Como se ve en la figura 3A, el termómetro gamma óptico 30 incluye una fibra óptica 32 que se extiende a lo largo de la longitud de la cadena S. En la realización ilustrada, se muestra un único termómetro gamma 30. Sin embargo, varios termómetros gamma pueden estar situados a lo largo de la única fibra óptica 32. El termómetro gamma óptico 30 incluye también una masa de metal 34 que está térmicamente aislada del entorno ambiental y se calienta en presencia del flujo gamma. Una forma de aislar térmicamente la masa de metal 34 del entorno ambiental, por ejemplo, es proporcionar un espacio de separación 35 entre la masa de metal 34 y el tubo exterior 76. El termómetro gamma óptico 30 también incluye una segunda masa de metal 36 opcional en contacto térmico con el entorno ambiental, que actúa como un disipador de calor para proporcionar una medición de la temperatura ambiente para ser utilizada como una temperatura de referencia. En una realización alternativa, la segunda masa de metal 36 se puede omitir y la invención puede practicarse sin la necesidad de medir la temperatura ambiente.

Haciendo referencia a la figura 4, el cable de fibra óptica 32 incluye un núcleo de fibra central 38 formado de sílice pura o dopada, que se extiende a lo largo de un eje longitudinal 33 y que tiene un diámetro desde aproximadamente 5 micrómetros a aproximadamente 100 micrómetros. En una realización particular, el cable de fibra 32 incluye un perfil de índice de refracción modulado periódico a lo largo del eje largo 33, tal como un perfil de índice de refracción apodizado de coseno o gaussiano. Un revestimiento de fibra 40 cubre circunferencialmente el núcleo de fibra 38 y tiene un diámetro exterior de aproximadamente 125 micrómetros hecho de sílice pura o dopada. El núcleo de fibra 38 tiene un índice de refracción mayor que el revestimiento de fibra 40 de tal manera que el cable de fibra 32 actúa como una guía de ondas de propagación de la luz. En una realización, el núcleo de fibra 38 está hecho de dióxido de silicio puro y el revestimiento de fibra 40 está dopado con flúor como un cable sensor de fibra de revestimiento único. En una realización alternativa, el núcleo de fibra 38 es co - dopado con F / GeO₂, y el revestimiento de fibra 40 está dopado con F como un cable sensor de fibra de revestimiento único. Además, el revestimiento de fibra 40 podría ser una estructura de doble revestimiento con un primer revestimiento ligeramente dopado con F, y un segundo revestimiento fuertemente dopado con F. El material de fibra, ya sea dióxido de silicio puro o estructuras tetraédricas co - dopadas de O - Si - O tiene todos los enlaces libres terminando con F y elimina los grupos hidroxilo OH para mantener la estabilidad térmica y la capacidad de resistencia a la radiación de la estabilidad térmica de la estructura tetraédrica.

En una realización, una fuente de luz (no mostrada), tal como un láser sintonizable, un diodo emisor de luz (LED) superluminiscente y otros similares, se coloca en comunicación de emisión de luz con el cable de fibra óptica 32 y emite una luz de infrarrojo cercano que se propaga a través del núcleo de fibra 38. Se apreciará que la invención no está limitada por el tipo de fuente de luz, y que la invención puede ser practicada usando cualquier fuente de luz adecuada.

La luz se transmite o se propaga a través del núcleo de fibra 38 y al interior de una célula fotoeléctrica o interrogador 52 (figura 7A). De acuerdo con la invención, el termómetro gamma óptico 30 incluye una o más estructuras de rejilla de fibra 42 que reflejan la luz que tiene una longitud de onda seleccionada cuando la luz es transmitida a través del núcleo de fibra 38. De acuerdo con la invención, la estructura de rejilla de fibra 42 comprende una rejilla de Bragg sobre fibra (FBG). La longitud de onda seleccionada es determinada por $2 \cdot n \cdot \Lambda$, en la que n es el índice de refracción efectiva en el núcleo de fibra y Λ es la periodicidad de modulación de la rejilla. La longitud de onda de la luz reflejada corresponde a una temperatura de las masas de metal 34, 36. La señal de luz reflejada es transmitida al fotodetector (figuras 7A - 7C), en los que se procesa la señal de luz y / o es transmitida a un ordenador (no mostrado) interconectado y / o en comunicación con el fotodetector. Por ejemplo, en una realización, una interfaz inalámbrica 167 (figura 7B) puede transmitir señales eléctricas al ordenador en respuesta a las señales de luz recibida por el fotodetector.

En una realización, cada estructura de rejilla de fibra 42 tiene una longitud a lo largo del eje largo 33 del cable de fibra óptica 32 desde aproximadamente 5 milímetros hasta aproximadamente 20 milímetros. En el caso de que el núcleo de fibra 38 esté hecho de dióxido de silicio puro y el revestimiento de fibra 40 sea una estructura de revestimiento doble, la estructura de la rejilla de fibra 42 se puede hacer a partir de una fibra de cuarzo puro inscrito con una tecnología de inscripción de rejilla de láser de impulsos de femtosegundos de alta potencia.

En otra realización, la estructura de rejilla de fibra 42 puede tener un revestimiento metalizado (no mostrado) que rodea el revestimiento de fibra 40 que tiene un recubrimiento policristalino de Al, Cu / Ni, o Au con un grosor de aproximadamente 10 a 20 micrómetros. En la realización ilustrada, el termómetro gamma óptico 30 incluye dos rejillas de Bragg sobre fibra de periodo corto (FBG) 42. Sin embargo, la invención puede practicarse con cualquier número deseable de FBG. Por ejemplo, la invención puede practicarse con sólo una FBG, con tres FBG, y otros similares. En una realización, la FBG 42 tiene una modulación de índice de refracción apodizada a lo largo del eje 33 con un tamaño de paso de aproximadamente 0,5 micrómetros. Se apreciará que la invención no se limita a una estructura de rejilla de Bragg sobre fibra (FBG), y que la invención puede practicarse con otras estructuras de rejilla, tales como rejillas de periodo largo, fibra helicoidal, y otras similares. Una separación entre cada rejilla de Bragg sobre fibra puede estar comprendida entre aproximadamente 2 milímetros hasta aproximadamente 10 centímetros.

La FBG 42 está configurada en una disposición de empaquetado holgado para estar libre efectivamente de los efectos producidos por la tensión. En una realización, la longitud de fibra que contiene una o más FBG 42 está empaquetada holgadamente en un cilindro estructural, de tal manera que el diámetro exterior del cable de fibra 32, típicamente de 125 micrómetros, es ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro estructural, típicamente de aproximadamente 140 micrómetros. Cualquier tensión inducida en el paquete desde el exterior producida por los gradientes térmicos o la masa de la estructura no será transferida al cable de fibra o a las FBG. De esta manera, la respuesta óptica de las FBG estará limitada a efectos de la temperatura y no a los efectos de tensión. El cable de fibra óptica y las FBG 42 también pueden estar recubiertos con una capa delgada de material, tal como aluminio, para proteger el cable de fibra contra los daños en el interior del cilindro estructural. El efecto de la tensión en las FBG 42 producida por las diferencias en los coeficientes de expansión térmica entre la fibra de vidrio y el recubrimiento puede medirse o calcularse, y tenerse en cuenta en la translación entre el desplazamiento de longitud de onda óptica y la temperatura.

La luz es reflejada en una única longitud de onda desde las estructuras de rejilla de Bragg sobre fibra 42. La señal reflejada es una función de las propiedades del material y de la estructura de la rejilla, tales como el índice de refracción (n), el número de modulación de rejilla N, el número de modo normalizado V, el periodo de rejilla A, y la longitud de rejilla L_G. El desplazamiento de longitud de onda inducido térmicamente, la pérdida de potencia reflejada, y la anchura del pico de resonancia de Bragg de la FBG 42 pueden ser descritos como:

$$\Delta\lambda(T) = \lambda_B \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T;$$

$$R = \text{tgh}^2 \left[\pi \frac{\Delta n L_G}{\lambda_B} \left(1 - \frac{1}{V^2} \right) \right];$$

$$\Delta\lambda = \lambda_B \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \right)^2}$$

Obviamente, el desplazamiento de longitud de onda relativo es proporcional al cambio de temperatura inducido por los rayos gamma. Los parámetros son el coeficiente termo - óptico y el coeficiente de expansión térmica, determinados por las propiedades del material de la fibra.

Haciendo referencia a continuación a la figura 5, se muestra un ejemplo de una respuesta de reflexión a un termómetro gamma óptico con una agrupación de diez (10) rejillas Bragg sobre fibra. Como se muestra en la figura 5, la potencia reflejada se encuentra en el intervalo entre aproximadamente - 15 dBm y aproximadamente - 50 dBm para longitudes de onda entre aproximadamente 1510 nm y aproximadamente 1590 nm. La separación de los picos varía como una función del periodo de rejilla, y la modulación de la longitud de onda central de cada pico es una indicación del flujo gamma (o la temperatura). La resolución de la temperatura es de menos de 1 grado C.

La fibra óptica, por la naturaleza de sus propiedades materiales, es un sensor ideal de temperatura distribuida. Hay varios procedimientos disponibles para extraer la información de la temperatura distribuida desde la fibra óptica. Estos incluyen técnicas basadas en la dispersión de Raman, de Brillouin, y de Rayleigh, así como aquellas que involucran rejillas de Bragg sobre fibra multiplexadas (FBG). Las técnicas basadas en la dispersión de Raman y de Brillouin utilizan el tiempo de vuelo (TOF) de pulsos ópticos para resolver la posición. Debido a los límites de la longitud que pueden tener los pulsos ópticos y ser detectados con un buen rendimiento de ruido, los sistemas están limitados por lo tanto en la resolución espacial de aproximadamente 0,1 m hasta aproximadamente 1 m. Los procedimientos que emplean las FBG pueden lograr una mayor resolución, pero a menudo están limitados por el número de rejillas en cada fibra. Siempre que se necesiten más de 50 FBG en cada fibra, un procedimiento de multiplexación, ya sea con un acoplador / combinador óptico / o conmutador óptico, podría ser utilizado para múltiples interrogatorios de

sensor FGB. Ambas técnicas basadas en FBG y basadas en dispersión pueden requerir una fibra óptica especial, por ejemplo, una fibra óptica resistente a la radiación, y otras similares.

La dispersión de Raman permite que se pueda medir la temperatura. La señal que se obtiene es típicamente un espectro cuyos picos están relacionados linealmente con la simetría del material y las propiedades estructurales. Estos picos se producen a intervalos característicos que dependen de las características físicas de la vibración de fonones ópticos, produciendo de este modo una huella dactilar única para ese material y haciendo de éste un buen procedimiento para el análisis del material. En la espectroscopia de Raman, ese intervalo característico es el desplazamiento de frecuencia de los modos de vibración de los fonones ópticos. Este desplazamiento de frecuencia está relacionado con los componentes de rotación y de vibración de cada energía de excitación de los fonones en el momento que se encuentra con el láser, y aparece como un desplazamiento positivo (dispersión de Stokes) cuando los fonones reciben energía del láser y un desplazamiento negativo (dispersión anti - Stokes) cuando los fonones emiten energía. La intensidad relativa de los picos Stokes y anti - Stokes depende de la temperatura en la que un sistema de fonones ópticos se encuentra, que sigue una distribución de Boltzmann.

La dispersión de Brillouin se produce cuando la luz en un medio (tal como agua o un cristal) interactúa con las variaciones de densidad dependientes del tiempo y modifica su energía (frecuencia) y trayecto. Las variaciones de densidad pueden ser debidas a fluctuaciones de la función dieléctrica transitorias. Cuando la luz interactúa con ondas transversales y acústicas longitudinales, la señal de luz dispersa también contiene componentes de señal Stokes y anti - Stokes. Sin embargo, la determinación de la temperatura es por desplazamientos de frecuencia de una onda acústica específica, o por la variación de la velocidad de una onda transversal o longitudinal. Para el material de fibra isotrópico, la velocidad de la onda transversal y de la longitudinal se determina por $(C_{44}/\rho)^{1/2}$ y $(C_{11}/\rho)^{1/2}$ en la que C_{11} y C_{44} son el módulo elástico y ρ es la densidad de masa del material de la fibra. La determinación de la temperatura es por la velocidad medida o por el desplazamiento de frecuencia.

El proceso de dispersión inelástica de la dispersión de la luz de Brillouin es, en principio, la misma que la dispersión de Raman. Históricamente, la dispersión de Brillouin se denomina dispersión de fonones acústicos, mientras que la dispersión de Raman se refiere a la dispersión de las vibraciones de moléculas y fonones ópticos. Hoy en día, la diferencia entre la dispersión de Brillouin y la dispersión de Raman se considera que se encuentra en las diferentes técnicas experimentales y el rango resultante de frecuencias disponibles diferentes. El término dispersión de Brillouin etiqueta una detección experimental del desplazamiento de frecuencia con un interferómetro, mientras que la dispersión de Raman etiqueta una instalación que emplea un espectrómetro de rejilla. La dispersión de Brillouin está técnicamente limitada a la detección de cuasi - partículas con frecuencias por debajo de aproximadamente 500 GHz, mientras que con la dispersión de Raman se pueden medir frecuencias mucho más altas, en el rango de los THz.

Para haces intensos que se desplazan en un medio, tal como una fibra óptica, las variaciones en el campo eléctrico del propio haz puede producir vibraciones acústicas en el medio por medio de la electrostricción. El haz puede someterse a la dispersión de Brillouin por estas vibraciones, en general en dirección opuesta al haz entrante, un fenómeno conocido como dispersión de Brillouin estimulada (SBS). Los desplazamientos de frecuencia típicos de modos acústicos longitudinales y transversales son del orden de alrededor de 20 a 50 GHz. La dispersión de Brillouin estimulada es un efecto por el cual puede tener lugar la conjugación de la fase óptica.

Para todos los procedimientos de detección anteriores, ya sean basado en FBG o en la misma fibra, el cable sensor de fibra requiere material de fibra de especialidad que pueda resistir firmemente las partículas de alta energía o daños de cuasi - partículas tales como los rayos gamma, neutrones, y rayos alfa y beta, etc. Las fibras necesarias de modo único o de multimodo están compuestas por un núcleo de la fibra, ya sea dióxido de silicio puro o dióxido de silicio dopado, fibra de revestimiento, ya sea dióxido de silicio puro cuando el núcleo de fibra es co - dopado con dopante tal como F / GeO₂ o dopado con flúor cuando el núcleo de la fibra es el dióxido de silicio puro. En una realización, dicha fibra está compuesta por un núcleo de dióxido de silicio puro de 4 a 62,5 µm de diámetro, y un revestimiento de la fibra dopado con flúor de 125 µm de diámetro. En otra realización, el revestimiento de la fibra está hecho de dos estructuras de revestimiento. El primer revestimiento es aproximadamente de 24 a 30 µm para fibra de modo único y 82,5 µm para fibra multimodo con una concentración de dopaje de flúor ligera; la segunda zona de revestimiento, desde el diámetro del revestimiento anterior de 125 µm, tiene una concentración de dopado con flúor superior, de manera que el perfil de índice de refracción de la fibra se reduce desde 10^{-4} a 10^{-2} para una pérdida de transmisión reducida.

Se prefiere que el material de la fibra, dióxido de silicio, tenga estructuras condensadas tetraédricas de O - Si - O de tal manera que los enlaces libres estén terminados principalmente por flúor. Los niveles de impurezas en el intervalo de banda del material de la fibra tienen que ser eliminados tal como por un proceso de recocido térmico que aumenta eficazmente el intervalo de banda del material de la fibra dopado. El precondicionamiento impide que los portadores se transporten entre las bandas de covalencia y conducción, minimizando de esta manera los cambios en la conductividad o el índice de refracción. Por otro lado, la sustitución del enlace O - Si - OH por O - Si - F podría eliminar los grupos hidroxilo OH, que pueden causar oscurecimiento de la fibra.

Debido a que una capa de revestimiento metalizada, tal como Al, Cu / Ni, Au, se utiliza para la obturación y el empaquetado herméticos, su microestructura holgada tiene que ser modificada para tener una morfología policristalina por medio de recocido térmico a temperatura elevada durante cierto tiempo. La temperatura deseada para el proceso de preacondicionamiento de la fibra es inferior a 400°C para fibra y sensores de fibra recubiertos con Al, y menos de 500°C para Cu / Ni, y menos de 700°C para el recubrimiento con Au. El tiempo deseado debe ser más de 24 horas en un ambiente inerte.

Haciendo referencia a continuación a la figura 7A, se muestra un sistema, mostrado en general como 150, para determinar un flujo gamma con múltiples termómetros gamma ópticos 30 en múltiples localizaciones discretas en el núcleo del reactor 15 desde un único cable de fibra óptica 32,. Por ejemplo, la cadena S puede tener ocho (8) termómetros gamma ópticos 30 en localizaciones discretas a lo largo del cable de fibra óptica 32. El sistema 150 incluye un interrogador, que se muestra en general por 152, en comunicación óptica con un cable de fibra óptica 32.

De acuerdo con la invención, los termómetros gamma ópticos 30 incluyen la estructura de rejilla de Bragg sobre fibra 42 para medir la temperatura de la masa de metal 34 y / o 36 en localizaciones discretas en el núcleo del reactor 15. El interrogador 152 incluye una fuente de luz 154 y un receptor de luz 156, y una unidad de procesador y comunicaciones 158. Un acoplador óptico o circulador 159 recibe la luz transmitida desde la fuente de luz 154 y transmite una parte de la luz a través de la fibra de núcleo 38 del cable 32 de fibra óptica. El detector de luz 156 recibe la luz reflejada desde los termómetros gamma ópticos 30 a través del acoplador óptico o circulador 159. El procesador 158 recibe una señal de la luz reflejada desde el detector de luz y procesa la señal de acuerdo con procedimientos conocidos en la técnica.

Haciendo referencia a continuación a la figura 7B, se muestra un sistema, que se muestra en general como 160 para determinar un flujo gamma con múltiples termómetros gamma ópticos 30 en múltiples localizaciones en el núcleo del reactor 15 a partir de múltiples cables de fibra óptica 32. Por ejemplo, el sistema 160 puede incluir sesenta y cuatro (64) cadenas S habiendo ocho (8) termómetros gamma ópticos 30 en cada cadena S. De manera similar a la realización que se muestra en la figura 7A, los termómetros gamma ópticos 30 incluye la estructura de rejilla de Bragg sobre fibra 42 para medir la temperatura de la masa de metal 34 y / o 36 en localizaciones discretas en el núcleo del reactor 15. El sistema 160 incluye un interrogador, tal como un interrogador FBG, que se muestra en general como 162, en comunicación óptica con un divisor óptico o conmutador 164. De manera similar al interrogador 152 que se muestra en la figura 7A, el interrogador 162 incluye una fuente de luz 154 y un receptor de luz 156, y una unidad de procesador y de comunicaciones 158. El interrogador 162 está en comunicación con una interfaz de red 166 para transmitir datos a un procesador 168, tal como un ordenador portátil, y otros similares. La interfaz de red 166 también puede transmitir a una interfaz inalámbrica 167 para la transmisión inalámbrica al procesador 168.

Haciendo referencia a continuación a la figura 7C, se muestra con fines ilustrativos un sistema, que se muestra en general como 170, para determinar un flujo gamma con múltiples termómetros gamma ópticos 30 en múltiples localizaciones en el núcleo del reactor 15 a partir de múltiples cables de fibra óptica 32. Este sistema no es parte de la invención. A diferencia de las realizaciones que se muestran en las figuras 7A, 7B, los termómetros gamma ópticos 30 no incluyen la estructura de rejilla de Bragg sobre fibra 42 para medir la temperatura de la masa de metal 34 y / o 36, pero miden la temperatura continuamente a lo largo de la longitud del cable de fibra óptica 32 en el núcleo del reactor 15. Un interrogador de sensor continuo 172 está en comunicación óptica con un interruptor óptico 174. De manera similar al interrogador 52 que se muestra en la figura 7A, el interrogador 172 incluye una fuente de luz 154 y un receptor de luz 156, y una unidad de procesador y de comunicaciones 158. Al igual que el interrogador 162 que se muestra en la figura 7B, el interrogador 172 está en comunicación con una interfaz de red 176, que a su vez, puede estar en comunicación con un transmisor inalámbrico 167 para transmitir datos a un procesador 168, tal como un ordenador portátil, y otros similares.

Se podrá apreciar que el termómetro gamma óptico de la invención no incluye porciones del mismo, que, con una mayor vida en servicio, ofrecen una eficacia decrecientes. Siendo este el caso, se entenderá que, con referencia a cualquier balance de calor, la expectativa es que la salida de los termómetros gamma ópticos 30 permanecerá sustancialmente sin cambios.

Como se ha descrito anteriormente, el termómetro gamma óptico de la invención puede proporcionar una medición de la temperatura como resultado del flujo gamma en un tubo de instrumentación en el núcleo usando un único cable de fibra óptica, en lugar de los diversos cables que se requieren con el termómetro gamma convencional que utiliza termopares para medir la temperatura. Como resultado, el termómetro gamma óptico de la invención ocupa mucho menos espacio en el interior del tubo de instrumentación en el núcleo y cuesta mucho menos que el termómetro gamma convencional. Además, es posible un mayor número de mediciones de temperatura en un único cable de fibra óptica, proporcionando un mapa de temperaturas en tres dimensiones mucho más preciso (flujo gamma) del núcleo del reactor.

Además, el termómetro gamma óptico se puede utilizar para calibrar las simulaciones por ordenador relacionadas con el agotamiento del combustible nuclear durante un ciclo de combustible para optimizar mejor los planes de reabastecimiento de combustible. Aún más, el empaquetado holgado del tubo del termómetro gamma óptico de la

invención con una rejilla de Bragg sobre fibra (FBG) ayuda a eliminar falsas lecturas producidas por los efectos de la tensión. Todavía más, un sistema que utiliza el termómetro gamma óptico de la invención puede sustituir el sistema TIP tradicional para reducir significativamente el costo.

- 5 Aunque la invención se ha descrito con referencia a una realización ejemplar, los expertos en la técnica podrán entender que se pueden hacer varios cambios que se encuentran en el ámbito de la invención. Por lo tanto, se pretende que la invención no esté limitada a la realización particular que se ha descrito como el mejor modo contemplado para llevar a cabo esta invención, sino que la invención incluirá todas las realizaciones que se encuentren en el alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un termómetro gamma óptico (30), que comprende:
 - un tubo exterior (76)
 - una masa de metal (34) dispuesta en el interior del tubo de tal manera que la masa de metal (34) está térmicamente aislada de un entorno ambiental, teniendo la masa de metal (34) una temperatura proporcional a un flujo gamma en el interior de un núcleo (15) de un reactor nuclear; **el termómetro gamma óptico está caracterizado por**
 - un cable de fibra óptica (32) dispuesto al menos parcialmente en el interior del tubo, teniendo el cable de fibra óptica un núcleo de fibra (38) que se extiende a lo largo de un eje largo (33) y un revestimiento (40) de la fibra que cubre circunferencialmente el núcleo de fibra para la medición de la temperatura de la masa de metal sin necesidad de utilizar un termopar, en el que el cable de fibra óptica (32) incluye, además, una rejilla de Bragg sobre fibra (42) que tiene un perfil de modulación del índice de refracción periódico a lo largo del eje largo.
2. El termómetro gamma óptico (30) de la reivindicación 1, que comprende, además, una pluralidad de rejillas de Bragg sobre fibra (42), en el que un espaciamiento entre cada rejilla de Bragg sobre fibra está comprendido entre 2 milímetros y 10 centímetros.
3. El termómetro gamma óptico de acuerdo con la reivindicación 2, que comprende, además, una capa de recubrimiento metalizado que tiene un grosor entre aproximadamente 10 micrómetros y aproximadamente 20 micrómetros.
4. El termómetro gamma óptico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la rejilla de Bragg sobre fibra (42) tiene una longitud a lo largo de un eje largo del cable de fibra óptica de aproximadamente 5 milímetros a aproximadamente 20 milímetros.
5. El termómetro gamma óptico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el núcleo de fibra (38) está hecho de dióxido de silicio puro y el revestimiento de la fibra está dopado con flúor para formar un único cable sensor de fibra revestido..
6. El termómetro gamma óptico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el núcleo de fibra (38) está codopado con F / GeO₂ y el revestimiento de la fibra está dopado con F para formar un único cable sensor de fibra revestida.
7. El termómetro gamma óptico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el revestimiento de la fibra (40) comprende una estructura de doble revestimiento que tiene una primera zona de revestimiento que está ligeramente dopada con F y una segunda zona de revestimiento que está fuertemente dopada con F.
8. El termómetro gamma óptico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la temperatura es medida mediante el uso de una de las técnicas de dispersión de Raman, de Brillouin y de Rayleigh.
9. El termómetro gamma óptico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el termómetro gamma óptico (30) incluye una segunda masa de metal (36) en contacto directo con un entorno ambiental para proporcionar una temperatura de referencia.
10. Un reactor nuclear que comprende un núcleo para contener una reacción en el interior de una vasija de reactor, y una pluralidad de tubos de guiado de instrumentos que se extienden hacia el núcleo en localizaciones separadas unas de las otras, permitiendo cada tubo de guiado de instrumentación la inserción y extracción de una cadena de monitorización de rango de potencia local, comprendiendo cada cadena una pluralidad de monitores de rango de potencia local para la medición de un flujo de neutrones térmicos en una localización predeterminada en el interior del núcleo y un termómetro gamma óptico adyacente a un monitor de rango de potencia local correspondiente, siendo de acuerdo cada termómetro gamma óptico con la reivindicación 1, en el que el termómetro gamma óptico es capaz de calibrar el monitor de rango de potencia local correspondiente durante la operación de potencia en estado estable del reactor.
11. El reactor de acuerdo con la reivindicación 10, en el que el termómetro gamma óptico incluye una segunda masa de metal en contacto íntimo con un entorno ambiental para proporcionar una temperatura de referencia.

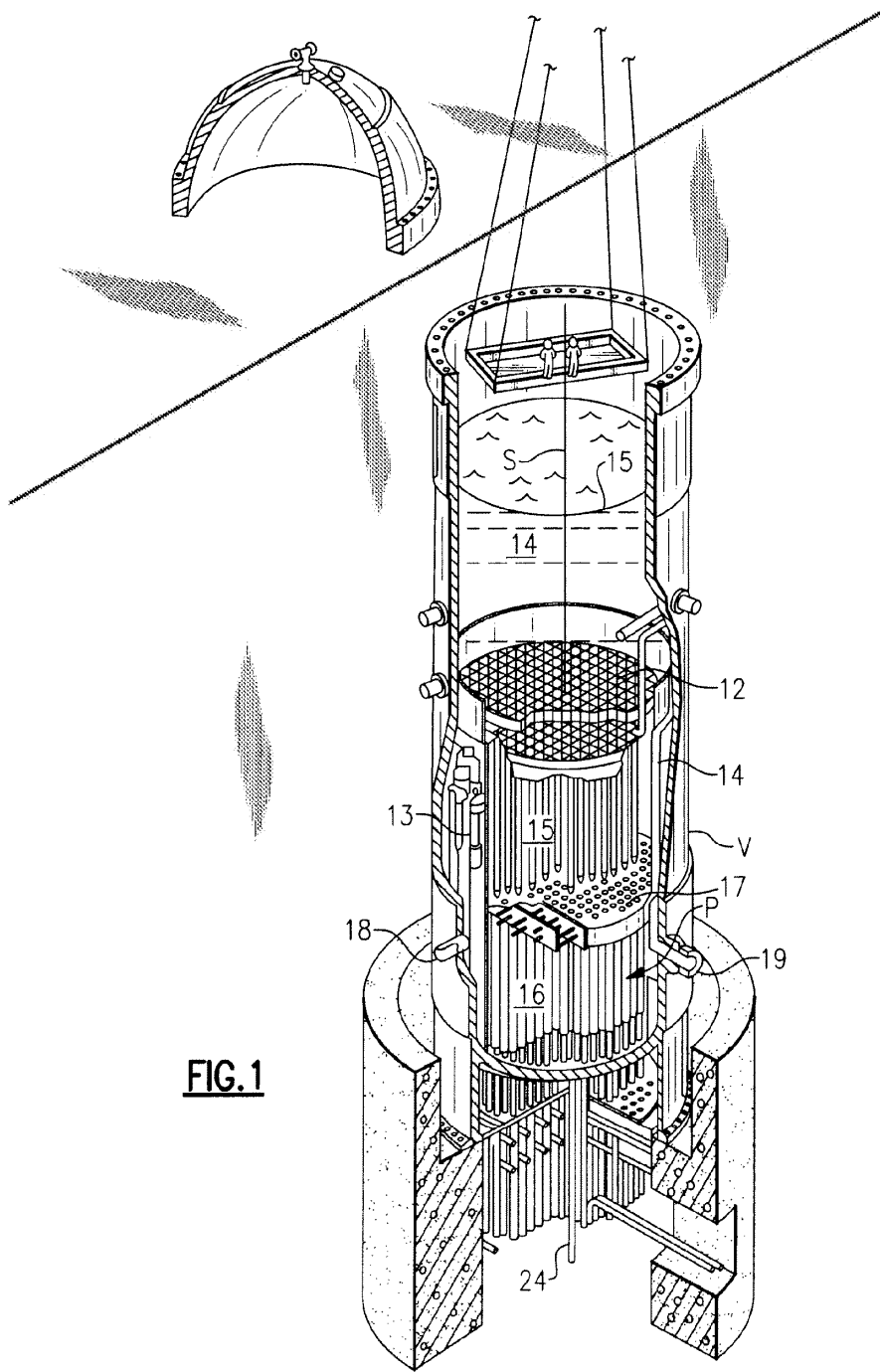


FIG. 1

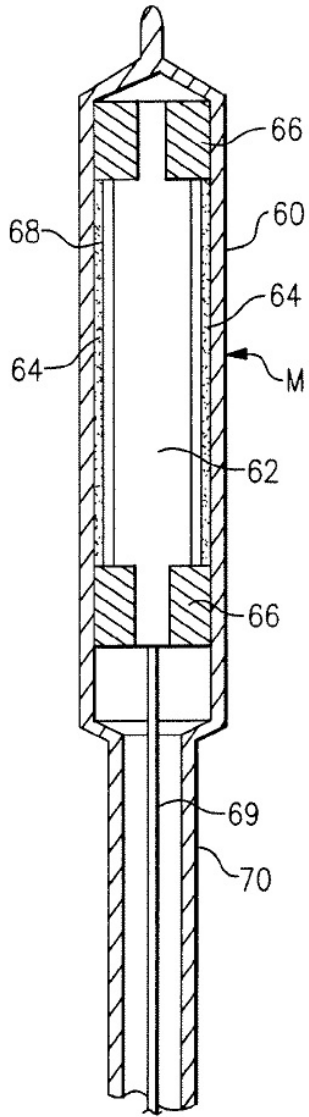


FIG. 2

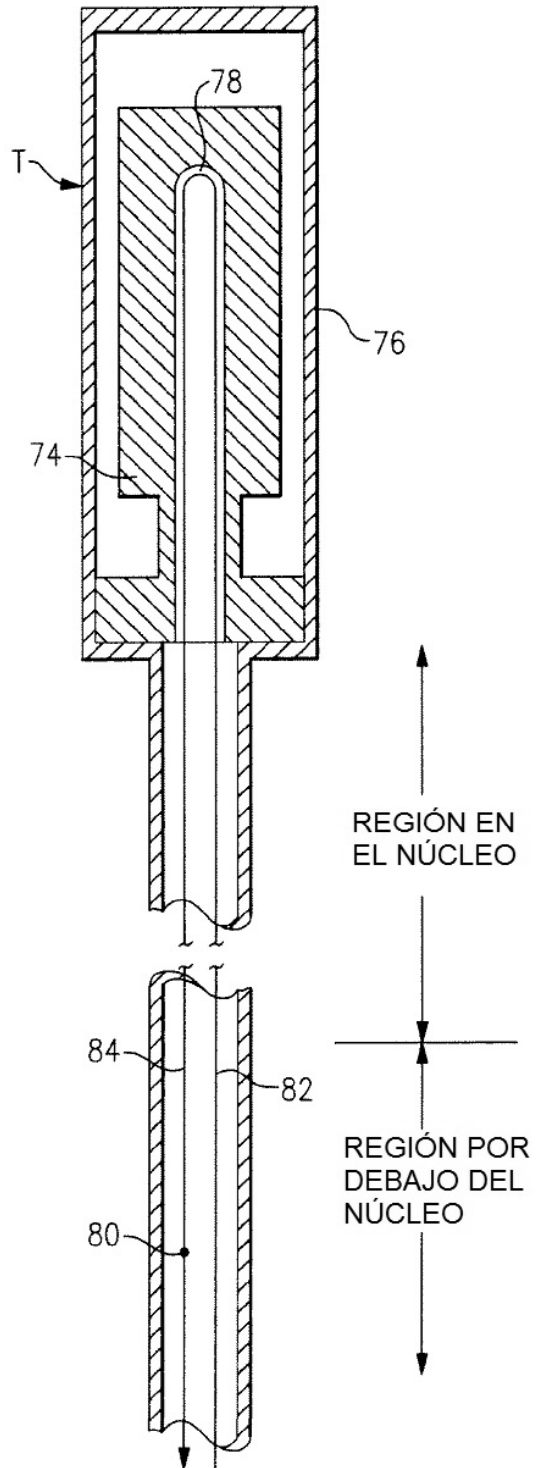
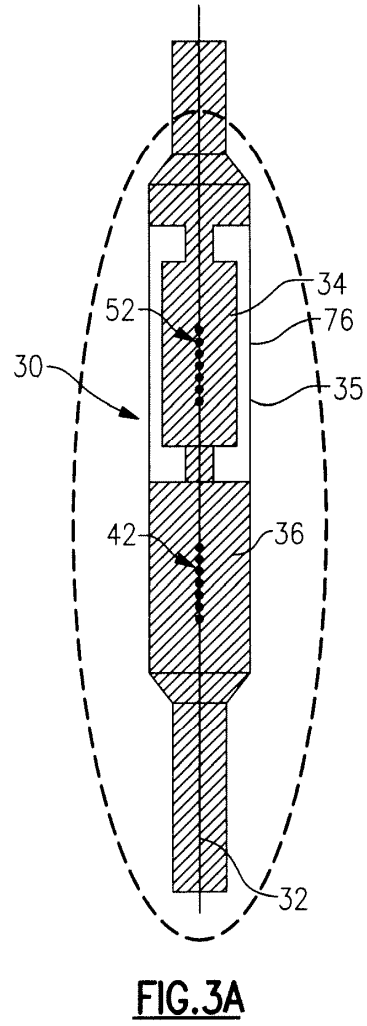
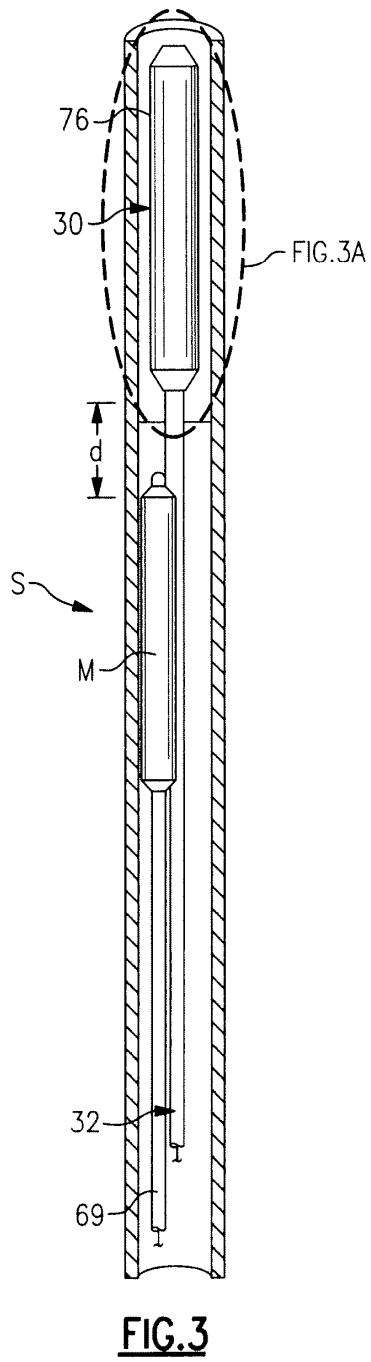


FIG. 8

TÉCNICA ANTERIOR



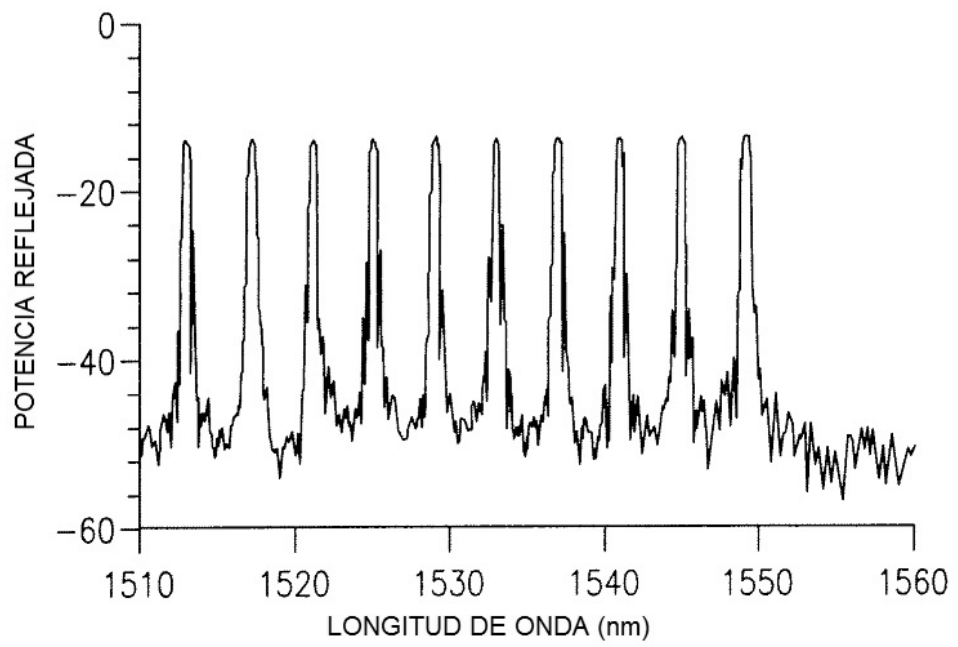
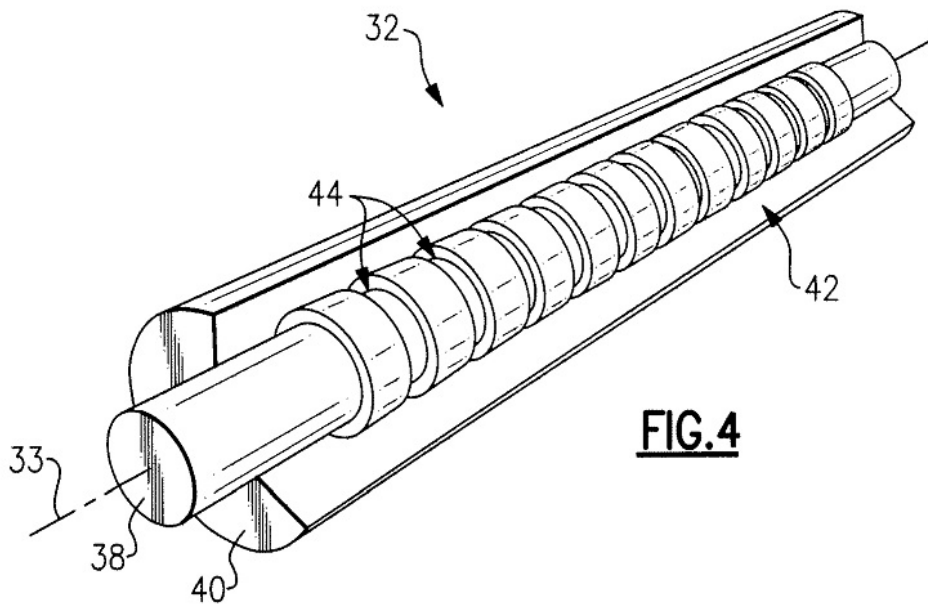


FIG.5

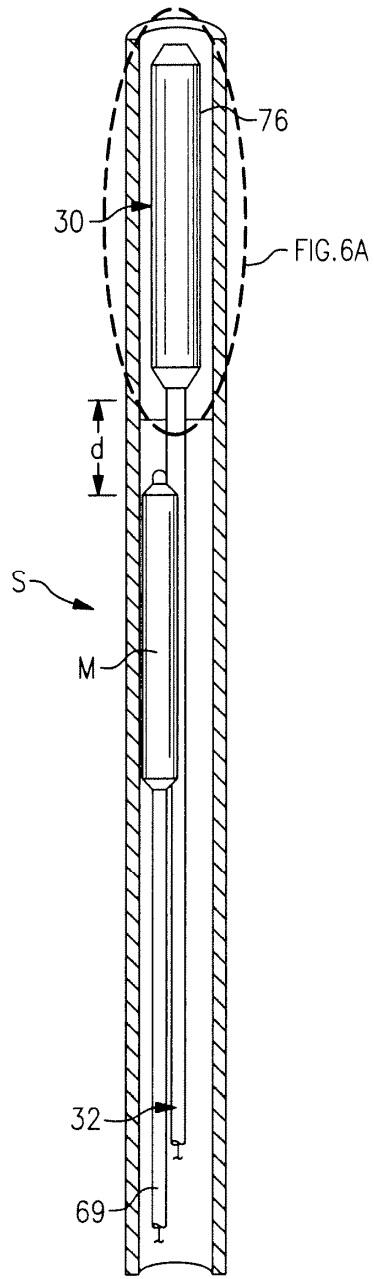


FIG. 6

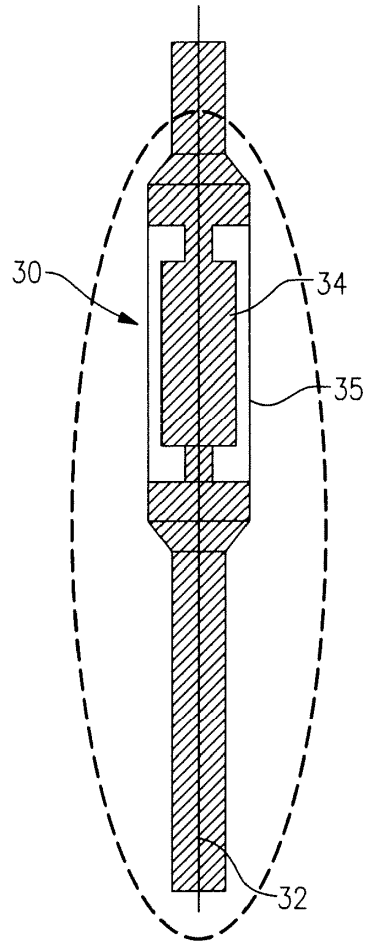


FIG. 6A

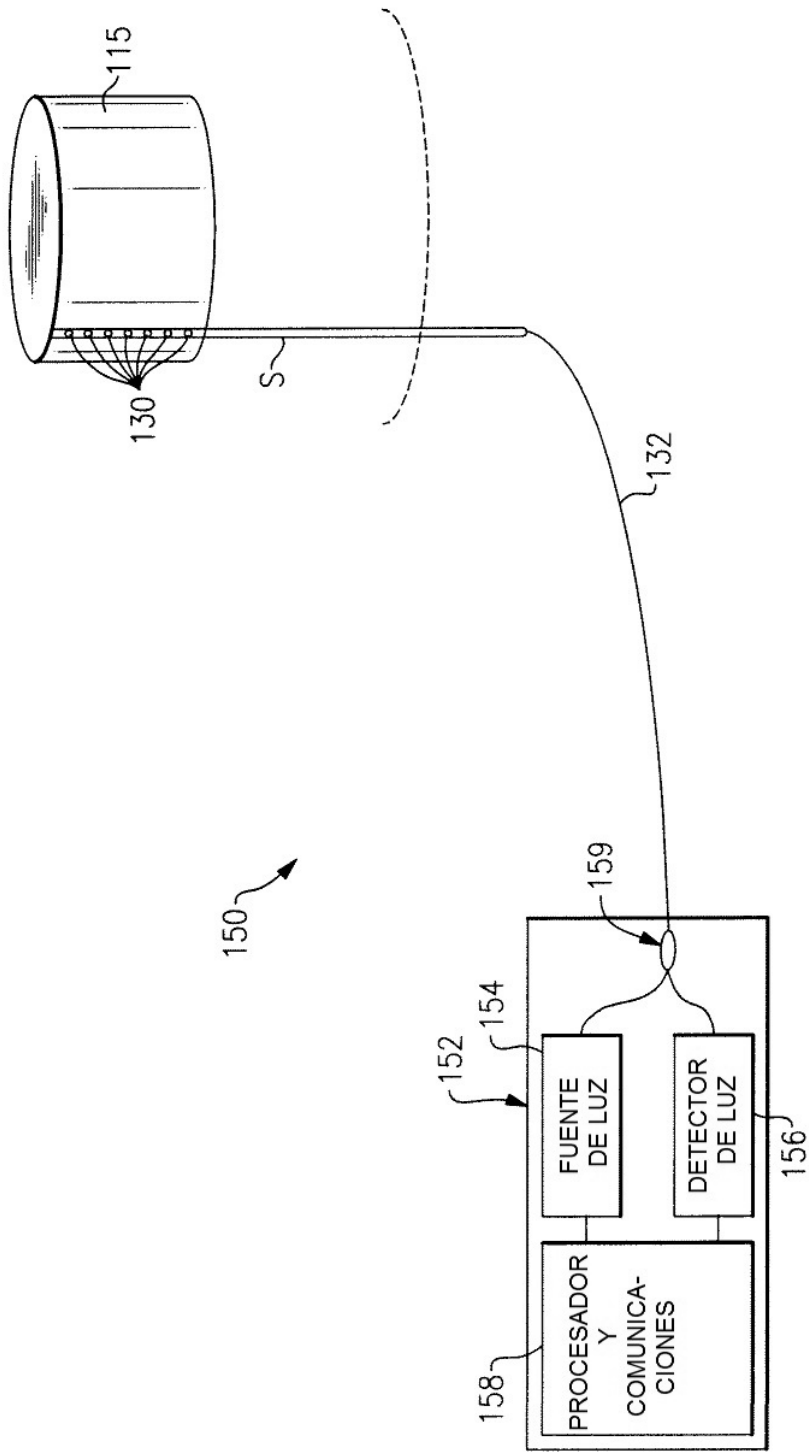


FIG. 7A

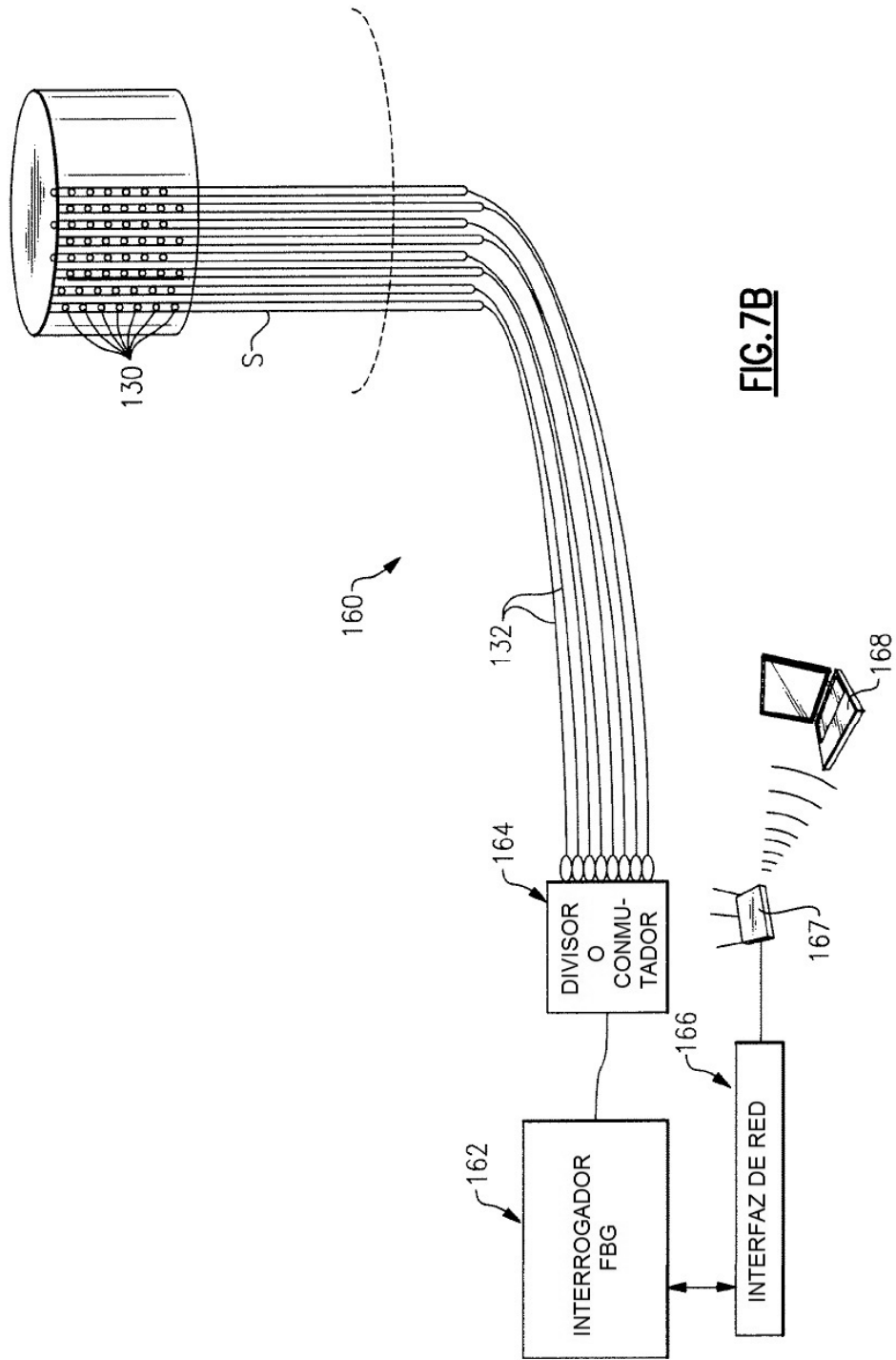


FIG. 7B

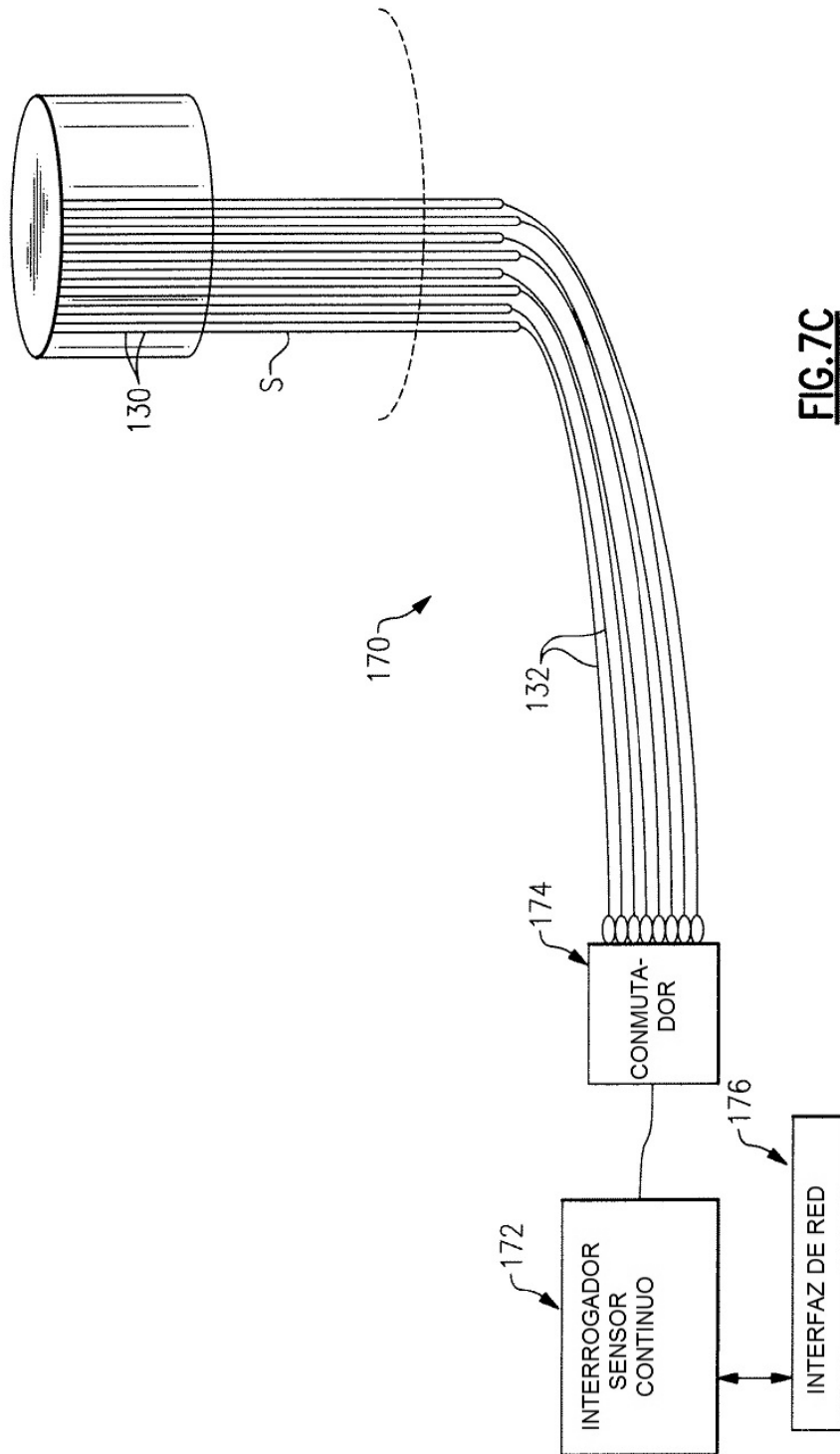


FIG. 7C