

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 728 853**

51 Int. Cl.:

**G01T 1/18** (2006.01)

**G01H 9/00** (2006.01)

**G01T 5/08** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.05.2013 PCT/GB2013/051207**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.11.2013 WO13171460**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.05.2013 E 13722025 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.04.2019 EP 2850456**

54 Título: **Detector de radiación**

30 Prioridad:

**14.05.2012 GB 201208418**

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

**29.10.2019**

73 Titular/es:

**OPTASENSE HOLDINGS LIMITED (100.0%)  
Cody Technology Park, Ively Road, Farnborough  
Hampshire GU14 0LX, GB**

72 Inventor/es:

**GODFREY, ALASTAIR**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

**ES 2 728 853 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

## Detector de radiación

Esta invención se refiere a métodos y un aparato para la detección de radiación ionizante utilizando fibras ópticas y especialmente a un detector de radiación de fibra óptica distribuida.

5 Existen varias aplicaciones en las que se desea detectar y/o supervisar las radiaciones ionizantes. Por ejemplo, en la industria de la energía nuclear puede ser conveniente supervisar los niveles de radiación en diversas ubicaciones dentro de una central eléctrica. En muchos casos es deseable que dicha supervisión se pueda realizar de forma remota y automática. Asimismo, los departamentos de radiología de los hospitales y otras organizaciones que utilizan fuentes radiactivas también pueden necesitar la instalación de detectores de radiación.

10 Los detectores de radiación que se emplean para proporcionar supervisión en una ubicación determinada suelen ser detectores de ionización gaseosa o detectores de estado sólido tales como los detectores de radiación de semiconductores.

15 Los detectores de ionización gaseosa, tales como el bien conocido tubo Geiger-Müller, normalmente comprenden dos electrodos estrechamente separados en una atmósfera gaseosa con una diferencia de potencial aplicada a los electrodos que está por debajo de la tensión de ruptura del gas. En presencia de radiación ionizante, algunos de los átomos o moléculas del gas se ionizarán y los electrones e iones resultantes permitirán que circule una corriente entre los electrodos. La circulación de una corriente se puede detectar y utilizar como una indicación de la presencia de radiación ionizante. La fuerza de la diferencia de potencial aplicada puede ser relativamente alta, de modo que puede conducir a la multiplicación de la avalancha en el gas, lo que conduce a un impulso de corriente relativamente grande para cada fenómeno de detección.

20 Los detectores de radiación de semiconductores funcionan midiendo la corriente resultante provocada por la radiación ionizante que crea pares electrón-hueco en el material del detector. Los detectores de semiconductores pueden proporcionar tiempos de respuesta rápidos, pero tienden a ser más caros que los detectores de ionización gaseosa y pueden requerir refrigeración para reducir la corriente de fuga.

25 Dichos detectores de radiación funcionan en una ubicación determinada para medir la radiación ionizante en esa ubicación. En muchas aplicaciones se deben ubicar múltiples detectores diferentes en varias ubicaciones para proporcionar suficiente cobertura, por ejemplo, para proporcionar suficiente cobertura de la zona y/o proporcionar supervisión en diferentes ubicaciones dentro de una instalación. Cada detector debe estar alimentado y, por lo general, debe ser capaz de comunicar sus lecturas a una ubicación remota, tal como uno o más centros de control. Por lo tanto, la instalación de dichos detectores de radiación puede resultar relativamente costosa y compleja.

30 El documento US 2008/237485 A1 describe un sistema y un método para detectar la radiación de una fuente en un recipiente. La descripción comprende una fibra óptica interrogada con luz, dispuesta en un recipiente. La radiación que incide en la fibra óptica provoca un cambio en la capacidad de transporte de luz de la fibra. Este cambio se puede detectar utilizando un detector de luz y por lo tanto se describe un medio para detectar la radiación.

35 El documento WO 2012/028845 A1 describe que los cables de fibra óptica se pueden utilizar para la detección acústica distribuida.

Las formas de realización de la presente invención proporcionan detectores de radiación que mitigan al menos algunos de estos problemas.

40 Por lo tanto, de acuerdo con la presente invención, se proporciona un detector de radiación ionizante según se define en la reivindicación 1 y que comprende: al menos una fibra óptica adecuada para la detección acústica/de vibraciones de fibra óptica distribuida caracterizada por comprender además un primer electrodo y un segundo electrodo separado del primer electrodo, con un gas entre los electrodos primero y segundo, en donde al menos una fibra óptica es adyacente al primer electrodo.

45 En funcionamiento se aplicará una diferencia de potencial entre los electrodos primero y segundo. El aparato puede por tanto comprender circuitería para aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos primero y segundo. La diferencia de potencial puede ser relativamente alta, pero por debajo de la tensión de ruptura del gas. En particular, la diferencia de potencial puede ser lo suficientemente elevada tal que la presencia de átomos/moléculas de gas ionizadas provoque la multiplicación de avalanchas. Por lo tanto, en presencia de radiación ionizante, algunos átomos/moléculas del gas se pueden ionizar conduciendo a una cascada de partículas cargadas entre los electrodos, por ejemplo, para crear una chispa.

50 La fibra óptica es adyacente a los electrodos y es adecuada para la detección acústica distribuida. La detección acústica distribuida (DAS) es un tipo conocido de detección en el que una fibra óptica se despliega como fibra de detección y se interroga con radiación óptica (que en la presente memoria se entenderá como luz visible y también radiación ultravioleta o infrarroja). La radiación que se retrodispersa desde dentro de la fibra óptica es detectada y analizada para revelar información sobre los estímulos acústicos que actúan sobre la fibra óptica en diferentes secciones longitudinales de la fibra de detección, es decir, canales. Normalmente la radiación óptica interrogante comprende uno o más impulsos de radiación óptica y analizando la radiación de retrodispersión en uno o más

intervalos de tiempo se pueden detectar las señales acústicas que inciden en una o más partes de detección distintas de la fibra óptica. Por lo tanto, el detector DAS actúa eficazmente como una matriz de detección lineal de partes de detección de fibra óptica que pueden ser (pero no tienen por qué ser) contiguas. La longitud de las partes de detección de la fibra viene determinada por las características de la radiación interrogante y el tratamiento aplicado a las señales de retrodispersión, pero normalmente se pueden utilizar partes de detección del orden de unos pocos metros a unas pocas decenas de metros aproximadamente. Obsérvese que, según se utiliza en la presente memoria, el término acústico significa cualquier tipo de onda de presión o perturbación mecánica que pueda dar lugar a un cambio de tensión en una fibra óptica y, para evitar dudas, el término acústico se debe entender que incluye las ondas ultrasónicas y subsónicas.

5 En las formas de realización de la presente invención la fibra óptica se puede supervisar utilizando técnicas de detección acústicas distribuidas conocidas. Según se mencionó anteriormente, en presencia de radiación ionizante el gas se puede ionizar y, debido a la diferencia de potencial aplicada entre los electrodos, se puede producir una cascada de partículas cargadas, es decir, una chispa. La cascada no sólo dará como resultado un flujo de partículas cargadas, sino que también producirá generalmente una onda de presión en el medio gaseoso, es decir, una onda acústica. En otras palabras, durante la utilización una chispa provocada por la presencia de radiación ionizante generalmente irá acompañada de un sonido agudo que puede ser relativamente intenso. El detector acústico distribuido puede detectar la onda acústica generada por la cascada y por lo tanto proporcionar una indicación de que se ha producido una descarga, indicando de este modo la presencia de radiación ionizante. El detector acústico distribuido puede, en efecto, 'escuchar' los sonidos asociados con una chispa o cascada de partículas cargadas. El número de fenómenos de detección a lo largo del tiempo dará una indicación del nivel de radiación ionizante en una ubicación determinada.

La cascada de partículas cargadas también generará una señal térmica que puede ser detectada adicional o alternativamente por un detector acústico distribuido. Es decir, la chispa provocará el calentamiento del gas y de los electrodos. Si el detector acústico distribuido se encuentra cerca, por ejemplo acoplado a uno de los electrodos, entonces al menos parte del calor generado por la cascada pasará a la fibra óptica, o al menos a las capas de revestimiento/encamisado. La chispa puede dar como resultado un cambio de temperatura relativamente grande en un período de tiempo relativamente corto. Esto conducirá a un cambio en la longitud de la trayectoria óptica resultante de la modulación del índice de refracción de la fibra óptica y, posiblemente, de cualquier expansión térmica del material de la fibra. Por lo tanto, el calentamiento relativamente rápido del material de la fibra óptica/camisa dará como resultado una tensión relativamente rápida como perturbación. Este cambio de longitud de la trayectoria inducido térmicamente está en una escala de tiempo que puede ser detectada por el detector acústico distribuido además de o en lugar de una onda de presión acústica. En algunos casos, la detección de la perturbación inducida térmicamente puede proporcionar una detección más fiable de los fenómenos de ionización.

Un experto en la técnica apreciará que los detectores acústicos distribuidos comparen las señales devueltas por una determinada parte detectora de la fibra en respuesta a sucesivas interrogaciones de la fibra, para determinar cualesquiera perturbaciones que actúen sobre la fibra. Dichos detectores pueden proporcionar una buena detección de vibraciones incidentes en frecuencias acústicas. Sin embargo, dichos detectores suelen ser menos capaces de detectar de forma fiable las tensiones de baja frecuencia y los cambios lentos de temperaturas y, de hecho, dichos efectos de baja frecuencia se pueden considerar como ruido. Sin embargo, el actual inventor ha apreciado que el efecto del calentamiento provocado por una cascada de partículas cargadas dará como resultado un calentamiento relativamente rápido seguido por un enfriamiento más lento el cual crea una marca fiable en las respuestas de los detectores acústicos distribuidos.

Un experto en la técnica también apreciará que la detección de temperatura distribuida basada en fibra óptica (DTS) es otra técnica conocida que se basa en la detección de la luz que ha sido sometida a la dispersión de Brillouin y/o Raman y en el análisis de la luz para determinar la temperatura. Cabe señalar que la mayoría de los sistemas DTS requieren promedios de tiempo relativamente largos para proporcionar mediciones precisas y que los sistemas DTS convencionales suelen carecer de la resolución temporal y también de la resolución de temperatura necesarias para detectar los impulsos térmicos producidos por la cascada de partículas cargadas.

Las formas de realización de la presente invención utilizan por lo tanto dos conductores separados para generar una cascada de partículas cargadas en presencia de radiación ionizante, pero utilizan un detector acústico de fibra óptica distribuida para detectar una perturbación asociada con la cascada, la cual puede ser debida a una onda de presión acústica o una perturbación térmica debido a la cascada o a ambas.

Por lo tanto, la fibra óptica se duplica de este modo como la fibra de detección como el medio de transportar los datos de detección desde la ubicación de detección hasta una estación de control adecuada.

55 En una forma de realización pueden existir varios pares de electrodos separados a intervalos a lo largo de la longitud de la fibra óptica, comprendiendo cada par de electrodos, los electrodos primero y segundo. Según se mencionó anteriormente en la DAS, la fibra óptica puede proporcionar varias partes de detección distintas. Por lo tanto, la fibra óptica podría ser interrogada tal que al menos algunos pares de electrodos se asocien con diferentes partes de detección de la fibra durante la utilización. Esto significa que los fenómenos de detección asociados con un par de electrodos en una ubicación se pueden discriminar de los fenómenos de detección asociados con otro par de

electrodos en una ubicación diferente. Por lo tanto, se puede utilizar la misma fibra óptica para supervisar por separado los fenómenos de detección de los pares de electrodos en dos ubicaciones diferentes.

En una forma de realización los electrodos primero y segundo pueden ser electrodos alargados que se extienden durante al menos parte de la longitud de la fibra óptica. Los electrodos primero y segundo pueden tener una longitud superior a 100 m o superior a 500 m o superior a 1 km. Esta forma de realización de la invención proporciona un detector de radiación ionizante distribuido.

En esta forma de realización los electrodos primero y segundo, durante la utilización, tendrán una diferencia potencial aplicada a ellos según se describió anteriormente y cualquier ubicación a lo largo de la longitud de los electrodos (donde haya un gas adecuado entre los electrodos) puede conducir a una cascada de partículas cargadas en presencia de radiación ionizante y por lo tanto crear un estímulo en la ubicación correspondiente. Según se mencionó anteriormente la fibra óptica se puede interrogar para proporcionar varias partes de detección diferentes y por lo tanto las perturbaciones asociadas con los fenómenos de ionización se pueden detectar en partes de detección individuales de la fibra óptica. Esto significa que una disposición de electrodos alargados y fibra óptica puede atravesar la zona y, de hecho, proporcionar varios detectores individuales de radiación ionizante. Esta forma de realización de la presente invención proporciona por lo tanto un método muy conveniente para detectar radiación ionizante en una variedad de ubicaciones. El detector de radiación distribuida de acuerdo con la presente forma de realización se puede instalar fácilmente y sólo requiere que se suministre una diferencia de potencial a los electrodos (lo que se puede hacer en un extremo alejado de la zona a supervisar) y que se interroge ópticamente al extremo de la fibra óptica, que a su vez puede estar alejado de la zona a supervisar. Por lo tanto, no hay necesidad de disposiciones complejas para suministrar energía a, o recibir datos de, los detectores de puntos múltiples.

La longitud de las partes de detección de la fibra óptica se puede determinar por las propiedades de la radiación óptica interrogante utilizada y el análisis posterior. Por ejemplo, se puede interrogar una fibra óptica para proporcionar varias partes de detección contiguas del orden de 10 m de longitud aproximadamente. Por lo tanto, cada sección de 10 m actúa como un detector independiente. Aunque las señales acústicas/térmicas generadas por cada chispa, es decir, el fenómeno de ionización, será detectable es improbable que el estímulo sea detectable en más que una parte de detección (dependiendo de la disposición) a menos que ocurra muy cerca del límite entre las partes de detección. Por lo tanto, cada parte de detección puede proporcionar un detector en gran medida independiente. Según se expondrá con más detalle a continuación, el tamaño espacial y la ubicación de las partes de detección dentro de la fibra óptica también pueden variar durante la utilización cambiando las propiedades de la radiación y/o el análisis interrogante. Esto proporciona un grado de flexibilidad en el funcionamiento del detector de radiación distribuido que no existe con los detectores de punto fijo.

Esta forma de realización requiere que la diferencia de potencial se aplique a electrodos de longitud relativamente larga, es decir, del orden de cientos de metros o incluso de kilómetros de longitud. Sin embargo, no se requiere un flujo de corriente significativo y, por lo tanto, las demandas de energía son relativamente bajas.

Se debe observar que en caso de que un fenómeno de ionización conduzca a una cascada de partículas cargadas, se generará una corriente dentro de los electrodos. Puede ser posible detectar un impulso de corriente de este tipo, pero para electrodos con las longitudes de cientos de metros o más, detectar con precisión el pequeño impulso de corriente puede ser difícil sin requerir la utilización de electrodos de baja resistencia (lo que, en consecuencia, supone un alto coste) y puede haber problemas significativos con la posible interferencia y la relación señal/ruido. Sin embargo, incluso si un impulso de corriente se pudiera detectar de forma fiable, se observa que la detección de un impulso de corriente sólo indicaría que ha habido al menos un fenómeno ionizante en algún punto a lo largo de la longitud de los electrodos. En el caso de electrodos con una longitud del orden de 500 m o más, esto puede dar información insuficiente sobre el lugar en el que se produjo el fenómeno ionizante. Tampoco sería posible discriminar entre dos fenómenos que ocurren en ubicaciones diferentes pero que generan impulsos de corriente simultáneos. Por lo tanto, el simple hecho de mirar la corriente resultante no proporcionaría información significativa sobre la ubicación de la radiación ionizante a lo largo de la longitud de los electrodos.

Con la forma de realización de la presente invención sin embargo la ubicación del fenómeno ionizante se puede determinar dentro de la resolución espacial de las partes de detección de fibra óptica y el fenómeno simultáneo en ubicaciones diferentes se detectará por separado.

En algunas formas de realización sin embargo se puede supervisar la corriente generada en los electrodos. Mediante la supervisión de la corriente eléctrica total que fluye por los electrodos y también de los fenómenos de ionización detectados por el detector de fibra óptica distribuida, puede ser posible determinar alguna información adicional sobre la radiación ionizante y/o proporcionar alguna calibración. Por ejemplo, considérese que, por primera vez, la única fuente de fenómenos de ionización es la radiación de fondo. Esto puede conducir a que se produzcan fenómenos de detección en ubicaciones aleatorias a lo largo de la longitud de la fibra y puede generar una corriente de un primer valor en el electrodo. Si en un momento posterior se detectan muchos más fenómenos de ionización en una ubicación determinada de la fibra, por ejemplo, a partir de unas pocas partes contiguas de detección de la fibra, esto puede indicar que una fuente de radiación está irradiando ese lugar. En este punto la corriente total en los electrodos puede haber aumentado a un segundo valor. Se puede suponer que este aumento de la corriente es el resultado del aumento de los fenómenos de ionización que actúan en la sección correspondiente de la fibra. El aumento de la corriente da, por tanto, otra indicación de la cantidad de fenómenos de ionización que se producen en

una ubicación determinada. Por lo tanto, la medición de la corriente total puede dar una indicación del número de fenómenos de ionización que ocurren a lo largo de la longitud de los electrodos, y cómo cambia con el tiempo y el detector de fibra óptica distribuida permiten localizar dónde están ocurriendo los fenómenos de ionización y otra medida del número de fenómenos.

5 En una forma de realización la fibra óptica se puede acoplar a al menos uno de los electrodos primero o segundo, es decir, acoplarse mecánicamente. Esto puede mejorar el acoplamiento del estímulo acústico producido por la cascada de partículas cargadas a la fibra óptica y/o el flujo de calor generado por la cascada desde el electrodo a la fibra óptica. Por lo tanto, por ejemplo, la fibra óptica, que se dispondrá normalmente en al menos una capa de revestimiento o encamisado, se puede unir, por ejemplo, al primer electrodo. Un electrodo que se acopla a la fibra  
10 óptica se dispone preferiblemente para extenderse a lo largo de la misma dirección general que la fibra óptica.

La fibra óptica puede tener un revestimiento o una capa de barrera para protegerla de la descarga eléctrica que se produce en presencia de radiación ionizante. La fibra óptica también se puede revestir con un material que proteja la fibra óptica de los daños debidos a la radiación ionizante.

15 El material entre la fibra óptica y el electrodo se puede seleccionar para tener las propiedades térmicas deseadas, por ejemplo, para proporcionar una buena transferencia de calor a la camisa de la fibra óptica, por ejemplo, una conductividad y/o difusión térmica relativamente alta y/o en algunos casos un coeficiente de expansión térmica relativamente alto (aunque es probable que la modulación del índice de refracción provocada por el calentamiento de la fibra tenga un efecto mayor que cualquier expansión térmica).

20 En una forma de realización el primer y/o segundo electrodo se puede disponer dentro de una estructura de cable con la fibra óptica. En otras palabras, una estructura de cable de fibra óptica puede incluir al menos uno de los electrodos primero y segundo y puede incluir ambos. Cuando el cable incluye tanto el primer como el segundo electrodo, los electrodos se pueden separar, al menos en algunas secciones, mediante un material poroso para permitir la entrada de gas entre los electrodos y/o puede haber al menos un vacío entre los electrodos que se puede llenar de gas. En otras palabras, el cable se puede diseñar de tal manera que el gas se pueda infiltrar o estar  
25 contenido entre los electrodos primero y segundo. En una forma de realización los electrodos primero y segundo pueden correr a través de una serie de cavidades que, durante la utilización, contienen gas. Las cavidades se pueden disponer de manera que tengan un tamaño que conduzca a una frecuencia de resonancia particular. En el caso de una onda de presión provocada por una chispa, la cavidad puede resonar a la frecuencia de resonancia. Detectar la frecuencia de resonancia puede ayudar a detectar un fenómeno de ionización.

30 Al menos uno de los electrodos primero y segundo puede comprender un cable conductor. Sin embargo, en una forma de realización al menos un electrodo puede comprender un conductor con una sección transversal arqueada. Por ejemplo, el primer electrodo se puede disponer con una sección transversal arqueada y se puede disponer para rodear al menos parcialmente el segundo electrodo. El primer electrodo se puede formar como un tubo. En una forma de realización el segundo electrodo también puede tener una sección transversal arqueada y se puede  
35 disponer para rodear al menos parcialmente la fibra óptica. El segundo electrodo puede comprender un tubo.

El gas que separa los electrodos primero y segundo puede ser de forma oportuna aire. Por lo tanto, los electrodos primero y segundo se pueden separar dejando un espacio de aire que puede estar abierto al ambiente para permitir la entrada de aire entre los electrodos durante la utilización. Adicional o alternativamente los electrodos primero y segundo se pueden separar, al menos en su lugar, mediante un material aislante que sea poroso al aire pero que  
40 permita la cascada de partículas cargadas durante la utilización.

Sin embargo, en algunas formas de realización, especialmente donde los electrodos primero y segundo forman parte de una estructura de cable los electrodos se pueden disponer dentro de un entorno sellado. En dichas formas de realización el gas que estuvo encapsulado durante la fabricación de la estructura de cable puede ser aire, pero en otras formas de realización si se prefirió se pudo utilizar un gas diferente, por ejemplo, un gas que se ionice más  
45 fácilmente que el aire y/o produzca una señal acústica más grande cuándo ocurra una descarga inducida por ionización. Sin embargo, en un entorno sellado, el gas ya sea aire o algún otro gas, se puede presurizar. Sin embargo, en un entorno sellado, la radiación ionizante tendrá que pasar por la capa de barrera para llegar al gas y hacer que se detecte la ionización. El material utilizado en la estructura para sellar el gas del entorno se puede elegir de forma que tenga un efecto mínimo sobre la radiación ionizante, es decir, que permita que una cantidad significativa de radiación ionizante pase al gas contenido. Sin embargo, dependiendo del tipo de radiación que se  
50 vaya a detectar, por ejemplo, radiación alfa, radiación beta o radiación gamma, el material se puede ajustar para proporcionar un cierto grado de filtrado o modulación para que la radiación ionizante llegue al gas.

Por lo tanto, en general puede haber al menos una capa de barrera entre el gas que separa los electrodos primero y segundo y una dirección de incidencia de la radiación ionizante. La capa de barrera puede tener propiedades  
55 ajustadas para filtrar determinados tipos de radiación ionizante. Por ejemplo, la capa de barrera puede ser lo suficientemente gruesa como para absorber las partículas alfa o bloquear la radiación de baja energía.

La barrera puede variar a lo largo de la longitud de los electrodos y de la fibra óptica. En una primera sección puede no haber una capa de barrera significativa, mientras que en una segunda sección puede haber una capa de barrera que impida que las partículas alfa, por ejemplo, lleguen al gas que separa los electrodos. Si las secciones primera y  
60 segunda se encuentran en diferentes partes de detección de la fibra óptica, los fenómenos acústicos/térmicos

detectados en la primera sección pueden indicar la cantidad total de radiación ionizante, mientras que las respuestas de la señal de la segunda sección representarían sólo fenómenos de ionización procedentes de la radiación de partículas no alfa lo suficientemente enérgicas como para atravesar la capa barrera.

5 Según se mencionó anteriormente en algunas formas de realización los electrodos primero y segundo pueden pasar a través de varias cavidades. En una forma de realización al menos algunas cavidades se ajustan para tener una frecuencia de resonancia diferente entre sí. Al menos algunas cavidades de diferente frecuencia de resonancia pueden tener diferentes materiales de barrera. De esta manera se pueden disponer varias cavidades dentro de una sola parte de detección del detector DAS, teniendo cada cavidad un material filtrante diferente. Detectar una señal acústica debida a una descarga en cascada indica un fenómeno de ionización y detectar una frecuencia de resonancia asociada puede indicar la cavidad particular dentro de la cual ocurrió el fenómeno. Esto puede posiblemente dar cierta información sobre las características de la radiación ionizante.

10 Las formas de realización descritas anteriormente detectarán radiación ionizante que ioniza directamente el gas correspondiente. Sin embargo, en algunas formas de realización, el aparato detector se puede disponer además o alternativamente para detectar radiación a través de ionización secundaria. Por lo tanto, el detector puede comprender un material que responde a la radiación incidente emitiendo radiación ionizante. Por ejemplo, para detectar neutrones, que pueden no provocar ionización direccional del gas, el aparato puede comprender un material absorbente de neutrones que emita radiación ionizante en respuesta a la absorción de neutrones. De esta manera, cualesquiera neutrones incidentes se pueden absorber por el material absorbente de neutrones, es decir, un material con una sección transversal de alta absorción de neutrones, lo que da como resultado una emisión secundaria de radiación ionizante procedente del material absorbente de neutrones. Esta radiación ionizante secundaria puede provocar una ionización directa del gas y, por lo tanto, conducir a que una chispa se pueda detectar según se describió anteriormente. Un material absorbente de neutrones adecuado puede ser el boro-10, pero se conocen otros.

15 Para aislar los fenómenos debidos a los neutrones de la radiación que causa ionización directa, el aparato puede incluir, al menos en parte del detector, una capa de blindaje que, en esencia, bloquee o atenúe, en esencia, otras formas de radiación ionizante. En algunas formas de realización el material absorbente de neutrones puede comprender al menos parte de la capa de blindaje.

20 Una vez más, el aparato se podrá disponer con una o más secciones que respondan a neutrones, por ejemplo, con una capa de blindaje y un material absorbente de neutrones y una o más secciones que respondan a radiaciones ionizantes directas, es decir, sin la capa de blindaje y el material absorbente de neutrones, con cada sección correspondiendo a diferentes partes detectoras del detector DAS para permitir que el mismo aparato se utilice para detectar neutrones y radiación ionizante directa.

25 Las formas de realización de la presente invención proporcionan un detector de radiación que comprende el aparato descrito anteriormente, una unidad interrogante acoplada a la fibra óptica para realizar la detección acústica distribuida en la fibra óptica y la circuitería para aplicar la diferencia potencial a los electrodos primero y segundo.

30 Sin embargo, de lo anterior se deduce claramente que, si bien se pueden utilizar las técnicas de detección acústica distribuida (en términos de interrogación de la fibra óptica con impulsos de radiación óptica, detección de la radiación retrodispersada y análisis de dicha radiación para detectar cambios debidos a cualesquiera cambios en la longitud de la trayectoria), la detección puede buscar marcas características debidas a los fenómenos térmicos asociados a la cascada de partículas de carga, ya sea además o en lugar de detectar las ondas de presión acústica. Por lo tanto, para evitar dudas, el término detector acústico distribuido, según se utiliza en la presente memoria, se refiere a un detector de fibra óptica distribuida adecuado para la detección acústica distribuida, es decir, uno que responda a cambios relativamente rápidos en la longitud de la trayectoria de la fibra de detección (independientemente de cómo se haya generado).

35 La unidad interrogante se configura para lanzar la radiación óptica interrogante dentro de la fibra óptica y para detectar la radiación óptica retrodispersada desde dentro de la fibra. La unidad interrogante también se puede configurar para procesar la radiación retrodispersada detectada para producir una señal de medición para cada una de las varias partes de detección de la fibra óptica, indicando la señal de medición las señales detectadas por dicha parte de detección.

40 El aparato también puede comprender un procesador para el tratamiento de dichas señales de medición con el fin de detectar las señales asociadas a los fenómenos de ionización. Por ejemplo, el procesador puede analizar las señales para detectar señales características de chispas o descargas en cascada, es decir, señales acústicas relativamente intensas y de corta duración, posiblemente con una frecuencia característica o una dispersión de frecuencia y/o un pico rápido debido al rápido calentamiento seguido de una rampa descendente debida a la refrigeración.

45 Durante la utilización la circuitería para aplicar la diferencia potencial a los electrodos primero y segundo se puede disponer para modular la diferencia potencial aplicada a lo largo del tiempo.

La diferencia de potencial se puede desactivar periódicamente o se puede reducir a un nivel bajo que sea insuficiente para provocar una cascada de partículas cargadas en respuesta a un fenómeno de ionización. Se

apreciará que el detector DAS responderá no sólo a las perturbaciones generadas por los fenómenos de ionización, sino también a otras señales acústicas incidentes. La marca característica de las señales producidas por fenómenos de ionización, es decir, señales acústicas relativamente intensas y de corta duración y/o con un pico en la señal detectada debido al rápido calentamiento seguido de una rampa más lenta de vuelta a la línea de base debido al enfriamiento, posiblemente con una frecuencia característica o una dispersión de la frecuencia, puede en algunas formas de realización ser bastante distinta de cualquier señal acústica de fondo. En este caso, las señales debidas a fenómenos de ionización se pueden identificar y discriminar fácilmente de cualesquiera señales de ruido de fondo incidente en la fibra óptica del detector DAS. Sin embargo, al menos en algunas formas de realización puede ser conveniente determinar el ruido de fondo que actúa sobre la fibra para mejorar la detección de señales debidas a fenómenos de ionización. Al reducir periódicamente la diferencia de potencial entre los electrodos primero y segundo con el fin de detener, en esencia, cualquier estímulo en respuesta a la radiación ionizante, el ruido de fondo se puede determinar directamente y utilizar en la identificación posterior de señales acústicas debidas a fenómenos de ionización.

Adicional o alternativamente, la diferencia de potencial entre los electrodos primero y segundo se puede modular a lo largo del tiempo para determinar de este modo la información espectroscópica sobre cualquier radiación ionizante presente. Al variar la diferencia de potencial entre los electrodos, también se varía la cantidad de ionización necesaria antes de que se produzca una descarga en cascada. Por ejemplo, una partícula de energía relativamente baja puede ionizar sólo unas pocas moléculas/átomos de gas cuando pasa a través del gas. Con una alta diferencia de potencial aplicada, esto puede conducir a una cascada de partículas cargadas, ya que los pocos iones/electrones son acelerados para provocar la multiplicación de la avalancha. Con una diferencia de potencial aplicada menor, una partícula de baja energía puede no producir suficientes partículas ionizadas para crear una cascada. Por lo tanto, variando la diferencia de potencial y supervisando el número de señales detectadas debido a las descargas en cascada, se puede determinar la información sobre el contenido energético de la radiación.

La invención también se refiere a un método para detectar radiación ionizante de acuerdo con la reivindicación 15. Por lo tanto, en otro aspecto de la presente invención se proporciona un método para la detección de radiación ionizante que comprende: aplicar una diferencia potencial entre electrodos primero y segundo separados entre sí en un gas, en donde la diferencia potencial sea suficiente de tal manera que la ionización del gas provoque una cascada de partículas cargadas entre los electrodos e, interrogar una fibra óptica desplegada adyacente, por ejemplo, a los electrodos primero y/o segundo para proporcionar un detector acústico distribuido; y supervisar dicho detector acústico distribuido en busca de señales asociadas con una cascada de partículas cargadas. El método de este aspecto de la invención proporciona la totalidad de los mismos beneficios y ventajas que el primer aspecto de la invención y se puede poner en funcionamiento en la totalidad de las mismas formas de realización.

En general las formas de realización de la presente invención proporcionan un detector de radiación distribuido que comprende electrodos primero y segundo alargados separados entre sí y un detector acústico distribuido que comprende una fibra óptica de detección desplegada a lo largo de la trayectoria de dichos electrodos primero y segundo alargados.

La invención se describirá ahora a modo de ejemplo únicamente con respecto a los siguientes dibujos, de los cuales:

La Figura 1 ilustra un detector acústico distribuido convencional;

La Figura 2 ilustra una forma de realización de un detector de radiación de acuerdo con la presente invención;

La Figura 3 ilustra un detector de radiación que tiene varios pares de electrodos;

La Figura 4 ilustra una forma de realización de un detector de radiación distribuido de acuerdo con la presente invención;

La Figura 5 muestra una primera estructura de cable de acuerdo con una forma de realización de la invención;

La Figura 6 muestra una segunda estructura de cable de acuerdo con una forma de realización de la invención;

La Figura 7 ilustra una forma de realización adecuada para la detección de neutrones;

La Figura 8 ilustra una grabación de espectrograma que utiliza un detector de radiación de acuerdo con una forma de realización de la presente invención; y

Las Figuras 9a y 9b ilustran dos series temporales de descargas de chispas registradas.

La presente invención aplica técnicas de detección acústica distribuida para la detección/supervisión de radiación ionizante.

La Figura 1 muestra un esquema de una disposición de detección de fibra óptica distribuida convencional. Una longitud de fibra de detección 104 se conecta de forma extraíble en un extremo a un interrogador 106. La salida del interrogador 106 se transmite a un procesador de señales 108, que se puede situar junto con el interrogador o estar separado del mismo, y opcionalmente a una pantalla de interfaz de usuario/gráfica 110, que en la práctica se puede

obtener mediante un PC debidamente especificado. La interfaz de usuario se puede situar junto con el procesador de señales o puede estar separada del mismo.

La fibra de detección 104 puede tener muchos kilómetros de longitud y puede tener, por ejemplo, 40 km o más de longitud. La fibra de detección puede ser una fibra óptica monomodo estándar, no modificada, tal como la que se utiliza habitualmente en las aplicaciones de telecomunicaciones, sin necesidad de introducir deliberadamente sitios de reflexión, tales como una rejilla de Bragg en fibra o similares. La capacidad de utilizar una longitud no modificada de fibra óptica estándar para proporcionar detección significa que se puede utilizar fibra de bajo coste fácilmente disponible. Sin embargo, en algunas formas de realización la fibra puede comprender una fibra que haya sido fabricada para ser especialmente sensible a las vibraciones incidentes. Durante la utilización, la fibra 104 se despliega en una zona de interés a ser supervisada.

En funcionamiento, el interrogador 106 lanza a la fibra de detección radiación electromagnética interrogante, que puede comprender, por ejemplo, una serie de impulsos ópticos que tengan un patrón de frecuencia seleccionado. Los impulsos ópticos pueden tener un patrón de frecuencia según se describe en la publicación de patente GB GB2.442.745 aunque también se conocen y se pueden utilizar detectores DAS que se basan en un solo impulso interrogante. Obsérvese que, según se utiliza en la presente memoria, el término "óptico" no se limita al espectro visible y que la radiación óptica incluye la radiación infrarroja y la radiación ultravioleta. Según se describe en el documento GB2.442.745, el fenómeno de retrodispersión de Rayleigh da como resultado que parte de la luz que entra en la fibra se refleje en el interrogador, donde es detectada para proporcionar una señal de salida que sea representativa de las perturbaciones acústicas/mecánicas en las proximidades de la fibra. El interrogador por tanto comprende convenientemente al menos un láser 112 y al menos un modulador óptico 114 para producir varios impulsos ópticos separados por una diferencia de frecuencia óptica conocida. El interrogador también comprende al menos un fotodetector 116 dispuesto para detectar la radiación que es retrodispersada Rayleigh desde los sitios de dispersión intrínseca dentro de la fibra 104. Un detector DAS de retrodispersión de Rayleigh es muy útil en las formas de realización de la presente invención, pero también se conocen los sistemas basados en la dispersión de Brillouin o de Raman y se podrían utilizar en las formas de realización de la invención.

La señal del fotodetector se procesa mediante el procesador de señal 108. El procesador de señal demodula convenientemente la señal devuelta basándose en la diferencia de frecuencia entre los impulsos ópticos, por ejemplo, según se describe en el documento GB2.442.745. El procesador de señal también puede aplicar un algoritmo de desenrollado de fase según se describe el documento GB2.442.745. La fase de la luz retrodispersada desde varias secciones de la fibra óptica puede por lo tanto ser supervisada. Por lo tanto, se pueden detectar cualesquiera cambios en la longitud efectiva de la trayectoria óptica dentro de una sección de la fibra dada, tal como serían debido a ondas de presión incidentes que provocan tensión en la fibra o un rápido calentamiento local del cable de fibra óptica que provoca una modulación del índice de refracción.

La forma de la entrada óptica y el método de detección permiten que una sola fibra continua se disponga espacialmente en partes de detección longitudinal discontinua. Es decir, la señal acústica detectada en una parte de detección se puede proporcionar, en esencia, de forma independiente de la señal detectada en una parte adyacente. Un detector de este tipo se puede considerar un detector totalmente distribuido o intrínseco, ya que utiliza la dispersión intrínseca procesada inherente a una fibra óptica y, por lo tanto, distribuye la función de detección a lo largo de la totalidad de la fibra óptica. La resolución espacial de las partes de detección de la fibra óptica puede ser, por ejemplo, aproximadamente de 10 m que, para una longitud continua de fibra del orden de 40 km proporciona, por ejemplo, 4000 canales acústicos independientes aproximadamente desplegados a lo largo de los 40 km de fibra.

La DAS se ha empleado en muchos entornos, por ejemplo, para la supervisión perimetral. Las formas de realización de la presente invención utilizan la DAS para habilitar un detector de radiación.

El principio del detector de radiación se ilustrará con respecto a la Figura 2. La Figura 2 muestra una vista en sección a la izquierda y una vista lateral a la derecha de un detector de radiación de acuerdo a una forma de realización de la invención. La Figura 2 muestra una fibra óptica 104, que es una fibra óptica de detección tal como la descrita anteriormente en relación con la Figura 1, adyacente a un primer electrodo 201. El primer electrodo está separado por un espacio de aire  $d$  de un segundo electrodo 202. Los electrodos 201 y 202 pueden ser cualesquiera electrodos conductores adecuados, por ejemplo, cables conductores o similares. Los electrodos se mantienen separados por la distancia deseada  $d$  mediante una estructura de soporte, tal como los separadores aislantes 203 y el espacio entre los electrodos durante la utilización se llena con un gas. En algunas formas de realización el espacio entre los electrodos puede estar abierto al entorno local y durante la utilización por lo tanto el vacío se puede llenar con aire.

Durante la utilización, una diferencia de potencial,  $V$ , se aplica a los electrodos 201 y 202 mediante la circuitería adecuada (no mostrada en la Figura 2). La diferencia de potencial aplicada es relativamente alta, pero por debajo de la tensión de ruptura del gas correspondiente, en este caso aire. La diferencia de potencial aplicada puede ser, por ejemplo, del orden de 3kV/m (en función de la separación  $d$  de los electrodos). En ausencia de radiación ionizante, la tensión aplicada es, por tanto, insuficiente para provocar la ruptura del gas.

Sin embargo, en presencia de radiación ionizante, la radiación ionizante puede dar como resultado un fenómeno de ionización 204, en el que se ionizan uno o más átomos o moléculas del gas. Los electrones e iones resultantes serán acelerados por la diferencia de potencial relativamente alta y pueden provocar la multiplicación de avalanchas. Por lo

tanto, una cascada de partículas de carga puede fluir hacia los electrodos (dependiendo de la polaridad relativa). En efecto, la radiación ionizante ioniza suficientes átomos/moléculas de gas para dar como resultado una descarga en cascada, por ejemplo, una chispa. Esto dará como resultado un flujo momentáneo de corriente pero también creará una onda acústica en el gas. Este estímulo acústico entrará en contacto con la fibra óptica y puede ser detectado como un estímulo acústico, según se describió anteriormente.

La cascada de partículas cargadas, es decir, la chispa, provocará el calentamiento del electrodo 201 en las proximidades de la chispa. Al menos parte de este calor puede fluir hacia la fibra óptica 104 y dar como resultado un cambio relativamente rápido en la longitud de la trayectoria, por ejemplo, a partir de la modulación del índice de refracción de la fibra óptica. Esto puede dar como resultado un cambio detectable en la señal de medición de la fibra óptica de forma similar a como si se hubiese aplicado una tensión repentina. El calentamiento será relativamente rápido, por ejemplo, del orden de los 10 ms aproximadamente. La fibra se enfriará a continuación durante un período de, por ejemplo, medio segundo aproximadamente. Este efecto puede producir una marca característica en la señal de medición del detector DAS con un cambio rápido seguido de una rampa lenta de vuelta al nivel anterior que también se puede detectar. Por lo tanto, además de, o en lugar de, detectar una señal de intensidad repentina en respuesta a una onda de presión acústica, se puede detectar la señal debida al calentamiento rápido provocado por la chispa.

Por lo tanto, las formas de realización de la presente invención utilizan el detector DAS para supervisar eficazmente en busca de chispas que den como resultado fenómenos de descarga de gas en presencia de radiación ionizante. El número de dichos fenómenos detectados en cada parte de detección a lo largo del tiempo se puede utilizar para dar una indicación de la cantidad de radiación ionizante en cada parte de detección de la fibra óptica.

Para maximizar la señal acústica detectada por la fibra óptica 104, la fibra óptica se puede acoplar al menos a un electrodo. Según se muestra en la Figura 2 la fibra óptica se acopla al electrodo 201 y está separada del electrodo 202, aunque en otra forma de realización el segundo electrodo se podría colocar 205 con el fin de acoplarse a la fibra óptica. Acoplar la fibra a uno de los electrodos también maximizará la transferencia de calor del electrodo a la fibra debido a la chispa y, por lo tanto, maximiza la marca térmica.

Para proteger la fibra óptica de la chispa, la fibra óptica se puede disponer en un revestimiento 206 (que puede formar parte del material normal de encamisado de una fibra óptica o de una capa protectora adicional). El revestimiento 206 se puede elegir para proteger la fibra, pero también para proporcionar las propiedades térmicas deseadas, tales como una alta difusión o conductividad térmica.

La fibra óptica se puede desplegar junto a varios pares de electrodos primero y segundo, según se muestra en la Figura 3, que ilustra la fibra óptica que pasa más allá de un primer par de electrodos 201a y 202a y un segundo par de electrodos 201b y 202b. El detector DAS se puede disponer de modo que al menos algunos de los pares de electrodos se encuentren en partes de detección diferentes. Por lo tanto, el par de electrodos 201a y 202a se encuentran en una primera parte de detección 104a y el par de electrodos 201b y 202b se encuentran en una segunda parte de detección 104b.

Sin embargo, en algunas formas de realización los electrodos 201 y 202 pueden ser electrodos alargados en longitud del orden de cientos de metros o más. La Figura 4 muestra una forma de realización en la que la fibra óptica 104 tiene un primer electrodo 201 y un segundo electrodo 202 a lo largo de una parte significativa de su longitud. La fibra de detección puede ser interrogada para proporcionar varias partes de detección según se describió anteriormente. Cada parte de detección detectará fenómenos acústicos resultantes de una descarga en cascada dentro de esa parte de detección. De esta manera, la ubicación de los diversos fenómenos de ionización se puede detectar dentro de la resolución espacial de las partes de detección de la fibra óptica. Según se mencionó anteriormente, la DAS se puede emplear en fibras ópticas del orden de hasta 40 km o más de longitud con partes de detección espacial del orden de 10 m o aproximadamente de longitud, proporcionando 4000 canales de detección.

Para proporcionar detección de radiación en una serie de ubicaciones, por ejemplo, dentro de una instalación, se puede colocar una fibra óptica con electrodos alargados, tales como cables conductores (por ejemplo, cable de cobre normal o similar) en un patrón deseado a través del edificio. La fibra óptica y los electrodos se pueden disponer para rodear las ubicaciones clave. En las zonas en las que se requiera sensibilidad aumentada, la fibra óptica y los electrodos se pueden disponer para que tengan varios bucles con el fin de maximizar los cambios de detección. La fibra y los electrodos también se pueden disponer en patrones para variar la resolución espacial efectiva del detector, por ejemplo, si se interroga a la fibra para que proporcione partes de detección de 10 m de longitud y una parte de fibra óptica de al menos 10 m de longitud se dispone dentro de una distancia de 1 m en una ubicación determinada, entonces la resolución espacial efectiva de esa parte será de 1 m. Dependiendo del tipo de radiación que se esté detectando, la fibra óptica y los electrodos se pueden situar unidos o dentro de estructuras de pared, tales como dentro de paredes huecas, dispuestos de forma que puedan circular sobre o por debajo del suelo y/o a través de espacios en el techo o unidos a los recorridos.

Una sola fibra del orden de unos pocos kilómetros de longitud junto con electrodos de longitud similar puede proporcionar un grado significativo de cobertura, pero sólo requiere que la unidad interrogante 106 se conecte en un extremo, tal como se muestra en la Figura 1. La diferencia de tensión también se puede aplicar en un extremo de cada uno de los electrodos primero y segundo por medio de una circuitería adecuada 401 según se muestra en la

Figura 4. Por lo tanto, la fibra óptica y los electrodos combinados pueden funcionar desde una sala de control adecuada que aloje la unidad interrogante 106 y la circuitería 401.

Aunque las formas de realización de la presente invención por lo tanto pueden requerir que se aplique una diferencia potencial relativamente alta a conductores que tienen muchos cientos de metros o incluso kilómetros de longitud no hay ninguna corriente significativa requerida para ser transportada y por lo tanto los requisitos de energía son relativamente modestos.

Claramente los detectores se deberían desplegar para prevenir cortocircuitos accidentales y la circuitería 401 puede tener una circuitería de limitación de corriente para prevenir que se consuma una corriente significativa.

Los electrodos y la fibra óptica se pueden formar convenientemente dentro de una estructura de cable que soporte los electrodos y la fibra óptica y proporcione integridad estructural y protección. En una forma de realización, según se muestra en la Figura 5, una disposición tal como se muestra en la Figura 2 con la fibra óptica 104 acoplada a los electrodos 201 y 22 situados dentro de un material de encamisado exterior 501 adecuado que se puede rellenar con un material poroso 502. El material poroso 502 podría ser una estructura con muchos vacíos o huecos que permitan la entrada de gas. El material poroso debería ser generalmente aislante de tal manera que la diferencia de potencial entre los electrodos se mantenga por tener suficientes poros como para permitir una descarga de chispa en presencia de radiación ionizante.

El material de encamisado preferiblemente no debe bloquear la radiación ionizante que se desea detectar y, por lo tanto, en algunos casos puede ser relativamente delgado y/o perforado para permitir que la radiación, tal como las partículas alfa, lleguen al gas.

En otra forma de realización, según se muestra en la Figura 6, los electrodos primero y segundo se pueden disponer, en esencia, como conductores arqueados al menos parcialmente rodeándose entre sí y/o a la fibra óptica.

La Figura 6 muestra una fibra óptica 601 rodeada por un primer conductor tubular 602, ambos rodeados por un segundo conductor tubular 603. La fibra óptica 601 se puede proteger con un material de encamisado protector 604 para protegerla contra la descarga de chispas. El material de encamisado se puede elegir para proporcionar las propiedades térmicas deseadas, es decir, la conducción de calor a la fibra óptica 601, para maximizar la marca térmica detectada por la fibra 601. El espacio 605 entre los electrodos primero y segundo 602 y 603 puede estar en gran medida vacío o se puede llenar de un material poroso según se describió anteriormente. En algunas formas de realización el gas dentro de la estructura de cable se sella del entorno. Esto permite que se utilice un gas diferente al aire y/o permite que se presurice el gas. Sin embargo, en otras formas de realización hay una trayectoria de flujo desde el interior de la estructura de cable hasta el exterior por ejemplo a través de uno o más orificios 606 en el segundo electrodo 606. Para ayudar a mantener la integridad estructural puede haber una o más estructuras de soporte 607.

El detector de radiación de acuerdo con este aspecto de la invención opera como antes, la radiación ionizante que alcanza el gas puede provocar fenómenos de ionización con una señal acústica/térmica asociada que se puede detectar. Se apreciará que la presencia de un segundo electrodo 603 rodeando el espacio de aire puede impedir que alguna radiación llegue al gas. Por lo tanto, el detector de radiación puede detectar intrínsecamente sólo radiación ionizante por encima de una determinada energía. Sin embargo, en otras formas de realización el segundo electrodo se puede perforar en muchas ubicaciones para proporcionar ventanas de entrada para la radiación.

La estructura puede comprender al menos una capa de encamisado exterior 608 que puede proteger la estructura del detector y/o que se puede disponer para proporcionar un filtrado adicional permitiendo únicamente el paso de determinados tipos o energías de radiación ionizante. De nuevo, sin embargo, la camisa exterior puede estar provista de uno o más orificios 609 para permitir los flujos de aire y/o presentar ventanas de entrada para la radiación.

El material de revestimiento se puede variar a lo largo de la longitud de la estructura de cable, tal que las distintas ubicaciones son sensibles a diferentes tipos/energías de radiación. El revestimiento se puede variar en secciones del orden de la longitud de las partes de detección de la fibra, tal que las diferentes partes de detección respondan de manera diferente. Sin embargo, en una forma de realización el espacio de aire 605 se puede dividir en una serie de cavidades a lo largo de la longitud de la estructura de cable con la longitud de cada cavidad que se ajusta para dar una frecuencia resonante diferente. Una chispa en una cavidad puede entonces producir una señal acústica que tenga un componente relativamente fuerte en la frecuencia de resonancia de la cavidad. Los diferentes revestimientos pueden variar en correspondencia con las diferentes cavidades.

La circuitería para aplicar una diferencia de potencial 401 también se puede disponer para modular la diferencia de potencial aplicada a lo largo del tiempo.

La diferencia de potencial se puede desactivar o reducir periódicamente a un nivel bajo que sea insuficiente para provocar una cascada de partículas cargadas en respuesta a un fenómeno de ionización. Al reducir periódicamente la diferencia de potencial entre los electrodos primero y segundo con el fin de detener, en esencia, cualquier estímulo en respuesta a la radiación ionizante, el ruido de fondo se puede determinar directamente y utilizarse en la identificación posterior de las señales acústicas debidas a los fenómenos de ionización.

La diferencia de potencial entre los electrodos primero y segundo también se puede modular a lo largo del tiempo para determinar de este modo la información espectroscópica sobre cualquier radiación ionizante presente. Al variar la diferencia de potencial entre los electrodos, también se varía la cantidad de ionización necesaria antes de que se produzca una descarga en cascada. Por lo tanto, variando la diferencia de potencial y supervisando el número de señales acústicas debidas a las descargas en cascada, se puede determinar la información sobre el contenido de energía de la radiación.

Las formas de realización descritas anteriormente detectarán radiación ionizante que directamente ioniza el gas correspondiente. Sin embargo, en algunas formas de realización el aparato detector se dispone para detectar radiación a través de ionización secundaria tal como se muestra en la Figura 7. La Figura 7 ilustra un detector adecuado para detectar neutrones, que puede no provocar ionización direccional del gas. Además de la fibra óptica 104 y los electrodos primero y segundo 201 y 202, el aparato puede comprender un material absorbente de neutrones 703 que emita radiación ionizante en respuesta a la absorción de neutrones. El material absorbente de neutrones se dispone junto a un espacio de aire 702 en un material de blindaje 701. El espacio de aire contiene un gas entre los electrodos. El material de blindaje bloquea la radiación ionizante directamente, pero permite el paso de neutrones. Cualesquiera neutrones incidentes pueden ser absorbidos por el material absorbente de neutrones 702, es decir, un material con una sección transversal de alta absorción de neutrones, tal como el boro 10, lo que da como resultado una emisión secundaria de radiación ionizante procedente del material absorbente de neutrones. Esta radiación ionizante secundaria puede provocar una ionización directa del gas y, por lo tanto, conducir a una chispa que se pueda detectar según se describió anteriormente.

Para ilustrar los principios de las formas de realización de la presente invención se revistió con plata una fibra óptica que tiene un material de encamisado acrílico (utilizando un revestimiento DAG plateado) para formar un primer electrodo como capa exterior de la fibra óptica (similar a los elementos 601, 604 y 602 ilustrados en la Figura 6). La combinación fibra/electrodo se dispuso a continuación en el aire cerca de un segundo electrodo que era un conductor de cobre. Se aplicó una diferencia de potencial de 5 kV entre los electrodos primero y segundo y la distancia entre los electrodos se fijó en una separación algo mayor que una separación que dio como resultado una descarga eléctrica espontánea. En otras palabras, los electrodos se dispusieron de modo que el campo eléctrico alrededor de la fibra estaba justo por debajo de la tensión de ruptura del aire. En esta disposición experimental la separación entre electrodos era de unos 3 mm.

Se utilizó una fuente de 0,9  $\mu\text{Ci}$  de Am 241 para suministrar 5,5 MeV de radiación alfa. Cuando la fuente estaba muy cerca del fuerte campo eléctrico cerca de la fibra, los rastros de ionización de las partículas alfa eran suficientes para desencadenar descargas eléctricas. La distancia y el ángulo de la fuente se mantuvieron tal que la tasa de descarga se mantuvo baja.

La fibra óptica fue interrogada utilizando una unidad interrogante de detección acústica distribuida. La unidad interrogante DAS interrogó repetidamente a la fibra con impulsos únicos de radiación óptica y detectó radiación que fue retrodispersada Rayleigh desde dentro de la fibra y generó una señal de medición en función de las variaciones de intensidad entre las sucesivas interrogaciones.

La Figura 8 muestra un espectrograma de un registro de tres minutos tomado de la fibra que está expuesta a la descarga de chispas inducida por la radiación ionizante. A los 106 segundos y 165 segundos de la grabación, el conductor de cobre se acercó demasiado a la fibra, dando como resultado una descarga eléctrica espontánea continua. Los picos de frecuencia marcados con 801 fueron por lo tanto el resultado de dicha descarga continua.

Sin embargo, se puede ver que existen otros varios picos en el espectrograma, al menos algunos de los cuales están etiquetados como 802, que se deben a la descarga inducida por la radiación.

De este modo, se puede ver que las perturbaciones creadas por la cascada de partículas cargadas inducida por la radiación se pueden detectar claramente en las respuestas de la señal de un detector acústico distribuido.

Las Figuras 9a y 9b ilustran los datos de series de tiempo de descargas de chispas típicas. Estas ilustran la energía/intensidad de la luz retrodispersada detectada desde un canal de detección dado frente al tiempo, con muestras sucesivas que se toman a una frecuencia de muestreo de 2,5 kHz. Se puede ver que hay un cambio rápido destacable en la intensidad de la retrodispersión detectada con una rampa más lenta de vuelta a la línea de base.

El tiempo de subida hasta la mitad del máximo es de aproximadamente 10 ms y la constante de tiempo de decaimiento es de aproximadamente 0,5 segundos. Estas marcas de chispas parecen provenir predominantemente de la entrada térmica, es decir, de un calentamiento rápido hasta el máximo, seguido de una lenta caída a temperatura ambiente. El período de 10 ms aproximadamente para el calentamiento está de acuerdo con lo que se puede esperar para que la difusión térmica de un impulso instantáneo de energía llegue al centro de la fibra óptica.

El calor se transmitirá a lo largo de la fibra, pero esto no debería cambiar la amplitud de la señal significativamente ya que la expansión total debería permanecer aproximadamente igual (tanto la expansión térmica como el cambio de temperatura son lineales en una primera aproximación).

En términos de enfriamiento, el calor se perderá en el entorno por la pérdida en el aire por conducción/convección y por radiación. Se realizaron pruebas en la fibra recubierta calentándola utilizando una fuente de calor durante unos

cientos de microsegundos y observando el cambio de frecuencia a lo largo del tiempo a medida que la fibra se enfriaba. Se observó un período de enfriamiento de unos pocos segundos. Por lo tanto, la serie de tiempo detectada para las descargas de chispas está de acuerdo con el calentamiento y el enfriamiento de la fibra óptica debido a la descarga.

- 5 Por lo tanto, se puede observar que las descargas entre dos electrodos provocadas por radiaciones ionizantes se pueden detectar utilizando técnicas de detección acústica distribuida en una fibra óptica situada en las proximidades de los electrodos, y preferiblemente al menos acoplada a los electrodos.

10 La invención se ha descrito con respecto a varias formas de realización. A menos que se indique expresamente lo contrario, las diversas características descritas se pueden combinar entre sí y las características de una forma de realización se pueden emplear en otras formas de realización.

15 Se debe observar que las formas de realización mencionadas anteriormente ilustran más bien que limitan la invención, y que aquellos expertos en la técnica podrán diseñar muchas formas de realización alternativas sin apartarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas. La palabra "que comprende" no excluye la presencia de elementos o etapas distintas de las enumeradas en una reivindicación, "uno" o "una" no excluye varios, y una sola característica u otra unidad puede cumplir las funciones de varias unidades enumeradas en las reivindicaciones. Cualesquiera números de referencia o etiquetas de las reivindicaciones no se deben interpretar con el fin de limitar su alcance.

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Un aparato detector de radiaciones ionizantes que comprende: al menos una fibra óptica (104, 601) adecuada para la detección acústica/de vibraciones de la fibra óptica distribuida, caracterizada por comprender además: un primer electrodo (201, 602) y un segundo electrodo (202, 603) separado del primer electrodo (201, 602); con un gas entre los electrodos primero y segundo, en donde al menos una fibra óptica (104, 601) es adyacente al primer electrodo (201, 602).
2. Un aparato detector de radiaciones ionizantes, según se reivindica en la reivindicación 1, que comprende circuitería (401), para aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos primero y segundo lo suficientemente elevada tal que la presencia de átomos/moléculas de gas ionizados provoque la multiplicación de avalanchas.
- 10 3. Un aparato detector de radiaciones ionizantes, según se reivindica en cualquier otra reivindicación precedente, en donde los electrodos primero y segundo son electrodos alargados que se extienden al menos parte de la longitud de la fibra óptica.
- 15 4. Un aparato detector de radiaciones ionizantes, según se reivindica en cualquier otra reivindicación precedente, en donde la fibra óptica comprende un revestimiento o una capa de barrera (206) para protegerla de al menos uno de: una descarga eléctrica que se produzca en presencia de radiación ionizante; y el daño debido a la radiación ionizante.
5. Un detector de radiaciones ionizantes según se reivindica en cualquier otra reivindicación precedente, en donde el primer y/o segundo electrodo (201, 202) se dispone dentro de una estructura de cable (501, 502) con la fibra óptica.
- 20 6. Un aparato detector de radiaciones ionizantes, según se reivindica en la reivindicación 5, en donde los electrodos primero y segundo están separados, al menos en algunas secciones, por un material poroso (502) para permitir el paso de gas entre los electrodos.
7. Un aparato detector de radiaciones ionizantes, según se reivindica en la reivindicación 5 o en la reivindicación 6, en donde hay al menos un vacío (605) entre los electrodos primero y segundo que se puede llenar con gas.
- 25 8. Un aparato detector de radiaciones ionizantes según se reivindica en cualquiera de las reclamaciones 5 - 7 en donde los electrodos primero y segundo pasan a través de una serie de cavidades que contienen gas.
9. Un detector de radiación ionizante según se reivindica en la reivindicación 8, en donde las cavidades se disponen para tener un tamaño que conduzca a una frecuencia de resonancia particular.
- 30 10. Un aparato detector de radiaciones ionizantes, según se reivindica en cualquier otra reivindicación precedente que comprenda al menos una capa de barrera entre el gas que separa los electrodos primero y segundo y una dirección de incidencia de las radiaciones ionizantes en donde la capa de barrera tenga propiedades ajustadas para filtrar determinados tipos de radiaciones ionizantes.
11. Un aparato detector de radiaciones ionizantes, según se reivindica en cualquier otra reivindicación precedente, en donde el aparato detector se configura para detectar radiación por medio de ionización secundaria y comprende un material absorbente de neutrones (702) que emite radiación ionizante en respuesta a la absorción de neutrones.
- 35 12. Un aparato detector de radiaciones ionizantes, según se reivindica en la reivindicación 11, que comprende, al menos sobre una parte del aparato, una capa de blindaje (701) que bloquea o atenúa, en esencia, otras formas de radiación ionizante.
- 40 13. Un aparato detector de radiaciones ionizantes, según se reivindica en cualquier otra reivindicación precedente, en donde la fibra óptica se acopla a al menos uno de los electrodos, con el fin de permitir una transferencia de calor eficaz del electrodo a la fibra óptica.
14. Un detector de radiación ionizante, según se reivindica en la reivindicación 2, en donde la circuitería (401) para aplicar la diferencia de potencial a los electrodos primero y segundo se configura para modular la diferencia de potencial aplicada a lo largo del tiempo con el fin de que periódicamente se apague o se reduzca a un nivel bajo que sea insuficiente para provocar una cascada de partículas cargadas en respuesta a un fenómeno de ionización.
- 45 15. Un método de detección de radiaciones ionizantes que comprende: aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos primero y segundo (201, 202, 602, 603) separados entre sí en un gas, en donde la diferencia de potencial sea suficiente tal que la ionización del gas provoque una cascada de partículas cargadas entre los electrodos e, interrogar a una fibra óptica (104, 601) desplegada adyacente a dichos electrodos primero y/o segundo para proporcionar un detector acústico distribuido; y supervisar dicho detector acústico distribuido en busca de señales asociadas con una cascada de partículas cargadas.
- 50

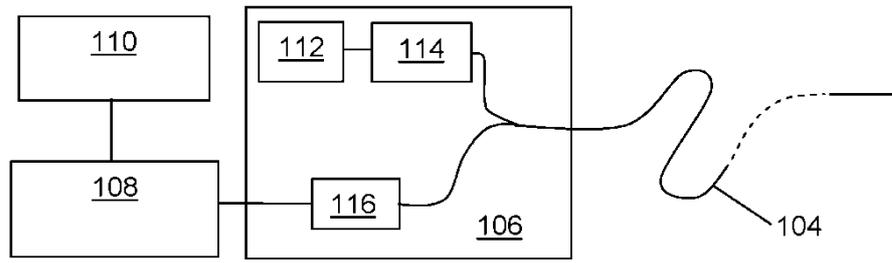


Fig. 1

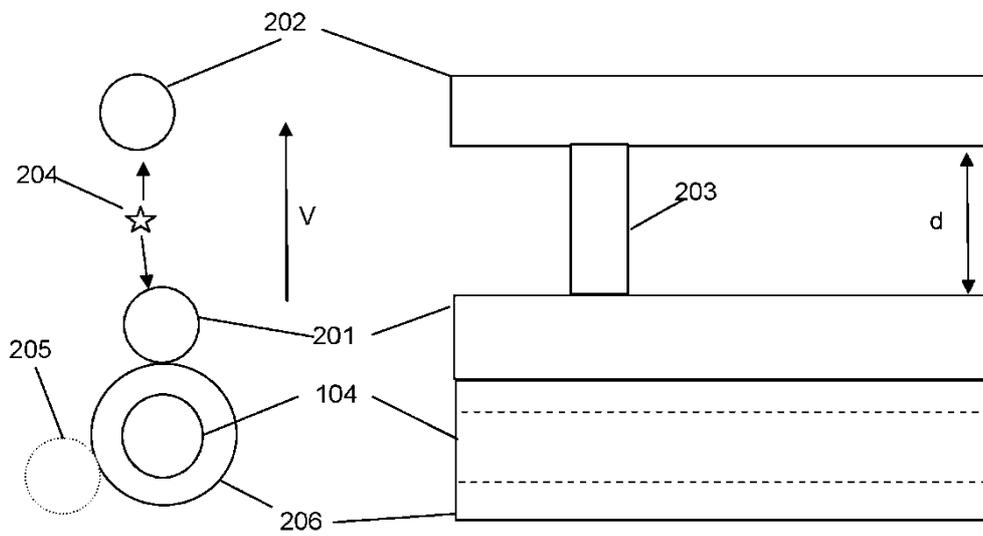


Fig. 2

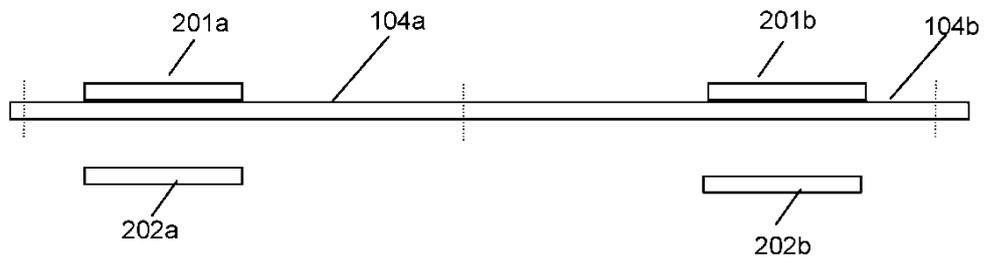


Fig. 3

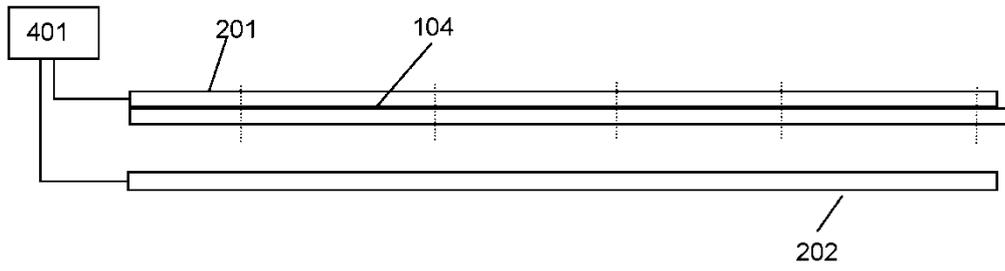


Fig. 4

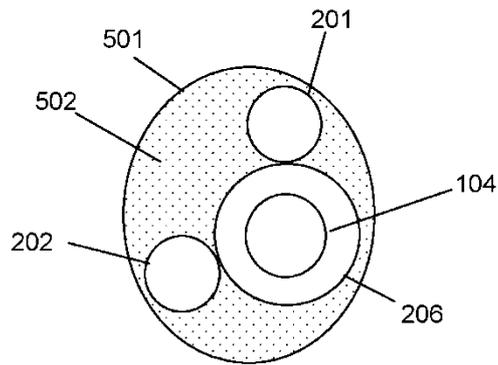


Fig. 5

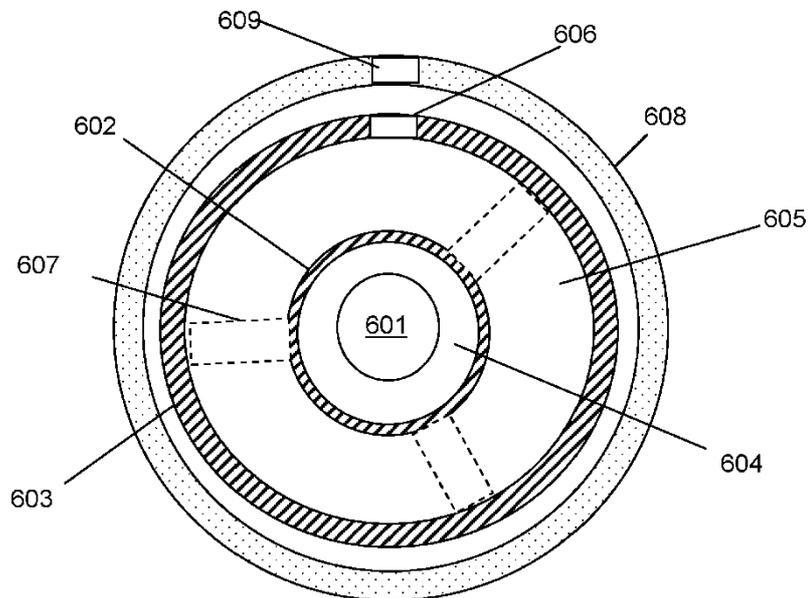


Fig. 6

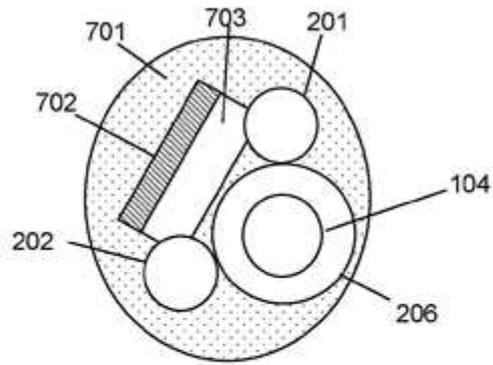


Fig. 7

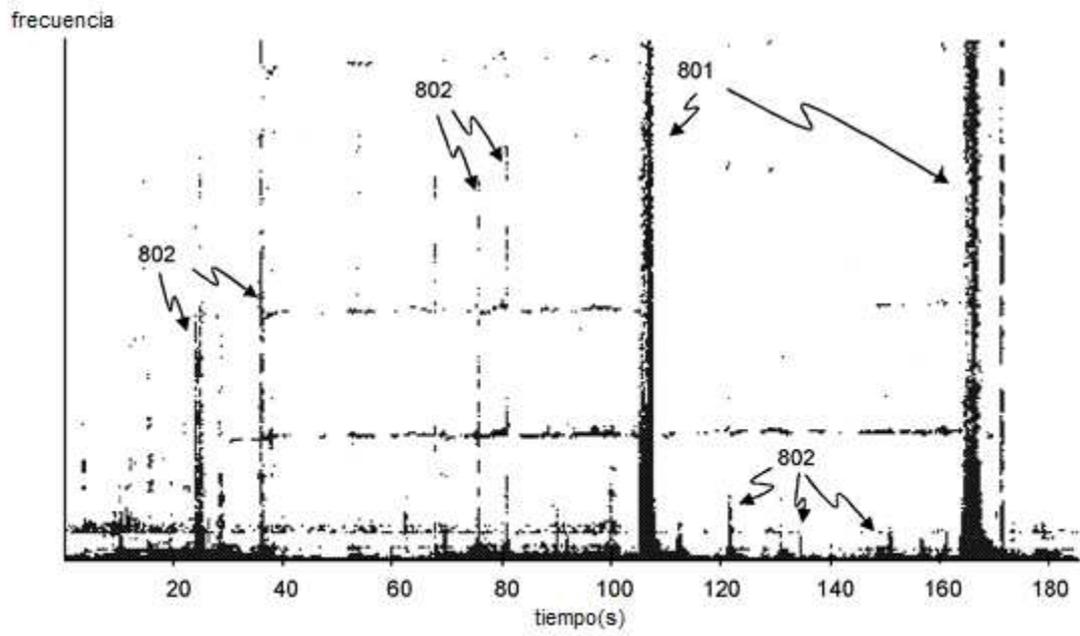


Figura 8

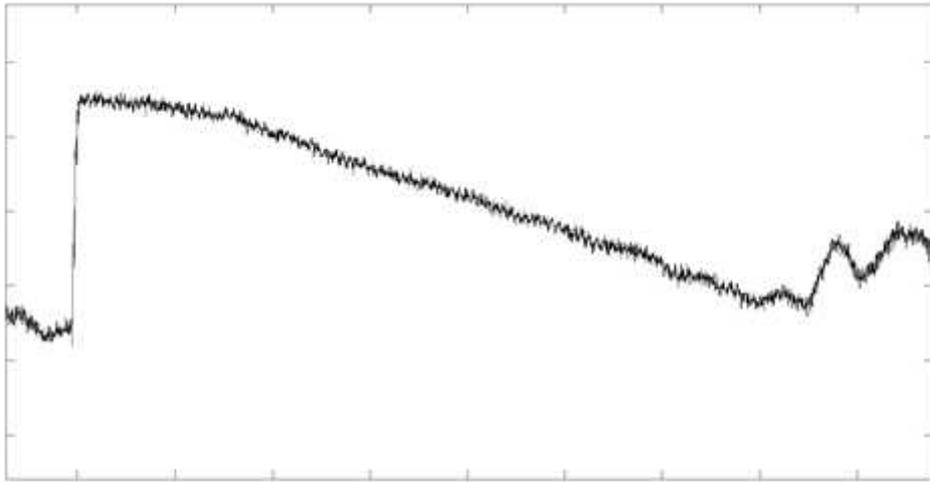


Fig. 9a

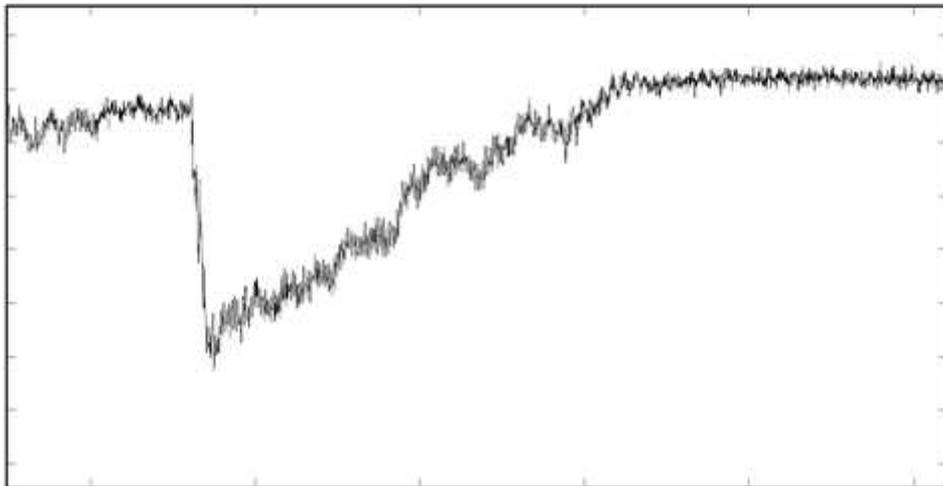


Figura 9b