

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 557 994**

51 Int. Cl.:

**G01L 11/02** (2006.01)

**G01L 1/24** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.07.2007** **E 07787464 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.11.2015** **EP 2167931**

54 Título: **Sensor de presión**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**01.02.2016**

73 Titular/es:

**ABB RESEARCH LTD. (100.0%)  
AFFOLTERNSTRASSE 44  
8050 ZÜRICH, CH**

72 Inventor/es:

**KRAMER, AXEL;  
KASSUBEK, FRANK;  
BOHNERT, KLAUS y  
BRÄNDLE, HUBERT**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

**ES 2 557 994 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

Sensor de presión

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere al campo de los elementos sensores de presión que se basan en unidades de sensor de presión, los cambios inducidos por la presión en las propiedades ópticas de las cuales se leen mediante iluminación con una fuente de luz. Además, el presente documento se refiere a métodos para el funcionamiento de  
10 tales elementos sensores de presión, así como a los usos de tales elementos sensores de presión.

**Antecedentes de la invención**

A partir de la literatura de patentes y de otras publicaciones técnicas se conoce la utilización de características de fotoluminiscencia o absorción en materiales semiconductores para la medición de parámetros, tales como la temperatura y la presión.  
15

Algunos autores han propuesto utilizar el desplazamiento del límite de absorción de GaAs a granel para la detección de la presión. Sin embargo, informan acerca de las dificultades graves, como la estabilización térmica y los efectos de interferencia de temperatura. Después de la compensación se informa que el error de temperatura restante es 1,5 bar/K. Sin compensación sería 40 bar/K.  
20

Otros autores demostraron que los espectros de luminiscencia y la absorción de, por ejemplo, sistemas de GaAs/Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>, InGaAs/GaAs son útiles para la calibración de presión. También informan sobre el uso del desplazamiento de líneas de láser de estructuras láser de pozo cuántico AlGaAs e InGaAs/GaAs, sobre todo para el régimen de alta presión (varios GPa). En este último caso, los principales problemas están relacionados con el modo de salto y la histéresis. Aparte de utilizar el cambio de intervalo de banda para la presión óptica de detección también se puede utilizar para el ajuste de la longitud de onda del láser de diodos de láser semiconductores. Los rangos de afinado mayores de 200 nm son reportados.  
25  
30

La invención parte del documento US 3.122.922, que divulga un sensor de presión absoluta óptico basado en los cambios inducidos por la presión en la absorción o índice de refracción en semiconductores tales como germanio o silicio. El documento US 3.122.922 no divulga una medición de la presión diferencial.

El documento US 4.518.857 divulga un transductor elasto-óptico compensado de temperatura y de presión para la detección de las señales acústicas por birrefringencia inducida acústicamente. La compensación de las variaciones de presión cuasi estáticas se realiza con dos cámaras, una para alojar los componentes ópticos y la otra para proporcionar un depósito de aceite para la transferencia de aceite y la compensación de presión entre ambas cámaras.  
35  
40

**Sumario de la invención**

Por lo tanto, uno de los objetos de la presente invención es proporcionar un conjunto de sensor de presión en el que al menos algunas de las deficiencias antes mencionadas de los conjuntos de acuerdo con el estado de la técnica se reducen, si no se eliminan. Específicamente un sensor de presión con al menos un elemento de detección de la presión a base de semiconductores, los cambios de presión inducidos en las propiedades ópticas los cuales se leen por iluminación con al menos una fuente de luz, se deben mejorar. El objetivo es tener un sensor de presión diferencial con precisión alta y errores causados por efectos de la temperatura bajos.  
45

Este y otros objetivos se consiguen porque el sensor de presión comprende al menos dos elementos sensores de presión basados en semiconductores situados en cámaras de presión individuales, porque elementos sensores se encuentran esencialmente adyacentes entre sí y porque los elementos sensores se irradian con la misma fuente de luz, en donde la luz transmitida a través de los elementos sensores se detecta usando al menos dos detectores correspondientes, y en que la presión diferencial en las dos cámaras de presión se evalúa basándose en la salida de estos detectores.  
50  
55

Por lo tanto, se propone un sensor de presión diferencial basado en filtros ópticos de semiconductores. La presión aplicada a los materiales semiconductores cambia sus propiedades ópticas, especialmente la frecuencia del límite de absorción espectral. Proponemos utilizar los semiconductores como filtros ópticos y, en particular, para explotar la excitación azul de su límite de absorción cuando se expone a la presión hidrostática. El desplazamiento espectral inducido por la presión del límite del filtro se controla preferentemente mediante la detección de la potencia total transmitida luz de una fuente de luz. A fin de evitar efectos de la temperatura utilizamos dos cámaras de presión que están situadas cerca una de la otra para evitar diferencias de temperatura entre las dos cámaras de presión y evaluar la señal de diferencia de las transmisiones a través de dos filtros. La novedad de la presente invención es el uso de dos cámaras de presión para medir la presión diferencial. Además, una compensación de temperatura puede lograrse preferiblemente mediante el uso adicional de un sensor de cuatro cuadrantes divididos. El concepto de la  
60  
65

evaluación de la señal de diferencia de la luz transmitida de una única fuente de luz permite una respuesta del sensor lineal y la compensación de los errores de punto cero que son típicamente resultantes de la presión estática y/o temperatura.

5 El concepto actual explota la deformación de celosía intrínseca de los semiconductores ante la presión, lo que lleva a un cambio de su energía brecha de banda y por lo tanto de las propiedades ópticas. La presión más alta conduce a un aumento de la frecuencia de salida óptica de un emisor o, en el caso de un dispositivo pasivo tal como un filtro, conduce a la excitación azul de su límite de absorción.

10 Por lo tanto, se propone utilizar los semiconductores como filtros ópticos y explotar la excitación azul de su límite de absorción cuando se expone a la presión hidrostática. Este desplazamiento espectral se mide en la transmisión utilizando una fuente de luz. Una posible realización de esta invención se puede describir como sigue: La luz en el sistema se describe mediante dos haces de luz idénticos que se emiten desde un diodo emisor de luz. Los haces de luz se transmiten a través de dos filtros que se colocan en diferentes cámaras de presión. Las amplitudes o potencias de los haces de luz se detectan en los diodos detectores posteriores. La diferencia entre las intensidades se mide en los dos detectores y es evaluada por la electrónica apropiada. Como filtros se propone un material compuesto de nanocristales semiconductores embebidos en una matriz de vidrio. La ventaja de este sistema es que ofrece un alto grado de libertad para la adaptación de la posición de límite deseada y que es barato y está disponible comercialmente (por ejemplo, SCHOTT, filtros ópticos). Alternativamente, los filtros también pueden estar hechos de o comprender cristales semiconductores a granel, tales como GaAs. La ventaja de GaAs en comparación con el cristal SCHOTT es un coeficiente de presión tres veces mayor. El sensor es especialmente adecuado para la medición de grandes presiones en condiciones ambientales difíciles.

25 La novedad de la presente invención es, entre otros aspectos, el uso de dos cámaras de presión para medir la presión diferencial aplicada a ambas cámaras. El concepto propuesto de la evaluación de la señal diferencial de la luz transmitida de una única fuente de luz permite una respuesta del sensor cuasi lineal y la compensación de los errores de punto cero que normalmente surgen de la presión y/o la temperatura estática. Un concepto mejorado usando dos diferentes semiconductores permite una mejor compensación de error.

30 De acuerdo con una primera realización de la presente invención, los dos elementos sensores de presión están dispuestos cerca uno del otro o incluso de límite a límite, ya sea en un plano o con un ángulo más pequeño que  $180^\circ$ , cuyo ángulo se adapta a las características de emisión de luz de la fuente de luz, y preferiblemente con un ángulo de más de o igual a  $90^\circ$ , en el que la fuente de luz está dispuesta en un lado de los elementos sensores de presión e irradia los elementos sensores de presión en condiciones ópticas idénticas comparables, preferiblemente simétricas y más preferidas idénticas, es decir de una manera esencialmente idéntica/simétrica, es decir, bajo una intensidad de luz y distribución de intensidad de la luz comparables o simétricas o idénticas, que comprenden por ejemplo, ángulos de incidencia, enfoque, etc. comparables o simétricos o idénticos. Favorablemente, la fuente de luz irradia los elementos sensores de presión por la incidencia esencialmente normal.

40 La cercana proximidad de los elementos sensores de presión reduce esencialmente los gradientes de temperatura y los errores resultantes en la señal diferencial. A fin de lograr una irradiación óptima mediante la sola fuente de luz, los dos elementos sensores de presión pueden o bien estar dispuestos en un solo plano, la única fuente de luz se coloca por encima de los dos elementos sensores de presión esencialmente en el plano ortogonal al plano de los dos elementos sensores de presión, o de los dos elementos sensores de presión se pueden inclinar con sus límites exteriores hacia la fuente de luz, por lo que la irradiación que cae sobre los elementos sensores de presión es tan ortogonal como sea posible, estando la incidencia de luz ortogonal limitada por la divergencia del haz(es) de luz de la fuente de luz. En este último caso, los dos elementos sensores de presión por así decirlo encierran la fuente de luz parcialmente.

50 En este sentido es posible un alto grado de similitud o preferiblemente identidad de la irradiación de los dos sensores si el sensor de presión comprende un plano de simetría (plano de simetría), estando la fuente de luz posicionada esencialmente en este plano de simetría y estando los elementos sensores de presión posicionados en correspondientes espacios medios definidos o separados por dicho plano de simetría. Este plano de simetría en el caso de elementos sensores de presión rectangulares incluirá la línea en la que esencialmente los elementos sensores o las cámaras de presión son adyacentes entre sí. Preferiblemente, los elementos sensores de presión se colocan en cualquiera de los espacios medios en posiciones mutuamente simétricas.

60 Para una estabilidad tan alta como sea posible de la orientación relativa de la fuente de luz y los sensores y con el fin de evitar errores inducidos por desajustes o cambios de posición relativos, es posible proporcionar un elemento ópticamente transparente entre la fuente luminosa y los elementos sensores y tener la fuente de luz y/o los elementos sensores conectados sobre o integrados en este elemento transparente. Por lo tanto, de acuerdo con una realización preferida adicional, se proporciona un bloque ópticamente esencialmente transparente, preferiblemente un bloque de vidrio, entre los elementos sensores de presión y la fuente de luz, a través dicho bloque de vidrio la iluminación pasa desde la fuente de luz a los elementos sensores de presión, en donde la fuente de luz está fijada sobre o integrada en dicho bloque, y en el que los elementos sensores de presión y/o las cámaras de presión están fijados sobre o integrados en dicho bloque.

Según una realización preferida adicional, cada cámara de presión comprende al menos un elemento de bastidor que sostiene al menos dos ventanas esencialmente transparentes ópticamente, distanciadas (preferiblemente paralelas), una de ellas frente a la fuente de luz y la otra frente al detector, donde el espacio interior entre las dos ventanas forma una cavidad de la cámara de presión en la que se encuentran los elementos sensores de presión a base de semiconductores. Preferiblemente, la cavidad se llena con aceite, por ejemplo, siendo utilizado aceite de silicón. Las ventanas pueden ser, por ejemplo, ventanas de zafiro, y típicamente las dos cámaras de presión están dispuestas en el mismo plano.

Como se mencionó anteriormente, los elementos sensores de presión son preferentemente elementos de filtro con un límite de absorción que se desplaza por la influencia de la presión externa. Dichos elementos de filtro se proporcionan ya sea como una matriz de vidrio, preferiblemente una matriz de vidrio de borosilicato, que tiene nanocristales semiconductores embebidos en la misma, o como un cristal semiconductor a granel, o se basan en un cristal fotónico.

Con el fin de evitar por ejemplo los errores debidos a las diferencias de temperatura y similares, es posible proporcionar, además, un detector de intensidad para la medición de la intensidad de la fuente de luz sin atenuación a través de cualquiera de los elementos sensores de presión, y/o para proporcionar un detector de detección de temperatura, y tomando la salida de uno o ambos de estos detectores en cuenta para la compensación de los desplazamientos espectrales inducidos que están perturbando la medición de la presión o la medición de la presión diferencial.

Una mejora adicional de la configuración propuesta es posible si al menos dos pares de elementos sensores de presión se irradian por dicha fuente misma luz, estando cada par formado por el mismo tipo de elementos sensores de presión. En este caso, preferiblemente los dos pares de elementos sensores de presión tienen diferentes límites de absorción del filtro. Preferiblemente, dos elementos sensores de diferente límite de absorción y por lo tanto diferente (diferencial) sensibilidad a la presión se proporcionan en la misma cámara de presión en esta configuración.

Es posible para la evaluación de la transmitancia para medir realmente el espectro completo en detalle. Sin embargo, se prefiere proporcionar detectores que están midiendo la intensidad integrada total dentro de un cierto rango espectral (normalmente la ventana de detección del detector). Preferiblemente, los detectores son diodos detectores que electrónicamente se pueden conectar de manera que la producción combinada de los dos diodos detectores es su señal de diferencia.

Como se mencionó anteriormente, la fuente de luz es una fuente de luz de banda ancha, lo que significa que su anchura espectral es del orden de o menor que la anchura espectral del límite de absorción del filtro. La fuente de luz es preferiblemente un diodo emisor de luz.

La presente invención se refiere además a un método para detectar una presión utilizando un sensor de presión con al menos un elemento de detección de la presión a base de semiconductores, los cambios inducidos por la presión en las propiedades ópticas de los cuales son evaluados/leídos por iluminación con al menos una fuente de luz, en el que se utilizan al menos dos elementos sensores de presión a base de semiconductores dispuestos en cámaras de presión individuales y esencialmente adyacentes entre sí, siendo dichos elementos sensores irradiados por la misma fuente de luz, en el que la luz transmitida a través de los elementos sensores se detecta usando al menos dos detectores correspondientes, y en el que la presión diferencial en las dos cámaras de presión se evalúa sobre la base de la salida diferencial de estos detectores, basándose en la salida de la suma de estos detectores, basándose en la relación de las salidas de estos detectores, o basándose en una combinación de las mismas.

La presente invención se refiere además a la utilización de un sensor de presión como se estableció anteriormente para la medición de las diferencias de presión superiores a 500 bar, preferiblemente por encima de 800 bar hasta 20000 bar. En el rango de estas diferencias de presión se puede lograr una muy alta sensibilidad y la independencia de las influencias de la temperatura.

Otras realizaciones de la presente invención se describen en las reivindicaciones dependientes.

### Breve descripción de las figuras

En los dibujos adjuntos se muestran realizaciones y/o pruebas documentales preferidas en apoyo de la invención en los cuales:

- La figura 1 muestra las características espectrales de la fuente de luz (L) y del filtro (F), en el que las características del filtro (F) vienen dadas por el eje de la derecha, el espectro LED típico (L) se da en el eje de la izquierda, midiendo el sensor la integral de la curva espectral de la transmisión (Tr);
- La figura 2 muestra una configuración de un sensor de presión diferencial semiconductor según una primera realización de la invención;

- La figura 3 muestra una configuración de un sensor de presión diferencial semiconductor de acuerdo con un segundo modo de realización de la invención con dimensiones aproximadas en vista lateral (a) y vista superior (b), en el que debido a la simetría sólo se muestra la mitad izquierda de las cámaras de presión;
- 5 La figura 4 muestra la función de filtro ajustada a las características de un filtro de vidrio de nanocristales dopados (RG 630,  $d = 1,8$  mm);
- La figura 5 muestra la transmisión de filtro de vidrio (Schott, OG590) para varios espesores;
- 10 La figura 6 muestra la curva típica para la señal (normalizada)  $I_1-I_2$  como una función de la presión diferencial  $\Delta p$  (en Pascal), indicando posibles rangos de medición;
- La figura 7 muestra la resolución de presión  $R_{es}$  (en Pascales) como una función de la presión diferencial (en Pascal) para condiciones de referencia; y
- 15 La figura 8 muestra una configuración de un sensor de presión diferencial de semiconductores de acuerdo con la tercera forma de realización de la invención con dos cámaras de presión en cada uno de los cuales están presentes dos elementos sensores de presión diferentes  $F_A, F_B$ .
- 20

### Descripción detallada de las realizaciones preferidas

Concepto del sensor:

- 25 Principio físico: El concepto sensor propuesto se basa en el cambio de las propiedades ópticas del material de cristal semiconductor o fotónico con la aplicación de presión. La presión hidrostática conduce a deformaciones de la celosía y de este modo a cambios de la estructura de bandas de electrones (o estructura de banda fotónica prohibida) del material. Las propiedades electrónicas y ópticas, tal como la separación de banda de energía, la absorción, la luminiscencia etc. se alteran. Los semiconductores utilizados como filtros ópticos exhiben un desplazamiento azul de su borde de absorción cuando se expone a la presión hidrostática. Los cambios de longitud de onda típicos están en el intervalo de 0,0025 nm/bar.
- 30

Este desplazamiento espectral se puede medir usando la transmisión de una fuente de luz de banda ancha (o monocromática), tal como un diodo emisor de luz (LED) o láser, a través del filtro. La longitud de onda máxima y la anchura espectral del LED tiene que encajar a la posición y a la anchura del borde de absorción del filtro. La figura 1 muestra las características espectrales de una configuración de este tipo y la curva de transmisión calculada. En esta figura se dan las características espectrales de la fuente de luz L y del filtro F. Las características del filtro se escalan según el eje de la derecha, el espectro del LED típico se escala según el eje de la izquierda. Además, también se da la transmisión de la luz del LED  $T_r$  a través del filtro; un sensor mide la integral de esta curva espectral. La presión desplaza la curva del filtro F a longitudes de onda inferiores (flecha 15), alterando así la transmisión espectral.

35

40

Un esquema posible de un sensor de presión 16 basado en este principio se esboza en la figura 2. El elemento sensor 3, 4 es un filtro de vidrio de color estándar que consiste en nanocristales semiconductores dispersos integrados en una matriz de vidrio de borosilicato. Estos elementos sensores se encuentran en cámaras de presión 5, 6 individuales que están situadas cercanas entre sí en el mismo plano y que son irradiadas por el mismo haz de luz 2. El desplazamiento espectral inducido por la presión del borde del filtro se controla mediante la detección de la potencia de transmisión total de la luz emitida por un LED 1. Esta medición de la intensidad se puede realizar a un coste relativamente bajo utilizando los detectores 7, 8; también es posible una evaluación espectral de la intensidad de la luz.

45

50

Los cambios de temperatura conducen a un cambio similar del hueco de la banda en el semiconductor (signo contrario, de aproximadamente 0,15 nm/K, véase la tabla 1). La eliminación de la influencia de la temperatura es decisiva para el rendimiento del sensor. Para evitar cambios de la señal de presión de punto cero causados por variaciones de temperatura, se sugiere de acuerdo con la invención el uso de dos cámaras de presión 5, 6 y evaluar la señal de diferencia de las transmisiones a través de dos filtros 3, 4 (ver la figura 2).

55

Modelo del sensor y señal: Para evaluar el rendimiento de un sensor construido de acuerdo a los principios descritos anteriormente, se utilizó un modelo simplificado del sensor físico para la estimación de la señal del sensor y su sensibilidad a las perturbaciones etc. Las especificaciones de este sensor se dan a continuación. El rendimiento de un sensor 16 permite estimar el orden de magnitud de los efectos de perturbación y de medición con buena precisión.

60

La luz 2 en el sistema se describe en el modelo mediante dos haces de luz idénticos que son emitidos desde el LED 1. Los haces se transmiten a través de los dos filtros 3, 4 que están expuestos a las presiones  $p_1$  y  $p_2$ , respectivamente. Las amplitudes o potencias o intensidades  $I_1, I_2$  del haz, respectivamente, se detectan en los

65

diodos detectores 7, 8 posteriores. Para llegar a un modelo matemático sencillo para el sensor, el espectro del LED se puede aproximar para ser gaussiano y la característica del filtro de absorción mediante una función de error. Estas aproximaciones dan muy buenos ajustes a los datos de filtros y LEDs reales. Los cambios de temperatura y presión provocan un desplazamiento lineal de la frecuencia de borde de los filtros; la temperatura también se desplaza linealmente la frecuencia pico del LED. Los cambios en la anchura de la característica y el LED pico del filtro en general se pueden despreciar. Se supone que las temperaturas del filtro y del LED son idénticas.

Estas aproximaciones permiten llegar a las ecuaciones analíticas para la sensibilidad del sistema con respecto a la presión diferencial. La diferencia entre las intensidades medidas en las dos partes del detector 7, 8 ( $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente) se utiliza como una señal básica. La señal  $I_1 - I_2$  tiene las siguientes propiedades, en resumen:

(i)  $I_1 - I_2$  anula para la presión diferencial cero  $\Delta p$  independiente de la presión estática y de la temperatura del sensor:  $I_1 - I_2 = 0$  para  $\Delta p = 0$ ,  $\Delta p$  se define como  $p_1 - p_2$ . La medición de la diferencia permite eliminar los errores de punto cero inducidos por variaciones de la presión absoluta. La configuración según la invención es superior porque, de lo contrario, la compensación de los errores de punto cero o variaciones es muy difícil de lograr.

(ii) La señal  $I_1 - I_2$  es monótona en la presión diferencial  $\Delta p$ , que es deseable para una señal de medición.

(iii) La dependencia de  $I_1 - I_2$  sobre la presión diferencial  $\Delta p$  es esencialmente lineal:  $I_1 - I_2 \sim S(\Sigma_p, T) \Delta p$ , donde  $S$  designa la sensibilidad del sensor con respecto a la presión diferencial,  $\Sigma_p$  la presión estática y  $T$  la temperatura del sensor. La presión estática igual a  $\Sigma_p = (p_1 + p_2)/2$ . Para el sistema de ejemplo aquí descrito e investigado a continuación, las desviaciones de la linealidad están por debajo del 0,3 %. Para una función monótona y no ambigua, no linealidades pueden ser compensadas; sin embargo, para una compensación de la función casi lineal es más sencillo y menos complejo. Debe tenerse en cuenta que la sensibilidad a la presión diferencial depende de la presión estática  $\Sigma_p$  y la temperatura  $T$ ; estas dependencias se corrigen preferiblemente.

Bajo estas asunciones, puede calcularse la sensibilidad  $S$  del sensor a la presión diferencial  $\Delta p$ . Teniendo en cuenta las amplitudes de luz, la eficiencia del detector (basada en los datos del dispositivo disponibles) y la resolución de la presión requerida, se pueden determinar los rangos de presión del sistema y los errores típicos.

#### Evaluación del Sistema

Especificación del sistema: La configuración del sensor en investigación se muestra en la figura 3. Como los vidrios de filtro 3, 4 (pero no el LED 1) están situados dentro de la respectiva cámara de presión 5, 6, ninguna conexión eléctrica tiene que ser alimentada a la zona de presión. Dos cámaras de presión 5, 6 son necesarias para la medición de la presión diferencial. Sin embargo, incluso para un posible sensor de presión absoluta, se sugiere construir una estructura similar a la figura 3. La figura 3 da una configuración del sensor propuesto con dimensiones aproximadas, en el que  $w$  es elegido para ser aproximadamente de 15 mm,  $d$  se elige para ser de aproximadamente 17 mm,  $L$  se elige para ser aproximadamente de 14 mm y  $h$  se elige para ser de aproximadamente 5 mm.

Un solo LED 1 se utiliza para iluminar el sistema. Esto permite eliminar posibles cambios de intensidad entre diferentes LEDs, que se producirían si se utilizaran dos LEDs.

La configuración tiene las siguientes propiedades

1. Estabilidad frente a la presión: Las ventanas de zafiro 9 se utilizan por su gran resistencia a la presión. Como criterio de diseño de presión, se recomienda una resistencia a la tracción de 400 MPa. Las ventanas 9 están fijadas a una carcasa 10 de acero inoxidable mediante soldadura dura. Las cámaras presurizadas 5, 6 son lo suficientemente pequeñas, de tal manera que las fuerzas de presión resultantes permanezcan también suficientemente pequeñas. Las cámaras 5, 6 se llenan sobre todo con los filtros 3, 4, y sólo un pequeño volumen de aceite de silicona 12 se deja alrededor de los filtros. Como no hay membranas u otras partes delicadas, la instalación no necesita ninguna protección contra sobrepresión adicional.

2. Dimensiones totales: El sensor está diseñado lo más pequeño posible. Esto reduce al mínimo los gradientes de temperatura que pueden ser críticos para el rendimiento del sensor. Además, se puede reducir el coste (sobre todo para el sistema detector) y dar lugar a pérdidas de luz más pequeñas, por ejemplo, debido a la luz parásita. Aquí, se escogen dimensiones que permiten una fácil producción del sensor.

3. Estabilidad de la trayectoria de la luz: Es muy importante que las posiciones relativas del LED 1, los filtros 3, 4 y los detectores 7, 8 sean fijas entre sí en el espacio y no cambien con la temperatura o con otras condiciones ambientales. Esto es aún más importante en la configuración de cámara de presión diferencial, debido a que la simetría de ambas trayectorias de luz no deberá ser perturbada (ver el eje de simetría 13 que se indica en la figura 3). La estabilidad de la trayectoria de la luz se realiza preferentemente fijando el LED 1 a un bloque de vidrio sólido 14 en la parte superior de la carcasa del filtro. No se mantendrá una distancia entre el LED 1 y los filtros 3, 4 por razones geométricas (tales como la apertura del ángulo del cono de luz 2 y la zona muerta en el

medio del paquete de sensores). El LED 1 se elige para tener una característica angular de emisión de luz adecuada para este propósito.

5 En principio, otros instrumentos de las partes o elementos del sensor también son posibles. Por ejemplo, se pueden usar espejos, lo que permite mejorar el efecto de medición y tener el sensor y el detector colocado en los mismos lados o caras de la carcasa del filtro. Esto tiene la ventaja de que todos los componentes electrónicos pueden estar dispuestos en el lado de la carcasa del filtro. Las ventajas de este tipo de configuraciones diferentes equilibrarán la complejidad del sensor. Para el propósito actual, se prefiere la configuración ejemplar mostrada en la figura 3.

10 El filtro 3, 4 puede ser una matriz de vidrio con nanocristales semiconductores integrados (serie de filtro Schott RG). Estos filtros están disponibles para las frecuencias de límite arbitrarias; aquí hemos elegido una frecuencia particular para minimizar los errores causados por efectos de la presión estática. Además, el filtro y el LED han sido elegidos para tener cambios similares de la frecuencia de borde y la posición del pico como una función de la temperatura, respectivamente. Como alternativa a estos filtros, se pueden utilizar materiales semiconductores a granel. Las sensibilidades de la presión y la temperatura de los diferentes materiales son similares y se espera ninguna ventaja de rendimiento. Una alternativa son los cristales fotónicos con propiedades hechas a medida, tales como desplazamiento espectral apropiado de borde de absorción como una función de la presión (diferencial) y desplazamientos espectrales erróneas pequeños o compensables como una función de las perturbaciones, tales como variaciones de la presión absoluta y/o de la temperatura.

20 Una especificación de componentes ópticos y electrónicos se proporciona en la Tabla 1.

Tabla 1

<b>LED</b>	Osram Semiconductors, LA E655		
	longitud de onda pico	624	nm
	anchura pico	7,64	nm
	coeficiente de temperatura	0,15	nm/K
	consumo de energía	1	mA
	precio (estimación)	< 0,5	EUR
<b>Filtro</b>	Filtro de vidrio de color Schott: serie RG630		
	posición del borde (50% de transmisión)	625,1	nm
	anchura (estimación optimista)	7,84	nm
	coeficiente de temperatura	0,14	nm/K
	coeficiente de presión	-0,0024	nm/bar
	espesor	1,8	mm
	precio aproximado	< 0,07	EUR/mm <sup>2</sup>
<b>Detección</b>	Fotodiodo: Hamamatsu S6865-02, Amplificado: BurrBrown OPA1 24 Circuito de detección: configuración de puente de Wheatstone y amplificador de transimpedancia		
	<b>Relación de señal y ruido total estimada (SNR)</b>	1,2 10 <sup>5</sup>	
	consumo de potencia	1,5	mW
	precio total de la unidad de detección	< 10	EUR

25 Se asume una relación de señal y ruido del detector de 10<sup>-6</sup> (estimación optimista). La resolución de presión, llamada Res (en Pascales) en la figura 7, se da por el ruido de la señal promedio dividida por la sensibilidad a la presión o la sensibilidad a la presión diferencial (es decir, el cambio de la señal con la presión diferencial). Esta resolución debe compararse con la resolución típica requerida, que es 10<sup>-5</sup> veces el límite superior de la presión diferencial. En el análisis, se observa que estos requisitos se pueden cumplir en la configuración propuesta para un rango de presión entre 817 bar y 15700 bar. La tecnología descrita aquí es, por lo tanto, particularmente adecuada para la medición de grandes presiones; también se puede utilizar para medir la presión en el orden de bares, si son admisibles requisitos de precisión menos estrictos. A continuación, se asume un sensor de límite de presión superior de 900 bar para la estimación de los errores de señal debido a la temperatura, la presión estática, etc. En este rango de presión, la señal del sensor es una función casi exactamente lineal de la presión (diferencial). Las desviaciones de la linealidad están por debajo del 0,32 % de la señal y se pueden corregir fácilmente, si es necesario.

30

35

Errores: Como se ha explicado anteriormente, es una ventaja de la configuración propuesta de que el error de punto  
 5 cero de la presión diferencial, que es causada por la temperatura y por las variaciones de presión estática, se  
 elimina mediante la construcción del sensor. Por lo tanto, solamente la sensibilidad de la señal depende de estas  
 cantidades. Por lo tanto, la presión estática y la temperatura provocan errores que son proporcionales al valor  
 medido; que se pueden dar como un porcentaje del valor medido. Los gradientes de temperatura o diferencias de  
 temperatura entre los dos filtros pueden ser más críticos: conducen a las señales que no pueden distinguirse a partir  
 de una señal de presión diferencial; por lo tanto, los desplazamientos de punto cero y la sensibilidad pueden  
 producirse en la señal de presión diferencial.

10 Los cambios de temperatura promedio afectan a la sensibilidad del sensor, ya que el pico de LED y el borde del filtro  
 tienen un coeficiente de temperatura algo diferente (ver la Tabla 1). Si la temperatura no se compensa, las  
 cantidades máximas de error del 0,5 % del valor medido a una temperatura de 85 °C. Es necesaria una histéresis de  
 temperatura inferior al 0,03 %. La presión estática conduce de manera similar a un error, ya que el filtro de límite se  
 15 desplaza respecto al pico del LED. En este caso, nos encontramos con un error de alrededor del 0,8 %, si la presión  
 estática es igual al límite de presión diferencial superior (900 bar). Todos los errores se han calculado con exactitud,  
 es decir, no se han realizado linealizaciones en los cálculos de errores.

Los errores se pueden reducir, si se realizan mediciones adicionales y correcciones de señal. La medición de la  
 temperatura con una precisión de 1 K permite reducir el error de temperatura del 0,5 % del valor medido a  
 20 aproximadamente el 0,01 % (por lo tanto, cumpliendo la exigencia del 0,03 %). Aún más interesante es la corrección  
 simultánea de la temperatura y el error de la presión estática mediante la medición de la intensidad de luz del LED:  
 si se conoce la potencia incidente de la luz sobre los dos filtros, el error debido a un desplazamiento relativo del filtro  
 y la frecuencia del LED se puede corregir con eficacia: el cambio de la señal de la suma  $I_1 + I_2$  normalizada a la  
 25 entrada de luz es una medida de la diferencia de frecuencia entre el límite de absorción del filtro y el LED. Para el  
 peor de los casos (85 °C y 900 bar al mismo tiempo) se encuentra un error linealizado que es menor que la  
 resolución estimada del sensor.

Se obtiene un efecto similar, si en lugar de un sistema con un único filtro y el campo detector por cámara de presión,  
 se utilizan dos filtros y dos campos detectores con características del filtro ligeramente diferentes (es decir, diferente  
 30 frecuencia límite, véase también la figura 8 descrita más adelante). El uso de la suma y de las diferencias de las  
 señales a continuación, también permite estimar los desplazamientos de frecuencia entre los filtros y el LED.  
 Además, una medición redundante de la presión diferencial (usando una diferencia entre dos filtros dos veces) se  
 puede utilizar para mejorar la resolución de la presión del sensor.

35 Las diferencias de temperatura entre ambos filtros deben ser más bien pequeña para ser insignificante. Para la  
 estructura actual del sensor, las diferencias de temperatura entre los filtros causan una señal de aproximadamente  
 62 bar/K. Esto implica que la diferencia media de temperatura entre los filtros debe ser del orden de  $10^{-3}$  K para  
 garantizar un error por debajo del 0,03 % del límite superior de presión (diferencial) según sea necesario. Diferencias  
 40 típicas de temperatura son, sin embargo, a menudo un orden de magnitud más grande. En consecuencia, el paquete  
 de sensores y/o el diseño del sensor deberán mejorarse para minimizar las diferencias de temperatura, y/o las  
 diferencias de temperatura se miden y se utilizan para la corrección de la señal en consecuencia en estos casos.

Los cambios en la distribución de la luz del LED tienen efectos similares; que pueden ser causados por el  
 movimiento térmico de la estructura mecánica. Una pequeña inclinación de 0,1° ya lleva a un error de la señal de 15  
 45 bar, lo que corresponde al 1,6 % del rango de medición. Esto implica que la fijación del LED será bastante estable.  
 Un bloque de vidrio sólido 14 entre la carcasa del filtro y el LED permite conseguir la estabilidad mecánica requerida  
 del sensor.

Un resumen de los errores estimados en la señal de presión se proporciona en la Tabla 2, en la que URL indica el  
 50 límite superior del rango de la presión diferencial, es decir, en el presente caso, 900 bar.

Tabla 2

<b>Estimaciones de errores para la configuración del sensor propuesta</b>		
<b>Temperatura promedio</b>		
error a 85 °C sin compensación de temperatura	0,45	% de URL
error a 85 °C sin compensación de temperatura	0,01	% de URL
error debido a la ampliación de los picos espectrales con la temperatura	Tamaño desconocido	
<b>Estimaciones de errores para la configuración del sensor propuesta</b>		
<b>Presión estática</b>		
error a 900 bar sin compensación	0,8	% de URL



<b>Temperatura y presión estática promedio</b>		
error con compensación usando la intensidad de la luz LED (peor caso)	< 0,01	% de URL
<b>Diferencia de temperatura entre filtros</b>		
error de punto cero por diferencia de temperatura promedio	62,5	bar/K
<b>Simetría de distribución de la luz LED</b>		
error para inclinación del LED en 0,1 °	15	bar

Análisis detallado:

5 Consideraciones de diseño: En primer lugar, se consideran las ideas para los diseños alternativos de sensores. Se describen diferentes tipos de configuraciones y posibilidades de medición.

10 (i) Medición directa del desplazamiento espectral: El concepto sensor se basa en desplazamiento espectral de las características de absorción de los materiales semiconductores. Los desplazamientos espectrales se pueden medir, en principio, de varias maneras. El uso de un espectrómetro consumiría mucho tiempo y es bastante caro. Los métodos interferométricos requerirían una fuente de luz de gran alcance, tales como un láser o LED superluminiscente.

15 (ii) Uso de diodos láser o láser como fuente de luz: El uso de una fuente de luz monocromática puede aumentar la precisión del dispositivo. Según los cálculos, la exactitud depende de la anchura de la fuente de luz y el filtro. Por lo tanto, la reducción de la anchura de la fuente de luz sólo tiene un efecto limitado sobre la precisión (como máximo un factor de 2). Por otro lado, los láseres monocromáticos son caros.

20 (iii) Diodos en cámara de presión: También es posible tener dos LEDs en las cámaras de presión (utilizando un solo filtro) en lugar de la colocación de dos vidrios de filtro allí. Desde el punto de vista físico, se puede medir un desplazamiento del pico espectral LED con presión o un desplazamiento del límite del filtro; el resultado debe ser el mismo. Como es necesario una simetría estricta entre los dos puntos de medición parece más difícil usar dos LEDs que pueden tener características ligeramente diferentes (incluso si son nominalmente iguales). Además, la conexión de los LEDs a una fuente de alimentación dentro de las cámaras de presión es más exigente.

25 (iv) Separación de cámaras de presión: Sería posible separar las dos cámaras de presión en el espacio y conectarlas a través de la fibra óptica a la fuente de luz y al detector. Sin embargo, se necesita compensación de temperatura: diferentes temperaturas en ambas cámaras de presión provocan errores que exigen su compensación. Además, la estabilidad a largo plazo de la conexión entre las fibras y la división exacta de la intensidad de la luz entrante en dos haces de luz requiere una óptica de alta precisión.

30 (v) Vidrio de filtro como ventana: Es posible fabricar las ventanas de las cámaras de presión del vidrio de filtro directamente (en lugar de utilizar las ventanas de zafiro como en la configuración propuesta). La ventana se somete a continuación a una tensión más complicada que bajo la presión hidrostática; cálculos exactos del estado de tensión son necesarios. Se podría suponer que al igual que el comportamiento de la presión hidrostática, un cambio de la longitud de onda del borde resulta en una aplicación de presión dentro de la cámara de presión. Solamente es necesaria una ventana, si una capa de espejo refleja la luz de fondo desde el interior. La estabilidad de esta configuración frente a la presión es más crítica: el vidrio se rompe bajo una pequeña tensión de sus superficies. Por lo tanto, 8 MPa es un límite razonable para tal construcción.

35 En comparación con estos diseños alternativos, la presente realización preferida de la figura 2 descrita en este documento tiene la ventaja de una mayor simplicidad y una mayor estabilidad frente a variaciones de temperatura.

40 Descripción de la realización propuesta: Una posible configuración experimental se muestra en la figura 2. La luz 2 de un LED 1 se utiliza para controlar la posición espectral del borde del filtro mediante la medición de la transmisión a través del mismo. Dos filtros 3, 4 se colocan en cámaras de presión 5, 6 separadas, donde están expuestas a la presión P1 y P2, respectivamente. La iluminación es totalmente simétrica, es decir, idealmente, la misma cantidad de luz 2 entra en cada filtro 3, 4. La presión diferencial se mide tomando la diferencia de las señales de transmisión en el detector 7 y 8. Para compensar el error causado por la temperatura y la presión estática, una señal de referencia, por ejemplo, la intensidad del LED, se puede obtener de forma adicional. El detector para la señal de referencia no se muestra en la figura 2. La configuración se construye preferentemente tan pequeña como sea posible para mantener los errores causados por gradientes de temperatura en un mínimo.

45 Configuración del sensor, paquete y geometría del sensor: Un bosquejo en vista lateral y vista desde arriba de la configuración se muestra en las figuras 3 a) y b). Debido a la simetría se dibujan sólo partes del paquete de sensores. Sólo las dimensiones relativas de los dibujos son importantes. El sensor también se puede escalar hacia abajo para mantener los errores de gradiente de temperatura pequeños.

Como se ha señalado anteriormente, el sensor consiste en dos cámaras de presión 5, 6 independientes, cada una de las cuales contiene una losa de filtro sensor 3, 4. Consideraciones de estabilidad y de tensión sugieren que la cámara de presión 5, 6 se realice mejor mediante una carcasa metálica con ventanas de zafiro 9. La conexión entre el zafiro 9 y el metal 10 se puede hacer mediante soldadura dura. El líquido de transducción de presión es aceite de silicona 12, que puede entrar en la cámara de presión a través de una pequeña perforación 12 en el lado de la cámara de presión. A partir de las consideraciones de señal y ruido es deseable obtener la mayor cantidad de luz del LED 1 sobre el detector como sea posible. Por lo tanto, el patrón de radiación angular del LED, que es diferente para diferentes tipos de diodos, su distancia a las ventanas 9 y al área del detector debe optimizarse para obtener una señal grande. Además, es importante darse cuenta de una posición fija definida del LED 1 con respecto a las cámaras de presión 5, 6, ya que la señal da la diferencia de la transmisión de la mitad izquierda y derecha del diagrama de radiación del LED, respectivamente. En el paquete propuesto, el espaciador del LED es un bloque de vidrio 14 fijo en la carcasa de la cámara de presión 10. El LED 1 se puede pegar en el cuerpo de vidrio 14.

Fuente de luz: Aquí, se elige un diodo emisor de luz (LED) convencional para monitorizar el desplazamiento espectral inducido por la presión de la absorción. Los parámetros clave son: longitud de onda máxima, anchura espectral, coeficiente de temperatura, y patrón de emisión angular. El LED se debe seleccionar de tal manera que se consigue un solapamiento espectral óptimo con el filtro y que el coeficiente de temperatura es cercano al del filtro. El ancho típico de un espectro de LED es  $FWHM =$  de 15-40 nm. El coeficiente de temperatura de la longitud de onda pico es típicamente entre:  $0,10 < K_T < 0,14$  nm/K (Osram Semiconductors). Además, un factor de tres valores inferiores y superiores se puede encontrar para algunos LEDs reportados en la literatura. Además, dependiendo del diseño geométrico del sensor debe seleccionarse la característica óptima de radiación angular. El ajuste a las dimensiones de nuestra configuración hemos elegido un LED con un ángulo total de  $60^\circ$  (Osram Semiconductors, LA E655).

Consumo de energía: Para reducir el consumo de energía del LED y para lograr la detección óptima de la señal, el LED 1 se modula mediante un circuito oscilador. Para los estudios preliminares se utilizó una frecuencia de oscilación de 10 kHz con un ciclo de trabajo de 1:10 (corriente de funcionamiento: 10 mA a 3 V). Esto conduce a una potencia media de 3 mW. Esto permite el uso de una fuente de alimentación de 4-20 mA de dos cables para el dispositivo.

Sistema de Detección: Los diferentes componentes de la unidad de detección contienen diferentes fuentes de ruido que pueden describirse por separado. El fotodiodo contribuye al ruido de disparo (corriente de fotografía y corriente de oscuridad), el ruido (térmico) de resistencia de retroalimentación Johnson, y el amplificador contribuye con su ruido de corriente de entrada y el ruido de tensión de entrada.

A continuación, se da la SNR de un ejemplo concreto, usando los parámetros del dispositivo realista anterior y teniendo en cuenta la disposición geométrica aproximada del sensor. Con una potencia óptica asumida en el fotodiodo de aproximadamente  $20 \mu W$ , que corresponde a una corriente de foto de  $I_{ph} = 10 \mu A$ , el ruido total (óptico) de potencia equivalente es  $5,1 \text{ pW Hz}^{-1/2}$ . Midiendo un ancho de banda de  $\Delta F = 1 \text{ kHz}$ , se obtiene una relación de señal-ruido de  $SNR = 1,2 \cdot 10^5$ . Vale la pena distinguir dos regímenes: Para fotocorrientes bajas, la SNR es proporcional a  $I_{ph}$ , mientras que para altas fotocorrientes  $SNR \sim I_{ph}^{1/2}$ .

Modelos de sensores y estimaciones de rendimiento, modelo de sensor analítico:

Características de la fuente de luz: Es razonable aproximar la distribución espectral del LED mediante una distribución de Gauss.

Filtro de nanocristales semiconductores: Se utilizan compuestos de nanopartículas de vidrio en diversas aplicaciones, por ejemplo, en filtros de color. Por lo general, se componen de partículas de  $CdS_{1-x}Se_x$  o CdTe de dimensión de aproximadamente 5 nm que están incrustados en una matriz de borosilicato. Como ejemplo, filtros de color de Schott están hechos de tales materiales (filtros GG-, Og-, RG-). Las propiedades ópticas, tales como la posición del borde de absorción, se pueden adaptar mediante la variación de la fracción de volumen de los materiales de nanocristales y el tamaño de los nanocristales. El tamaño puede controlarse mediante un simple tratamiento de calentamiento del cristal del filtro utilizando temperaturas de entre 800 a 1.300 K. Para los cálculos de la transmisión a través de material compuesto de nanocristales de vidrio, la función de filtro es aproximada, utilizando la función de error erf (x).

La figura 4 muestra la función de filtro  $T(\lambda)$  equipada con las características de un filtro disponible comercialmente (Schott RG630,  $d = 1,8 \text{ mm}$ ). La función de filtro está equipada con las características de nanocristales dopados con filtro de vidrio (RG630,  $d = 1,8 \text{ mm}$ ), y los parámetros de ajuste son  $\lambda_0 = 625,5 \text{ nm}$ ,  $\sigma_F = 19,08 \text{ nm}$ . Obviamente, la función de error 17 es adecuada como una aproximación de la función de filtro real 18. La transmisión del filtro depende también del espesor del filtro d. Para la incidencia perpendicular y la absorción homogénea, la ley de Bouguer y Lambert determina la transmisión (definiciones de filtros de vidrio Schott). La figura 5 ilustra las curvas de transmisión para varios espesores junto con el ajuste.

Rango de presión y sensibilidad, señal del sensor y sensibilidad a la presión

La configuración descrita anteriormente utiliza dos cámaras de presión 5, 6; dos intensidades  $I_1$  y  $I_2$  se miden para determinar la presión diferencial. Puede parecer que la configuración se compone principalmente de dos mediciones de presión absoluta independientes (una para cada cámara) y que un sensor de presión absoluta podría realizarse con un único sensor de presión. Este no es el caso; incluso para un sensor de este tipo, una segunda cámara es necesaria.

Esto se puede ver de la siguiente manera: la dependencia de la temperatura de la señal es grande en comparación con la dependencia de la presión ( $K_{T,F} (T_{max} - T_{ref}) > K_p \rho_{max}$ , para  $K_{T,F} = 0,15 \text{ nm/K}$ ,  $T_{max} - T_{ref} = 65 \text{ K}$ ,  $K_p = 0,0024 \text{ nm/bar}$ , y  $\rho_{max} = 900 \text{ bar}$ , en el que  $K_{T,F}$  es el coeficiente de temperatura de la función de error del filtro, y  $K_p$  es el coeficiente de presión de la función de error del filtro). Usando una sola célula, los efectos de la temperatura desplazarán el cero del sistema, y es difícil de compensar este cambio. Por lo tanto, es necesaria una compensación de temperatura.

El uso de dos cámaras permite no utilizar las intensidades individuales, sino más bien su diferencia (o la proporción dividida por la suma) como la señal a analizar. Usando las ecuaciones para las intensidades medidas en los detectores y suponiendo que las temperaturas en ambos filtros son las mismas, es fácil ver que la diferencia  $I_1 - I_2$  para presión diferencial  $\Delta p = 0$  en efecto desaparece. Además, la señal de la diferencia es monótona en  $\Delta p$ . Para pequeñas presiones diferenciales, se puede hacer una expansión en serie en la presión diferencial; para primero ordenar, se obtiene

$$I_1 - I_2 \approx \exp\left(\frac{\lambda_T - K_p \Sigma_p}{\sigma_L^2 + \sigma_F^2}\right) \frac{K_p}{\sqrt{\pi(\sigma_L^2 + \sigma_F^2)}} \cdot \Delta p$$

$$= S(T, \Sigma_p) \cdot \Delta p$$

donde

$$\lambda_T = \lambda_0(T_{ref}) - \overline{\lambda_0}(p_{ref}, T_{ref}) + (K_{T1,L} - K_{T,F})(T - T_{ref})$$

donde  $\lambda T$  = diferencia de longitud de onda de longitud de onda máxima y longitud de onda LED del borde de absorción del filtro (a la presión de referencia) como una función de la temperatura del sensor linealizado,  $K_p$  = coeficiente de presión de la función de error de filtro,  $\Sigma_p$  = presión estática,  $\sigma_L^2$  = varianza de gaussiana del espectro de LED,  $\sigma_F^2$  = ancho de función de error erf (= varianza de la primera derivada de la función de error que describe el filtro de absorción espectral),  $S$  = sensibilidad del sensor de presión diferencial,  $\lambda_0$  = posición de longitud de onda máxima del espectro LED,  $T_{ref}$  = temperatura del sensor de referencia,  $p_{ref}$  = presión de referencia,  $\lambda_0(\text{discontinua})$  = longitud de onda del borde de absorción del filtro,  $K_{T1,L}$  = coeficiente de temperatura de longitud de onda pico del LED,  $K_{T,F}$  = coeficiente de temperatura del borde de absorción (borde de absorción que se define por el valor de transmisión del 50 % de la función de error) del filtro,  $T$  = temperatura del sensor (que se supone idéntica para el LED y el filtro).

Aquí, la sensibilidad  $S$  se define con respecto a la presión diferencial. Usando las especificaciones anteriores, llegamos a sensibilidades típicas de  $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ /bar}$ . Debe tenerse en cuenta que la sensibilidad depende de la temperatura y de la presión estática; el cero de la señal no depende de estas cantidades (como se desea).

La cantidad  $(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$ , alternativamente, se puede utilizar como una señal; una ecuación similar que define la sensibilidad a la presión diferencial que puede derivarse también para este caso.

La señal  $(I_1 - I_2)$  como una función de  $\Delta p$  se representa en condiciones de referencia para un caso típico en la figura 6. Como se puede ver, la señal es más bien lineal para los rangos típicos de la medición de la presión. Para presiones muy grandes (fuera de los rangos deseados) la no linealidad de la señal se vuelve claramente visible; en este caso, la aproximación lineal ya no es válida. Sin embargo, como se conoce la dependencia de la señal de la presión diferencial, la corrección de la no linealidad plantea en principio no es ningún problema.

Determinación de los intervalos de presión:

Para una evaluación de ciertas aplicaciones de alta sensibilidad, la resolución requerida de la presión diferencial se supone que es de aproximadamente  $10^{-5}$  en condiciones de referencia (curva a modo de v 27 en la figura 7). Suponemos que el filtro y el LED se ajustan idealmente. La resolución del sensor de presión a una señal dada se determina por la relación de señal y ruido del detector y la pendiente de la curva de la señal (sensibilidad) como una

función de la presión: En aproximación lineal, la resolución de presión  $Res$  o  $\Delta p_{res}$  a una presión diferencial dada  $\Delta p$  viene dada por la inversa de la sensibilidad  $s$  multiplicada con la relación de señal y ruido de la configuración de la detección. En la figura 7, la resolución de la presión  $Res$  o  $\Delta p_{res}$  (en Pascales) se representa como una función de la presión diferencial  $\Delta p$  (en Pascales) por la curva en forma de  $u$  (cuasi-parabólica) 28.

5 Se elegirá el intervalo de presión para el sensor en este caso de alta sensibilidad, de modo que se cumple una resolución relativa requerida, preferiblemente de  $10^{-5}$ . Para encontrar el rango de presión, se muestra la curva adicional 27 en la figura 7, que representa el objetivo de la resolución relativa de  $10^{-5}$ . El rango de presión (es decir, el rango de límites de presión admisibles superiores) que satisfacen este requisito debe cumplir dos condiciones: (i) para el límite de presión superior, la resolución tiene que ser menor que  $10^{-5}$ , es decir, la curva 28 tiene que estar por debajo de la curva 27; esto significa que el límite de presión superior puede ser elegido entre los dos puntos de intersección de las curvas 27 y 28, es decir, entre 817 bar y 15700 bar; (ii) para todas las presiones menores que este límite, la resolución no podrá ser superior a  $10^{-5}$  veces el límite superior de presión. Esta segunda condición se cumple automáticamente con presiones diferenciales descendentes  $\Delta p$ . En el presente caso, el límite superior de presión se puede elegir entre 817 bar y 15700 bar.

Compensación usando un sistema de filtro de división:

20 En lugar de la medición directa de la intensidad del LED, el uso de un sistema con cuatro filtros también es posible: cada una de las dos cámaras 5, 6 contiene dos filtros diferentes  $F_A$  y  $F_B$ , respectivamente, como se muestra en la figura 8. Un detector de cuatro cuadrantes mide cuatro intensidades diferentes ( $I_1$  e  $I_3$  para la cámara 5,  $I_2$  e  $I_4$  para la cámara 6). Los filtros A y B se caracterizan por una longitud de onda de borde diferente o de borde de absorción.

25 Esta configuración permite, por una parte, tener dos mediciones independientes de diferencias de señal y, por lo tanto, de la presión diferencial. Esto aumenta la resolución y permite el uso del sensor de presión diferencial para rangos más pequeños. Por otro lado, por ejemplo, la cantidad  $(I_1 + I_2)/(I_3 + I_4)$  se puede utilizar para caracterizar los cambios de la temperatura y de la presión estática de una manera similar a la medición de la intensidad que se describió anteriormente. Como se utiliza un único diodo detector (dividido), el coste adicional es menor que para la configuración descrita anteriormente. Un cálculo similar para el cálculo en la sección anterior conduce a una estimación de error relativa máxima del 0,0035 % para la presión diferencial, donde además el error es una función casi lineal del desplazamiento de longitud de onda.

Lista de números de referencia

35

1	fuelle de luz, LED
2	haz de luz
3	primer filtro
4	segundo filtro
40	5 primera cámara de presión
	6 segunda cámara de presión
	7 primer detector
	8 segundo detector
	9 placas de zafiro
45	10 elementos de marco
	11 nervio de 10
	12 abertura de presión llena de aceite de silicona
	13 plano de simetría
	14 bloque de vidrio
50	15 desplazamiento de alta frecuencia o desplazamiento azul de filtro
	16 sensor de presión
	17 curva de ajuste
	18 curva medida de RG 630, $d = 1,8$ mm
	19-24 curvas medidas para espesores de 0,1, 0,3, 1, 3, 10, 30 mm, respectivamente
55	25 intervalo de medición típica
	26 intervalo máximo de medición
	27 valor objetivo de la resolución de presión diferencial
	28 resolución de presión calculada
	30 cavidad de la cámara de presión
60	p1 presión que actúa sobre la primera cámara de presión
	p2 presión que actúa sobre la segunda cámara de presión
	L espectro de fuente de luz
	F curva de filtro
	$F_A, F_B$ tipos de filtros A, B con diferentes bordes de absorción
65	Tr curva de transmisión

$I_1, I_2$  intensidad medida en el primer y segundo detectores  
 $\theta_1, \theta_2$  ángulos de contorno de las características de emisión de luz, ángulos de contorno del cono de luz  
 $W, d, l$  anchura del filtro, espesor, longitud  
 $h$  espesor de las cámaras de presión

5

## REIVINDICACIONES

1. Sensor de presión (16) con al menos un elemento sensor de presión (3, 4), cuyos cambios inducidos por la presión en las propiedades ópticas se leen mediante iluminación (2) con al menos una fuente de luz (1),  
 5 **caracterizado por que**  
 el sensor de presión (16) comprende al menos dos elementos sensores de presión (3, 4) colocados en cámaras de presión individuales (5, 6), cuyos elementos sensores (3, 4) están dispuestos esencialmente cerca o adyacentes entre sí y se irradian con la misma fuente de luz (1), donde la luz transmitida a través de los elementos sensores (3, 4) depende de la presión y se detecta usando al menos dos detectores correspondientes (7, 8), y donde la presión  
 10 diferencial en las dos cámaras de presión (5, 6) se evalúa en base a la salida de estos detectores (7, 8), donde además  
 los al menos dos elementos sensores de presión (3, 4) son elementos de filtro (3, 4) con un borde de absorción que está espectralmente desplazado por la influencia de una presión externa,  
 la fuente de luz (1) es un diodo emisor de luz (1),  
 15 la fuente de luz (1) tiene una anchura espectral del orden de la anchura de los bordes de absorción de los al menos dos elementos sensores de presión (3, 4) o más pequeña, y  
 los elementos de filtro (3, 4), que tienen cada uno una frecuencia de borde, y el diodo emisor de luz (1), que tiene una posición de longitud de onda de pico, se eligen para tener desplazamientos similares de la frecuencia de borde y la posición de longitud de onda de pico como una función de la temperatura.
- 20
2. Sensor de presión según la reivindicación 1, donde los dos elementos sensores de presión (3, 4) están dispuestos cerca el uno del otro o borde a borde, ya sea en un plano o con un ángulo de inclinación hacia el otro de menos de 180°, preferiblemente de más o igual a 90°, cuyo ángulo se adapta a las características de emisión de luz de la fuente de luz (1), y donde la fuente de luz (1) está dispuesta en un lado de los elementos sensores de presión (3, 4) e irradia los elementos sensores de presión (3, 4) en condiciones ópticas comparables, preferentemente idénticas.
- 25
3. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el sensor de presión comprende un plano de simetría (13) que separa el espacio en dos espacios medios, estando colocada la fuente de luz (1) esencialmente en el plano de simetría (13) y los elementos sensores de presión (3, 4) están colocados en cualquiera de los espacios medios, estando dispuestos preferiblemente en posiciones mutuamente simétricas en cualquiera de los espacios medios.
- 30
4. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde entre los elementos sensores de presión (3, 4) y la fuente de luz (1) se proporciona un bloque esencialmente transparente ópticamente, preferiblemente un bloque de vidrio (14), a través del cual la iluminación (2) pasa desde la fuente de luz (1) a los elementos sensores de presión (3, 4), donde la fuente de luz (1) está fijada o integrada en dicho bloque (14), y donde los elementos sensores de presión (3, 4) y/o las cámaras de presión (5, 6) están fijados o integrados en dicho bloque (14).
- 35
5. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde cada cámara de presión (5, 6) comprende al menos un elemento de marco (10) que sujeta al menos dos ventanas (9) separadas esencialmente transparentes ópticamente, una de las cuales está frente a la fuente de luz (1) y la otra frente al detector (7, 8), donde el espacio intermedio entre las dos ventanas (9) forma la cavidad (30) de la cámara de presión (5, 6), que a excepción de una abertura de detección de presión (12) está protegida de la presión circundante, y donde los elementos sensores de presión basados en semiconductores (3, 4) están dispuestos dentro de la cavidad (30), y donde preferiblemente se proporciona aceite en la cavidad.
- 40
- 45
6. Sensor de presión según la reivindicación 5, donde las ventanas (9) son ventanas de zafiro, y donde las dos cámaras de presión (5, 6) están dispuestas en el mismo plano.
- 50
7. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los dos elementos de filtro (3, 4) están colocados en las cámaras de presión separadas (5, 6), donde están expuestos a presiones  $p_1$  y  $p_2$ , respectivamente, y la iluminación es completamente simétrica tal que la misma cantidad de luz (2) entra en cada elemento de filtro (3, 4).
- 55
8. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los elementos sensores de presión (3, 4) son una matriz de vidrio, preferiblemente hechos de vidrio de borosilicato, que comprende nanocristales semiconductores incrustados, o es un cristal semiconductor a granel, o se basan en un cristal fotónico.
- 60
9. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde, además, está presente un detector de intensidad para la medición de la intensidad de la fuente de luz (1) sin atenuación a través del elemento(s) sensor(es) de presión (3, 4), y/o donde además, está presente un detector de detección de temperatura, teniéndose en cuenta la salida de uno o ambos de estos detectores para compensar aquellos desplazamientos espectrales en la salida de los detectores (7, 8) que estén perturbando la medición de la presión diferencial.
- 65

10. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde al menos dos pares de elementos sensores de presión (3, 4) se irradian mediante dicha misma fuente de luz (1).
- 5 11. Sensor de presión según la reivindicación 10, donde los al menos dos pares de elementos sensores de presión (3, 4) tienen un borde de absorción de filtro diferente, donde preferiblemente se proporcionan dos elementos sensores de presión diferentes en la misma cámara de presión (5, 6).
- 10 12. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los detectores (7, 8) están midiendo la intensidad integrada total dentro de un cierto rango espectral, y donde preferiblemente los detectores (7, 8) son diodos detectores.
- 15 13. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los elementos de filtro (3, 4), pero no el diodo emisor de luz (1), están situados dentro de la respectiva cámara de presión (5, 6), y ninguna conexión eléctrica se introduce en la zona presurizada.
- 20 14. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la señal evaluada para la medición de la presión es la diferencia de las dos señales del detector, la diferencia dividida por la suma de las dos señales, u otra relación corregida por otras señales, tales como por una señal de medición de la temperatura.
- 25 15. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la luz (2) se refleja mediante al menos un espejo y se propaga al menos dos veces a través de los elementos sensores de presión (3, 4), con la fuente de luz (1) y los detectores (7, 8) estando situados en los mismos lados de los elementos sensores de presión (3, 4).
- 30 16. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los elementos sensores de presión (3, 4) están unidos a o son parte integrante de un elemento de ventana (9) de las cámaras de presión (5, 6).
- 35 17. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la fuente de luz (1) es una fuente de luz monocromática que tiene una frecuencia fija.
- 40 18. Sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, donde la fuente de luz (1) es una fuente de luz monocromática que tiene una frecuencia ajustable para permitir el análisis espectral del límite de absorción de los elementos sensores de presión (3, 4).
- 45 19. Método para la detección de una presión usando un sensor de presión (16) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, con al menos un elemento sensor de presión (3, 4), cuyos cambios inducidos por la presión en las propiedades ópticas son evaluados por la iluminación (2) con al menos una fuente de luz (1), donde se utilizan al menos dos elementos sensores de presión (3, 4) basados en semiconductores o basados en cristales fotónicos dispuestos en cámaras de presión individuales (5, 6) y, esencialmente, dispuestos cerca o adyacentes entre sí, cuyos elementos sensores (3, 4) se irradian mediante la misma fuente de luz (1), donde la luz transmitida a través de los elementos sensores (3, 4) se detecta usando al menos dos detectores (7, 8) correspondientes, y donde la presión diferencial en las dos cámaras de presión (5, 6) se evalúa en función de la salida diferencial de estos detectores (7, 8), basado en la salida de la suma de estos detectores (7, 8), basado en la relación de las salidas de estos detectores (7, 8), o basado en una combinación de los mismos.
20. Uso de un sensor de presión según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 18 para la medición de diferencias de presión superiores a 500 bar, preferiblemente por encima de 800 bar hasta 20000 bar.

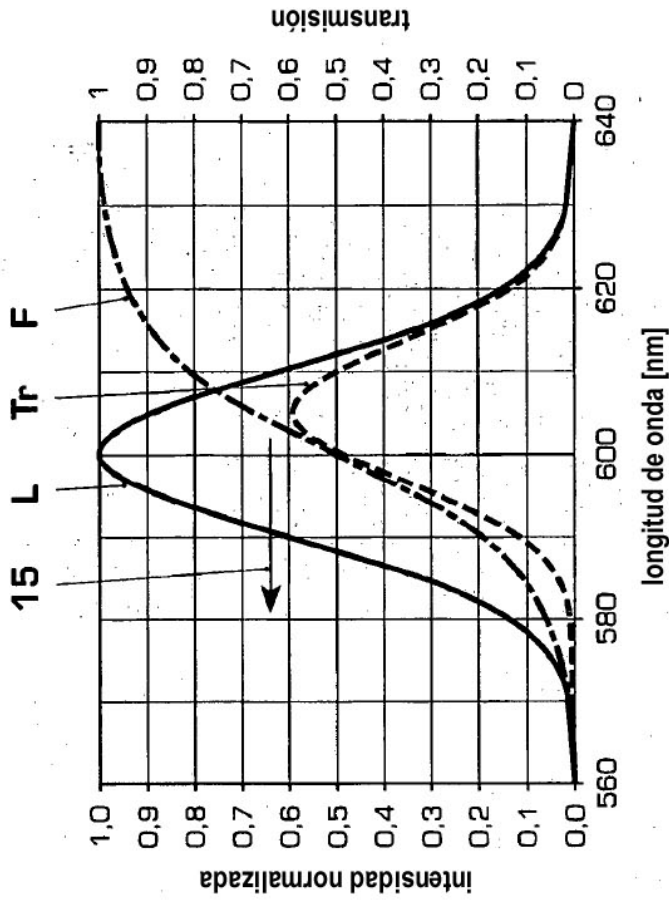
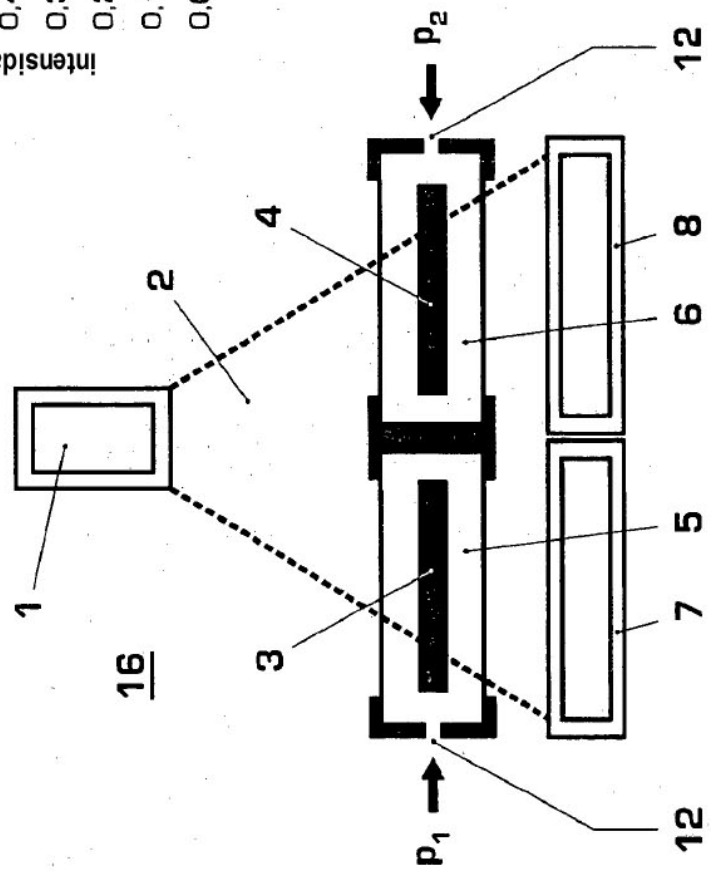


FIG. 1

FIG. 2





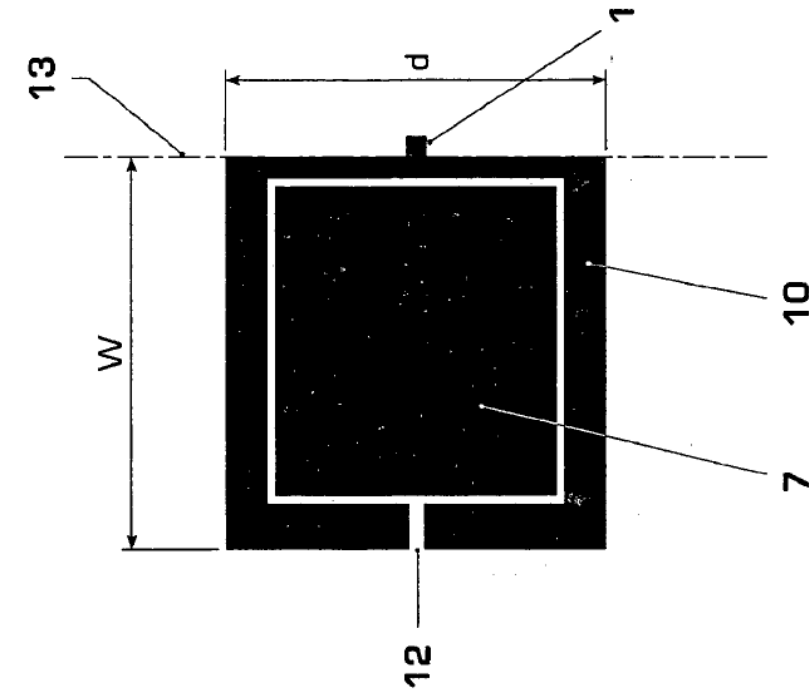


FIG. 3a

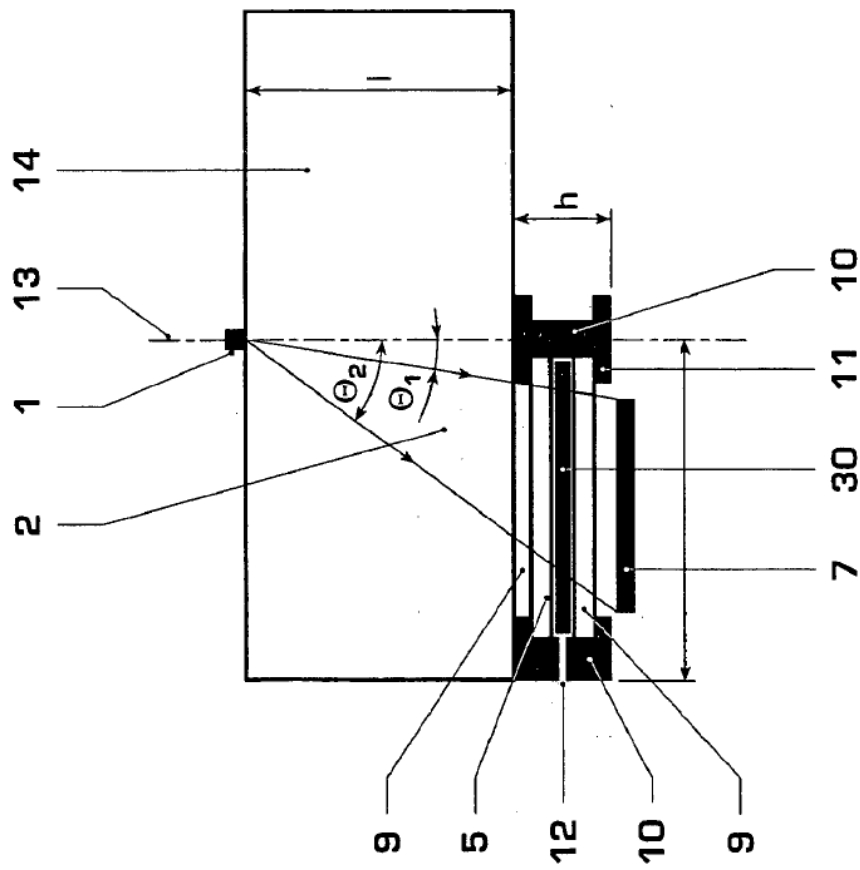


FIG. 3b

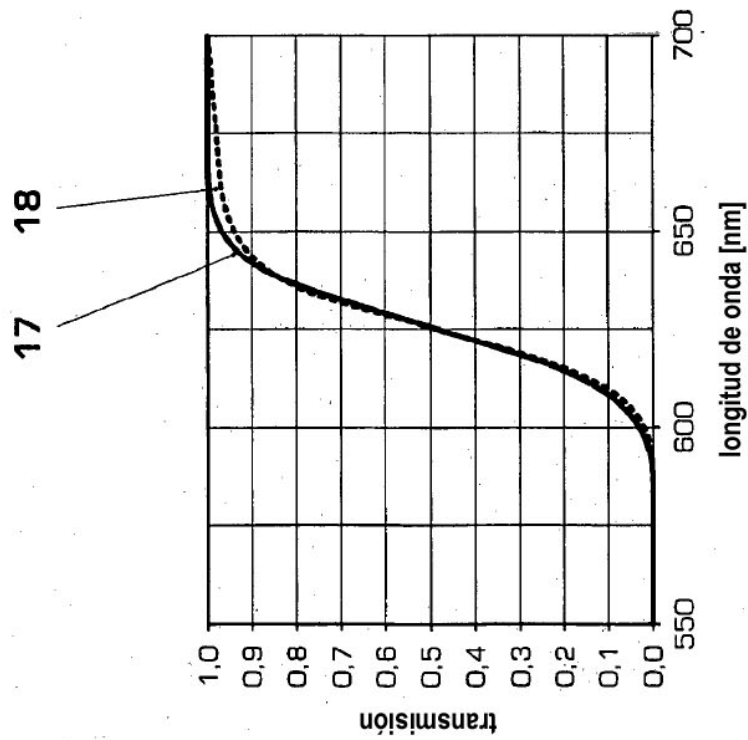
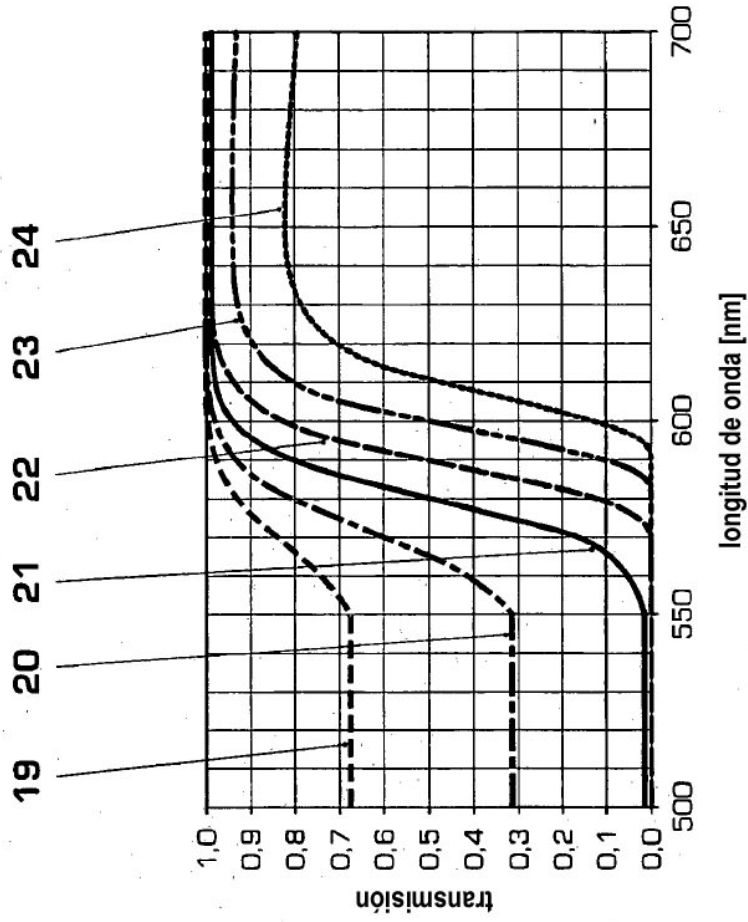


FIG. 5

FIG. 4

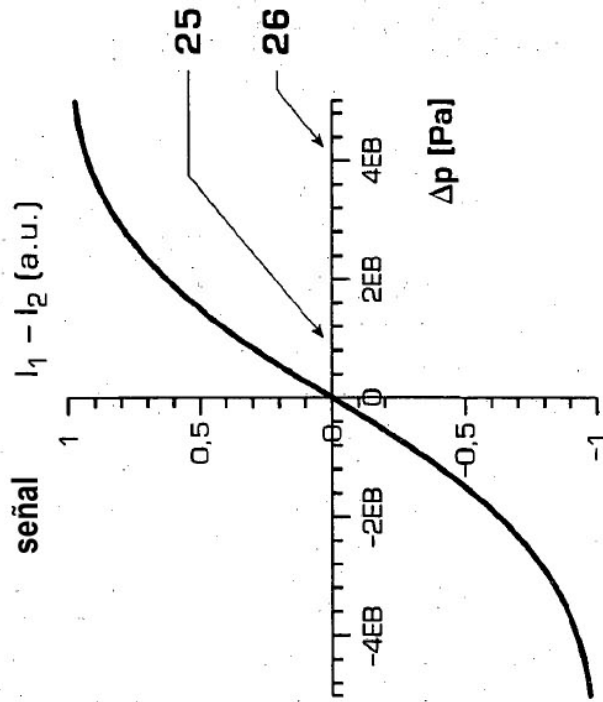


FIG. 6

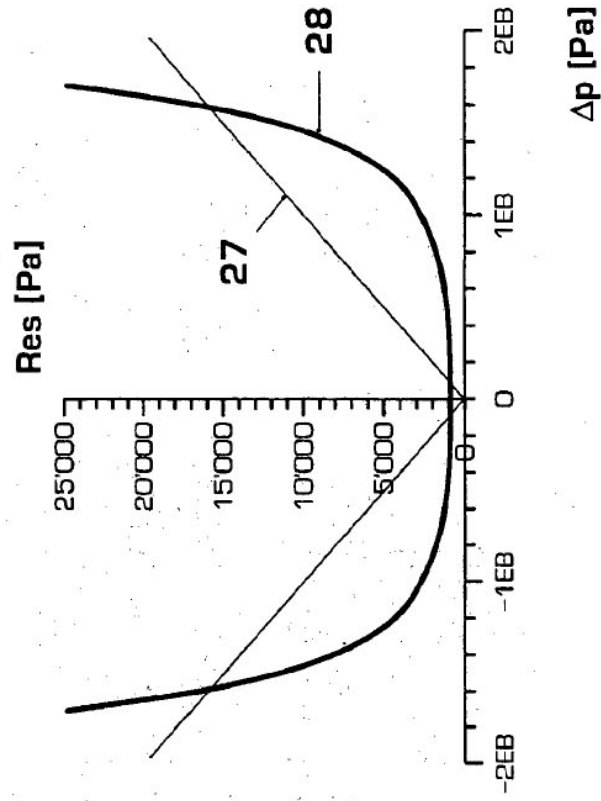


FIG. 7

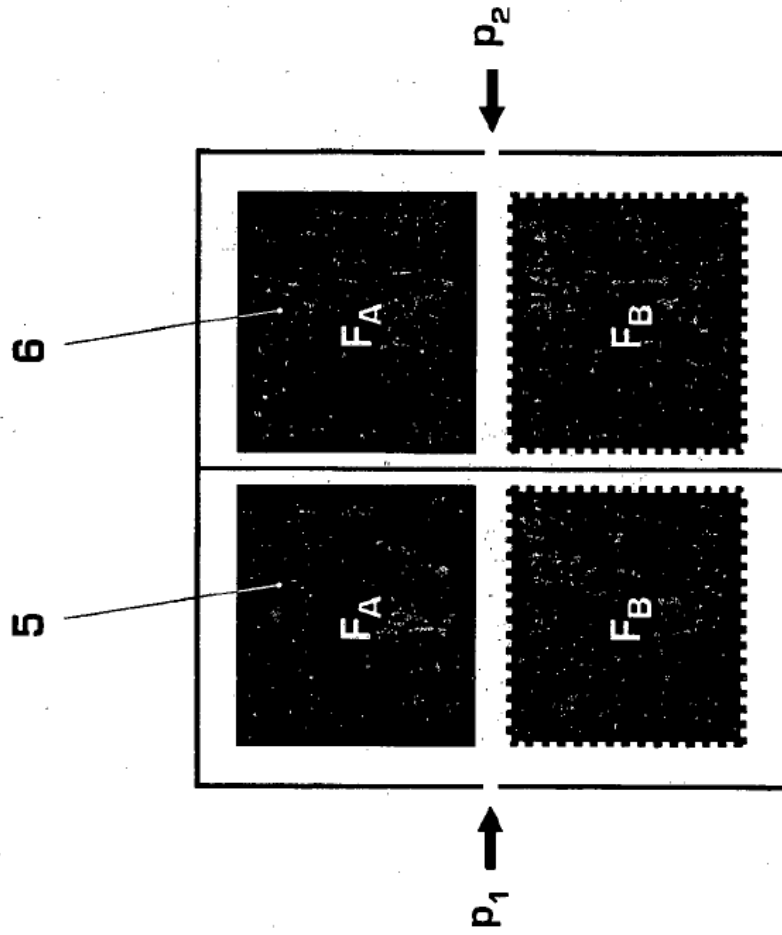


FIG. 8