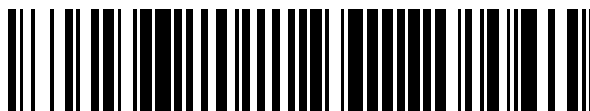


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 502 517**

51 Int. Cl.:

**G01L 9/00** (2006.01)

**G01Q 30/14** (2010.01)

**G01Q 40/00** (2010.01)

**G01Q 60/38** (2010.01)

**G01F 1/20** (2006.01)

**G01F 1/32** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.01.2008 E 08701983 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.05.2014 EP 2109760**

54 Título: **Medición de velocidad de flujo y de presión usando un dispositivo de viga en voladizo vibratorio**

30 Prioridad:

**15.02.2007 GB 0702965**

**23.05.2007 GB 0709880**

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

**03.10.2014**

73 Titular/es:

**THE UNIVERSITY COURT OF THE UNIVERSITY  
OF ST. ANDREWS (100.0%)  
College Gate, North Street  
St. Andrews Fife KY16 9AJ, GB**

72 Inventor/es:

**HAEHNER, GEORG y  
LUBARSKY, GENNADY**

74 Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

**ES 2 502 517 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

Medición de velocidad de flujo y de presión usando un dispositivo de viga en voladizo vibratorio

- 5 La presente invención se refiere a la caracterización y el uso de dispositivos de viga en voladizo, en particular de vigas en voladizo para su uso en la microscopía de fuerza atómica.

### Antecedentes de la invención

- 10 Los cabezales de detección con viga en voladizo se usan en la microscopía de fuerza atómica (AFM, *Atomic Force Microscopy*) para detectar y medir las fuerzas entre el cabezal de detección y una superficie. Esto comporta, en general, realizar una exploración del cabezal de detección a lo largo de una superficie y medir su deflexión. La deflexión del cabezal de detección puede usarse para investigar la topografía de la superficie. Esta también puede usarse para medir las fuerzas que actúan sobre el cabezal de detección tal como las fuerzas que se ejercen sobre la
- 15 punta por la superficie, fuerzas electrostáticas y fuerzas capilares. Con el fin de medir tales fuerzas usando esta técnica, es necesario conocer la constante de resorte del cabezal de detección con viga en voladizo. Las imprecisiones en la determinación de la constante de resorte pueden conducir a unos errores no aceptables en la medición de fuerza resultante.

- 20 La constante de resorte de los cabezales de detección con viga en voladizo puede medirse mediante diversos métodos que incluyen el cálculo teórico, aplicar una masa conocida para desviar de forma estática el cabezal de viga en voladizo, desviar el cabezal con viga en voladizo con otro cabezal con viga en voladizo que tiene una constante de resorte conocida y mediante la determinación de la frecuencia resonante o bien en el vacío o en un baño estático de líquido. Un resumen de los métodos de calibración de la técnica anterior se da en "*Calibration of Atomic Force*
- 25 *Microscopy Cantilevers*" de J E Sader en "*Encyclopaedia of Surface and Colloid Science*", publicado por Marcel Dekker Inc Nueva York [2002] página 846.

- Estos métodos de la técnica anterior tienen unos problemas variables. Por ejemplo, en donde se aplica una fuerza usando un peso calibrado u otra viga en voladizo, la punta de la viga en voladizo puede sufrir daños. Esto es
- 30 particularmente poco ventajoso cuando se usa un cabezal de sonda de viga en voladizo revestida. Esto es de aplicación, por ejemplo, a las sondas que tienen un revestimiento de bio-película tal como las que se usan a menudo en AFM para la investigación biomédica. Puede tener lugar un deterioro de sonda adicional cuando la sonda no puede calibrarse *in situ* y ha de moverse, calibrarse y volver a instalarse.

- 35 Otra desventaja de determinados métodos conocidos es que estos pueden usarse solo con unas configuraciones de viga en voladizo específicas, tal como solo para los cabezales de vigas en voladizo rectangulares. Otras desventajas de los métodos de la técnica anterior incluyen que estos son complicados o difíciles de realizar o dan como resultado imprecisiones debido a las suposiciones realizadas o comportan la necesidad de medir con precisión otras propiedades tales como la masa, el volumen, el perfil o la densidad de la viga en voladizo. Pueden introducirse
- 40 imprecisiones adicionales por la medición de la constante de resorte en un medio inapropiado tal como aire o vacío.

- El documento US 2002/092340 A1 describe un sistema de agrupación de sensores de viga en voladizo para detectar y medir la presencia de sustancias objetivo en diversas condiciones ambientales. El documento US 2006/075836 describe un sensor basado en viga en voladizo para medir una señal de entrada. No obstante, no hay divulgación
- 45 alguna en ninguno de estos documentos de un sistema adecuado para la determinación de la constante de resorte de una viga en voladizo.

- El documento US 2002162388 describe un método para calibrar la sensibilidad de las vigas en voladizo. En un ejemplo, la viga en voladizo se mueve a través de un fluido en la dirección z y se mide la deflexión de viga en
- 50 voladizo que resulta de la fuerza de arrastre. En una realización alternativa, la fuerza de arrastre se sustituye por una fuerza causada por un flujo de fluido inducido perpendicular con respecto a la viga en voladizo.

### Sumario de la invención

- 55 De acuerdo con un primer aspecto de la invención, se proporciona un dispositivo de medición tal como se define en la reivindicación 1. En las reivindicaciones dependientes se definen algunas características preferidas.

- Al alinear la viga en voladizo en paralelo con la dirección de flujo, se minimiza cualquier flexión de viga en voladizo debido a la contribución de la fuerza de arrastre. Además, disponer el sistema de esta forma permite que la viga en
- 60 voladizo sea sensible solo a la componente estática de la presión ejercida por el fluido. En consecuencia, la viga en voladizo es sensible al gradiente de fuerza debido al flujo. Esta configuración permite que la calibración de viga en voladizo se realice en flujos de alta velocidad y/o de alta viscosidad sin riesgo alguno de daño.

- El dispositivo de medición puede tener unos medios para medir la frecuencia de vibración de la viga en voladizo. Los
- 65 medios para medir la frecuencia de vibración de la viga en voladizo pueden estar adaptados para medir la frecuencia resonante de la viga en voladizo. Los medios para medir la frecuencia de vibración de la viga en voladizo pueden

incluir un láser adaptado para reflejarse en la viga en voladizo o un elemento piezoeléctrico o ser un sensor capacitivo.

5 El dispositivo de medición puede estar provisto con unos medios de medición, y/o de provisión de flujo de fluido a una presión y/o una caída de presión y/o una velocidad de fluido aplicadas conocidas. El dispositivo de medición puede estar adaptado para usar esa presión y/o caída de presión y/o velocidad de fluido aplicadas conocidas junto con por lo menos una medición de frecuencia resonante para determinar la constante de resorte de la viga en voladizo. Esto permite que la viga en voladizo se calibre sin contacto entre la misma y un peso sólido u otro dispositivo de aplicación de fuerza. Por lo tanto, puede minimizarse el daño a la viga en voladizo, en especial a aquellas revestidas con una bio-película.

10 El dispositivo de medición puede estar adaptado para determinar la presión y/o la caída de presión y/o la velocidad aplicadas del fluido usando por lo menos una medición de frecuencia resonante.

15 La viga en voladizo puede ser de cualquier conocida en la técnica, pero preferiblemente es rectangular y/o tiene forma de v. La viga en voladizo puede extenderse a partir de una montura. La viga en voladizo puede extenderse hasta cualquier longitud pero preferiblemente entre 10 y 400  $\mu\text{m}$  en perpendicular a partir de la montura.

20 El canal puede estar conformado para proporcionar un flujo laminar. Las paredes del canal pueden ser lisas.

25 El canal puede definir una abertura para recibir un flujo de fluido y una abertura en la que la viga en voladizo se encuentra con la montura. La mínima longitud del canal entre estas dos aberturas puede corresponderse con la longitud de entrada hidrodinámica L con el fin de conseguir el perfil de velocidades completamente desarrollado en la región de abertura de viga en voladizo. La altura de la cavidad puede optimizarse para conseguir el máximo de sensibilidad de distribución y depende del fluido de calibración. La anchura del canal puede depender del tamaño de la montura de viga en voladizo y es variable.

30 El fluido puede seleccionarse y/o el canal adaptarse de tal modo que el número de Knudsen sea de menos de 0,01. Mediante la provisión de un canal que tiene una relación de la longitud con respecto a la altura en este intervalo y/o que está adaptado para lograr un número de Knudsen de menos de 0,01, el flujo de fluido tras alcanzar la viga en voladizo está completamente desarrollado, es predecible y promueve un flujo laminar.

35 La viga en voladizo puede formar una sola pieza con un soporte o puede ser desmontable del mismo, con la base adaptada para recibir la montura y la viga en voladizo para formar el canal. La viga en voladizo puede ser parte de un cabezal de detección para un microscopio de fuerza atómica. La viga en voladizo puede formar una microplaca de viga en voladizo para un microscopio de fuerza atómica.

El soporte y/o la montura pueden ser sustancialmente rígidos de tal modo que el canal sea sustancialmente rígido.

40 El dispositivo de medición puede incluir una cubierta, que está adaptada efectuar un sello con el soporte con el fin de encerrar la montura, la viga en voladizo y el canal en el interior del soporte y la cubierta. La cubierta puede ser transparente, preferiblemente de vidrio. De esta forma, si el medio para medir la frecuencia de vibración de la viga en voladizo es un láser, entonces este puede encontrarse en el exterior del dispositivo de medición y el haz de láser puede pasar a través de la cubierta.

45 El canal puede tener una entrada de fluido y una salida de fluido y la viga en voladizo puede colocarse de tal modo que esta sobresale hacia la salida de fluido.

### Breve descripción de los dibujos

50 La presente invención se describirá solo a modo de ejemplo con referencia a los siguientes dibujos, de los que:

la figura 1 muestra un dispositivo de medición de vigas en voladizo;  
 55 la figura 2 muestra un diagrama esquemático del flujo de fluido a través del dispositivo de medición de vigas en voladizo de la figura 1;  
 la figura 3 muestra una viga en voladizo con forma de v para su uso en el dispositivo de medición de vigas en voladizo de la figura 1;  
 la figura 4 muestra un ejemplo de variación de la amplitud de la vibración de la viga en voladizo de la figura 1 en una escala logarítmica frente a la frecuencia para unas presiones de fluido aplicadas variables; y  
 60 la figura 5 muestra un ejemplo de la variación de los desplazamientos de resonancia  $\Delta(f^2)$  de la viga en voladizo de la figura 1 que se miden como una función de la presión aplicada  $\Delta p$  junto con un mejor ajuste parabólico.

### Descripción detallada de los dibujos

65 La figura 1 muestra una célula de medición 5 que tiene un soporte de latón 10 que está conformado para recibir una microplaca de viga en voladizo 15. El soporte 10 está provisto con una ranura 20 que tiene unas paredes laterales

25, 30 y una base 35, que discurren desde un lado 40 del soporte 10 hasta el lado opuesto 45. Cada una de las paredes laterales 25, 30 de la ranura 20 tiene unos escalones 50, 55 que discurren a lo largo de la longitud de la ranura 20 adyacente a la base 35. Los escalones 50, 55 son de tal modo que la microplaca de viga en voladizo 15 puede asentarse sobre los mismos y quedar soportada lejos de la base 35 de la ranura con el fin de definir un canal 60 que tiene una entrada de flujo 65 y una salida 70. La ranura 20 está sellada por una cubierta de vidrio 75, que encierra la microplaca de viga en voladizo 15 en el interior de la ranura 20.

La microplaca de viga en voladizo 15 tiene una viga en voladizo con forma de v 80 que se extiende a partir de una sección de microplaca 85 de tal modo que el vértice 90 de la viga en voladizo 80 apunta lejos de la microplaca 85. El ángulo entre los brazos de la viga en voladizo es de 62°. El soporte 10 está conformado y dimensionado de tal modo que la microplaca de viga en voladizo 15 puede colocarse en el interior de la ranura 20 del soporte de tal modo que la viga en voladizo se extiende en paralelo con el canal 60 definido por la microplaca 85 y el soporte 10 y apunta hacia la salida 70 del canal 60. La viga en voladizo 80 está formada de nitruro de silicio revestido con oro.

El canal 60 está dimensionado para tener una sección transversal de 1 mm de ancho y 20 µm de alto. La microplaca 85 está dimensionada para dar un canal 60 de una longitud de 3,5 mm + 1, en donde 1 es la longitud de la viga en voladizo 80. Esto proporciona una relación de la longitud con respecto a la altura para el canal de aproximadamente 180. Esta elevada relación de la longitud con respecto a la altura asegura que el flujo de fluido se ha desarrollado completamente para el momento en el que este alcanza la viga en voladizo 80. La entrada 65 del canal 60 está conectada con un suministro de nitrógeno presurizado por medio de una válvula para ajustar la presión. El nitrógeno proporciona un fluido económico y de fácil acceso que tiene unos parámetros bien definidos y conocidos. Un medidor de presión, tal como un manómetro, se usa para medir la caída de presión ( $\Delta p$ ) entre la entrada 65 y la salida 70.

Un láser externo (que no se muestra) puede usarse para proporcionar un haz a través de la cubierta de vidrio, que ha de reflejarse a partir de la viga en voladizo 80 y detectarse por un fotodiodo segmentado con el fin de determinar el desplazamiento y, de ese modo, la frecuencia de la vibración de la viga en voladizo 80. El dispositivo de medición se construye alrededor de un microscopio de fuerza atómica que tiene el explorador desconectado y retirado. Los picos de resonancia de los espectros de ruido térmico y de ruido de modo fundamental de la viga en voladizo 80 se registran usando un analizador de espectro (que no se muestra).

Con el fin de medir la constante de resorte de la viga en voladizo 80, la frecuencia resonante inicial de la viga en voladizo 80 se mide con la célula cargada por gas nitrógeno pero sin flujo de fluido alguno a través del canal 60. El flujo de nitrógeno se introduce a continuación en el canal mediante la aplicación de presión en la entrada 65. La presión aplicada se aumenta entonces, lo que aumenta la velocidad del flujo de nitrógeno. La frecuencia resonante de la viga en voladizo 80 se mide a diversos flujos de nitrógeno controlados. Por ejemplo, la frecuencia resonante se mide en diez niveles de caída de presión ( $\Delta p$ ) diferentes hasta un máximo de 7 kPa. Con el fin de establecer una estabilidad hidrodinámica después de un cambio de presión, la viga en voladizo 80 se expone a cada uno de los diferentes flujos de fluido durante un minuto antes de recopilar datos de frecuencia de vibración. A una presión aplicada de 10 kPa, el sistema da como resultado una velocidad de fluido en la línea medio del canal de 15 ms<sup>-1</sup>. El número de Reynolds para esta disposición es de aproximadamente 20. otro parámetro adimensional importante que ha de tenerse en cuenta en el diseño de los sistemas de gas microfluídicos es el número de Knudsen,  $Kn$ , que define la relación de la trayectoria libre media de la moléculas de gas,  $\lambda$ , con respecto a una dimensión característica del canal 60,  $h$ , es decir,  $Kn = \lambda / h$ . Cuando el canal 60 que se ha descrito en lo que antecede se carga con gas nitrógeno, el número de Knudsen calculado es de aproximadamente 0,003 y, por lo tanto, se encuentra en el régimen al que se hace referencia como flujo sin deslizamiento. Esta combinación de los números de Reynolds y de Knudsen se corresponde con un régimen laminar de flujo incompresible.

Sin desear quedar limitado por teoría particular alguna, si el flujo de fluido es sustancialmente laminar, la influencia de las fuerzas inerciales según la caracterización por el número de Reynolds ( $Re$ ) es baja, correspondiente con un número de Reynolds de menos de 2000, y el fluido entra en el canal con una velocidad uniforme, entonces la constante de resorte o la velocidad del fluido puede calcularse tal como sigue.

Debido a que el canal 60 es mucho más largo que alto, es decir, longitud / altura > 10, el flujo de fluido que alcanza la viga en voladizo 80 tiene, en esencia, un perfil de velocidades que tiene una forma parabólica estable, tal como se muestra en la figura 2. Este perfil de velocidades en la dirección z se corresponde con el flujo plano de Poiseuille. La velocidad máxima ( $u_0$ ) del flujo de fluido en el centro del canal 60 depende de la diferencia de presión estática ( $\Delta p$ ) entre la presión aplicada en la entrada ( $p_{aplic}$ ) y la presión en la abertura de la viga en voladizo 80 ( $p_{vigav}$ ), la viscosidad del fluido ( $\eta$ ) y la longitud ( $L$ ) y la altura ( $h$ ) del canal 80 de tal modo que:

$$u_0 = \frac{h^2 \Delta p}{8\eta L} \quad (1)$$

Debido a que la velocidad en las paredes del canal es cero para el flujo laminar,  $P_{vigav}$  puede expresarse en términos de la presión dinámica de acuerdo con la ley de Bernoulli:

$$p_{vigav} = \frac{1}{2} \rho u_0^2 \quad (2)$$

5

en la que  $\rho$  es la densidad del fluido.

Cuando se aplica a una viga en voladizo flexible que tiene un área superficial  $A$ , esta presión ( $P_{vigav}$ ) da lugar a la fuerza resultante  $F_p = p_{vigav} A$ . Esta fuerza se aplica al centro de inercia del área proyectada de la viga en voladizo. La deflexión  $\delta_p$  de la viga en voladizo debido a la presión aplicada del flujo de fluido paralelo puede expresarse como:

10

$$\delta_p = \frac{F_p}{k_p} \quad (3)$$

15

en la que  $k_p$  es la constante de resorte de viga en voladizo que se corresponde con una carga superficial distribuida de manera uniforme. Esta constante de resorte difiere de manera significativa de la constante de resorte  $k_f$  que se usa habitualmente, que se corresponde con una viga en voladizo con carga en el extremo. Para las vigas en voladizo con geometrías comunes, puede calcularse la relación entre estas constantes de resorte.

20

La ecuación diferencial de una viga voladiza para una deflexión pequeña viene dada por

$$E \frac{d^2 \delta(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{I(x)} \quad (4)$$

25

en la que  $M$  es el momento de flexión,  $E$  es el módulo de Young,  $\delta(x)$  es la deflexión a lo largo de la viga en voladizo, e  $I$  es el momento de área de la sección transversal con respecto al eje neutro de la viga en voladizo. Es relativamente fácil encontrar la relación entre las dos constantes de resorte  $k_f$  y  $k_p$  de una viga en voladizo rectangular con carga en el extremo y una cargada de manera uniforme, respectivamente. La presión estática  $p$  del flujo de fluido puede sustituirse, para una viga en voladizo de una anchura constante,  $w$ , por la carga distribuida  $f_p(x) = pw$ , y el momento de flexión para una viga en voladizo rectangular debido a la presión es:

30

$$M_p(x) = \frac{pwx^2}{2}$$

El momento de área de una viga en voladizo de sección transversal rectangular de un espesor,  $t$ , viene dado por

35

$$I = \frac{wt^3}{12}$$

Integrar la ecuación (4) dos veces y usar condiciones de frontera produce la deflexión del punto de extremo de una viga en voladizo rectangular:

40

$$\delta_p = \frac{pwl^4}{8EI} = p \frac{2}{3} \frac{l^4}{t^3 E}$$

Con  $p = F_p / A$  y  $k_p = F_p / \delta_p$ , la constante de resorte de una viga en voladizo rectangular cargada con presión puede escribirse como:

$$k_p = \frac{2 A t^3 E}{3 l^4} \quad (5)$$

Sustituir las expresiones para el área superficial  $A = wl$  y para la constante de resorte de una viga en voladizo rectangular con carga en el extremo  $k_f = (Ewt^3)/(4l^3)$  en (5) da la relación entre las dos constantes de resorte como:

$$k_f = \frac{3k_p}{8}, \text{ para vigas en voladizo rectangulares} \quad (6)$$

Para las vigas en voladizo en forma de V, tal como se muestra en la figura 3, la determinación de la relación entre las dos constantes de resorte no es una tarea tan simple. No obstante, teniendo en cuenta la posición real de la punta del AFM (y, por lo tanto, de la carga) sobre la viga en voladizo, los inventores de la presente invención usan un modelo de dos 'vigas rectangulares' modificado como una buena aproximación para describir la constante de resorte de las vigas en voladizo en forma de V con carga en el extremo. Este enfoque produce la relación:

$$k_f = \frac{Ewt^3}{2l^3 \cos \frac{\theta}{2}}$$

en la que  $l' = l - w/\sin \frac{\theta}{2}$ ,  $E$  es el módulo de Young,  $w$  es la anchura de cada brazo de la viga en voladizo,  $t$  es el espesor de la viga en voladizo,  $\theta$  es el ángulo entre los brazos de la viga en voladizo,  $l$  es la longitud perpendicular de la viga en voladizo hasta el vértice 90 y  $l'$  es la longitud perpendicular hasta la parte interior del vértice de la viga en voladizo. Para una viga en voladizo con una anchura variable  $w(x)$ , la presión estática  $p$  del flujo de fluido puede sustituirse por la carga distribuida  $f_p(x) = pw(x)$ . Para una viga en voladizo con forma de V, el momento de flexión debido a la presión puede escribirse como:

$$M_p(x) = pw \frac{1}{\cos \frac{\theta}{2}} x^2 \quad \text{si } 0 < x \leq l'$$

$$= p(l-x) \tan \frac{\theta}{2} x^2 \quad \text{si } l' < x \leq l$$

y el momento de área de una viga en voladizo de un espesor  $t$ , viene dado por

$$I(x) = \frac{wt^3}{6} \frac{1}{\cos \frac{\theta}{2}} \quad \text{si } 0 < x \leq l'$$

$$= \frac{(l-x)t^3}{6} \tan \frac{\theta}{2} \quad \text{si } l' < x \leq l$$

Integrar la ecuación (4) dos veces usando las condiciones de frontera anteriores produce la deflexión de una viga en voladizo con forma de V en el punto  $x = l'$  al cargarse con una presión distribuida de manera uniforme:

$$\delta_p(l') = \frac{3p}{2} \frac{\left(l - w/\sin \frac{\theta}{2}\right)^4}{Et^3}$$

Con  $p = F_p / A$  y  $k_p = F_p / \delta_p$ , la constante de resorte de una viga en voladizo con forma de V cargada con presión puede escribirse como:

$$k_p = \frac{2}{3} \frac{AEt^3}{\left(l - w/\sin\frac{\theta}{2}\right)^4} \quad (7)$$

Sustituir las expresiones para el área superficial,  $A = w\left(2l - w/\sin\frac{\theta}{2}\right)/\cos\frac{\theta}{2}$ , y  $k_f$  en (7) da la relación entre las dos constantes de resorte para las vigas en voladizo con forma de V como:

$$k_f = \frac{3k_p}{4} \frac{\left(l - w/\sin\frac{\theta}{2}\right)}{\left(2l - w/\sin\frac{\theta}{2}\right)}, \text{ para vigas en voladizo con forma de V } (8)$$

5 A partir de (1) y (2) es evidente que el valor de presión que se aplica a la viga en voladizo depende de la anchura de canal  $h$ . En el caso de una viga en voladizo oscilante, un gradiente en el valor de presión crea un gradiente de fuerza  $dF_p/dz$  que actúa sobre la viga en voladizo en la dirección de vibración  $z$ , dando lugar a un desplazamiento de la frecuencia resonante de la viga en voladizo. El cambio en la constante de fuerza puede calcularse fácilmente usando la definición de  $F_p = \rho_{vigav} A$  en conjunción con (2):

$$\Delta k_p = \frac{dF_p}{dz} = A\rho u \frac{du}{dz} \quad (9)$$

15 Teniendo en cuenta que el sistema se acciona en el régimen de flujo incompresible, es decir,  $(h+z) u = h u_0$ , entonces  $du/dz$  puede determinarse tal como sigue:

$$\frac{du(z)}{dz} = -u_0 \frac{h}{(h+z)^2} \quad (10)$$

20 y en la posición de la viga en voladizo, en la que  $z = 0$  (si la amplitud de ruido térmico es mucho más pequeña que la altura de canal):

$$\Delta k_p = -A\rho \frac{u_0^2}{h} \quad (11)$$

25 Una fuerza de repulsión (gradiente de fuerza negativo) aumenta la energía potencial de la viga en voladizo y se corresponde con un aumento en la constante de resorte de viga en voladizo total y, por lo tanto, produce un cambio positivo en la frecuencia resonante,  $f_{res} - f_{res,0} = \Delta f > 0$ , siendo  $f_{res,0}$  la frecuencia resonante en ausencia de flujo (sin presión aplicada alguna) y  $f_{res}$  la frecuencia resonante con el flujo (cuando se aplica presión). Usando (1) y (11), y el

hecho de que  $\frac{k_p + |\Delta k_p|}{k_p} = \frac{f_{res}^2}{f_{res,0}^2} = \frac{f_{res,0}^2 + \Delta(f^2)}{f_{res,0}^2}$ , con  $\Delta(f^2) = f_{res}^2 - f_{res,0}^2$  el cambio en la frecuencia

30 resonante al cuadrado, la constante de resorte  $k_p$  puede determinarse simplemente mediante la adquisición del desplazamiento de la frecuencia de resonancia como una función del gradiente de presión que se aplica al canal tal como sigue:

$$k_p = -\Delta k_p \frac{f_{res,0}^2}{\Delta(f^2)} = A\rho \frac{u_0^2}{h} \frac{f_{res,0}^2}{\Delta(f^2)} = A\rho \frac{h^3 \Delta p^2}{64\eta^2 L^2} \frac{f_{res,0}^2}{\Delta(f^2)} \quad (12)$$

Este método de calibración de flujo de fluido paralelo puede aplicarse fácilmente si la geometría del canal está bien definida y si se usan unos fluidos con propiedades físicas conocidas. Las ecuaciones (6) o (8) pueden aplicarse para traducir  $k_p$  a  $k_f$ :

5 Las curvas de resonancia que se obtienen usando el método y aparato que se han descrito en lo que antecede se  
 10 recopilaron a diez presiones / velocidades de fluido diferenciadas, tal como se muestra en la figura 4. La figura 5  
 muestra unos desplazamientos de resonancia  $\Delta(f^2)$  típicos que se miden como una función de la presión aplicada  $\Delta p$   
 junto con el mejor ajuste parabólico. Las frecuencias de resonancia de tres vigas en voladizo en forma de V  
 15 fabricadas a partir de nitruro de silicio con unas constantes de resorte nominales de 0,06, 0,12, y 0,32 N / m (Veeco  
 Instruments Inc., NY, EE. UU.), y una viga en voladizo rectangular sin punta fabricada a partir de silicio con una  
 constante de resorte nominal de 0,03 N / m (MikroMasch, Estonia) se midieron como una función de la diferencia de  
 presión  $\Delta p$ . Se descubrió que el máximo aumento en la frecuencia de resonancia de las vigas en voladizo cargadas  
 ( $\Delta p \sim 7$  kPa) en comparación con las no cargadas era de  $\sim 1,5$  % para la viga en voladizo con la constante de fuerza  
 más alta (0,32 N / m) y de  $\sim 5$  % para las otras vigas en voladizo investigadas.

Los valores nominales y los determinados por medios experimentales de las frecuencias de resonancia, las áreas  
 20 superficiales y las constantes de resorte para todas las vigas en voladizo investigadas se muestran en la tabla 1. Los  
 valores nominales son los proporcionados por los fabricantes.

Tabla 1

Tipo de viga en voladizo	Frecuencia de resonancia exp. (nominal), kHz	Área superficial exp. (nominal), $10^{-8} \text{ m}^2$	Constante de fuerza exp. (nominal), N / m
Silicio sin punta (E) (CSC12, MikroMasch, Estonia)	10,90 (10)	1,25 (1,22)	0,031 (0,03)
Nitruro de silicio con forma de V (B) (Serie NP, Veeco, EE. UU.)	20,96 (20)	1,26 (1,42)	0,131 (0,12)
Nitruro de silicio con forma de V revestido con oro (C) (Serie NPG, Veeco, EE. UU.)	46,52 (56)	0,32 (0,32)	0,351 (0,32)
Nitruro de silicio con forma de V revestido con oro (D) (Serie NPG, Veeco, EE. UU.)	14,98 (12)	0,75 (0,74)	0,062 (0,06)

Los valores de constante de resorte normales se obtuvieron con alta precisión. Los valores se encuentran cerca de  
 25 los valores nominales con ligeras desviaciones. En el caso de las vigas en voladizo revestidas con oro, es probable  
 que las constantes de resorte se vean afectadas por los revestimientos y para las mismas se observó la mayor  
 desviación con respecto a los valores nominales.

Para el método anterior,  $L$  y  $h$  han de conocerse con precisión. Un error en  $h$  en particular dará como resultado un  
 30 error significativo en el valor de constante de resorte.  $h$  puede verse influenciada por una flexión de la viga en  
 voladizo, por ejemplo causada por un revestimiento. Por lo tanto, es importante determinar una posible flexión a  
 partir de una vista lateral óptica, que puede obtenerse fácilmente con un microscopio óptico. Las vigas en voladizo  
 que se han enumerado en lo que antecede no mostraron una flexión significativa.  $L$  puede determinarse fácilmente  
 con precisión a partir de las dimensiones de vista en planta bajo un microscopio óptico.

El método muestra una estabilidad y una repetibilidad excepcionales, con un error en la frecuencia de resonancia de  
 35 menos de un 1 %. Por lo general se realizan cinco mediciones para cada condición experimental, pero en  
 situaciones de buena reproductibilidad esto puede reducirse hasta un mínimo de dos mediciones. Por lo tanto, de  
 acuerdo con la presente invención, se ha demostrado que la constante de resorte para las vigas en voladizo puede  
 determinarse *in situ* y con alta precisión. La invención no requiere deflexión alguna de la viga en voladizo mediante  
 40 un objeto sólido y minimiza el daño a la viga en voladizo o a cualquier revestimiento sobre la misma. El método es  
 rápido, simple y fiable.

En una realización alternativa, si se conoce la constante de resorte de la viga en voladizo  $k_p$ , la célula y método de  
 45 medición anteriores pueden adaptarse para medir la velocidad del flujo de fluido y, por lo tanto, el caudal al repetir el  
 procedimiento anterior y volver a disponer (12) para determinar la velocidad de fluido de pico  $u_0$  tal como sigue:

$$u_0 = \sqrt{\frac{hk_p}{A\rho}} \cdot \frac{\sqrt{\Delta(f^2)}}{f_{res,0}} \quad (13)$$



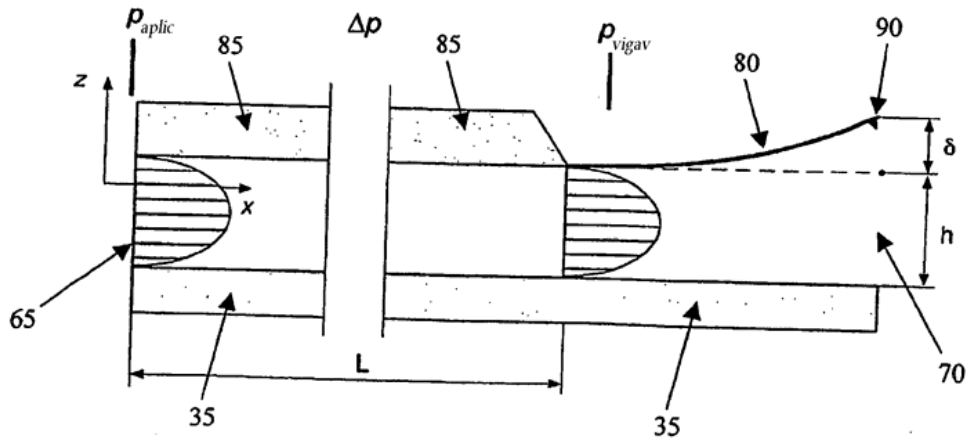
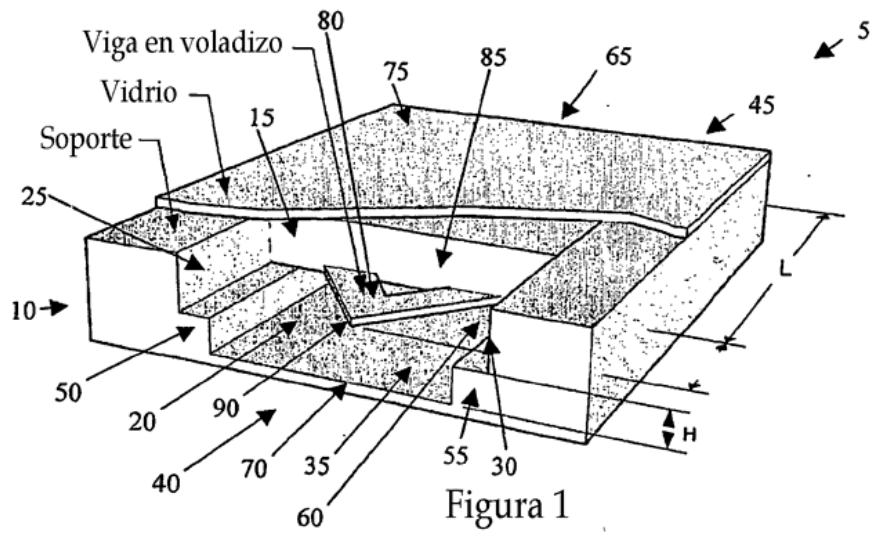
5 Al medir la velocidad del flujo de fluido en lugar de determinar la constante de resorte de la viga en voladizo, la  
entrada de dispositivo 65 se dispone para aceptar el flujo de fluido cuya velocidad ha de medirse. Esto puede  
hacerse situando el dispositivo de medición 5 en un flujo de fluido con la entrada abierta y orientada hacia el flujo  
que se aproxima, y midiendo la frecuencia resonante de la viga en voladizo. Esto proporciona un método simple,  
rápido y reproducible para medir la velocidad de fluido. Debido a las pequeñas dimensiones posibles con el  
dispositivo de la invención, las mediciones de flujo pueden tomarse en diversos puntos en un patrón de flujo con una  
mínima alteración para el flujo global. Por lo tanto, es posible medir con precisión la velocidad de flujo a escala  
microscópica así como el flujo global. Pueden proporcionarse múltiples vigas en voladizo 80 o células de medición 5  
10 para medir el flujo a escala microscópica en diversos sitios. Se apreciará además que la presente realización de la  
célula y método de medición puede adaptarse adicionalmente para proporcionar una anemometría local con alta  
precisión y hasta altas velocidades.

15 La descripción anterior se hace solo a modo de ejemplo y serán obvias variaciones para un experto en la materia sin  
alejarse del alcance de la invención. Por ejemplo, a pesar de que el fluido que se usa es, de manera ventajosa, gas  
nitrógeno, pueden usarse otros gases o líquidos, tales como aire y agua. La configuración que se ha descrito en lo  
que antecede está adaptada preferentemente de tal modo que el canal de flujo de fluido es un paralelepípedo  
rectangular alargado, que tiene la entrada 65 opuesta a la salida 70 y que tiene unos lados lisos y rígidos. No  
obstante, pueden usarse otras configuraciones de canal, preferiblemente aquellas que faciliten un flujo laminar  
desarrollado del fluido. A pesar de que la microplaca de viga en voladizo 15 se describe como que puede extraerse,  
20 la microplaca de viga en voladizo 15 puede formar una sola pieza con el soporte 10, en particular en la realización  
de medición de velocidad de flujo de fluido. Además, a pesar de que en el ejemplo que se describe en el presente  
documento, la viga en voladizo 80 que se usa es una viga en voladizo con forma de v, pueden usarse otras formas  
de viga en voladizo tales como vigas en voladizo rectangulares.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Aparato de medición que tiene una viga en voladizo (80) y un canal de flujo de fluido (60), estando colocada la viga en voladizo (80) en el canal (60) de tal modo que se proyecta en una dirección en paralelo con respecto a la dirección del flujo de fluido, **caracterizado por que** el canal (60) tiene una relación de la longitud con respecto a la altura mayor que o igual a 0,05 Re, en donde Re es el número de Reynolds del fluido en el canal (60), y el canal (60) está conformado y/o dimensionado para proporcionar un flujo laminar, estando dispuesto el aparato para proporcionar un flujo de fluido, en donde el movimiento del fluido da lugar a un cambio en la frecuencia resonante de la viga en voladizo.
- 10 2. Aparato de medición tal como se reivindica en la reivindicación 1, que comprende unos medios para medir la frecuencia de vibración de la viga en voladizo (80).
- 15 3. Aparato de medición tal como se reivindica en la reivindicación 2, en el que los medios para medir la frecuencia de vibración de la viga en voladizo (80) están adaptados para medir una frecuencia resonante de la viga en voladizo (80).
- 20 4. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende unos medios para medir la presión y/o la caída de presión y/o la velocidad aplicadas del fluido.
- 25 5. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende unos medios para proporcionar un flujo de fluido a una presión y/o una caída de presión y/o una velocidad de fluido aplicadas conocidas.
- 30 6. Aparato de medición tal como se reivindica en la reivindicación 4 o en la reivindicación 5, adaptado para usar la presión y/o la caída de presión y/o la velocidad de fluido aplicadas conocidas o medidas junto con por lo menos una medición de frecuencia resonante para determinar la constante de resorte de la viga en voladizo (80).
- 35 7. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, adaptado para determinar la presión y/o la caída de presión y/o la velocidad aplicadas del fluido y/o el caudal de fluido usando por lo menos una medición de frecuencia resonante.
- 40 8. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la viga en voladizo (80) está revestida por lo menos en parte de una bio-película.
- 45 9. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la viga en voladizo (80) es rectangular o tiene forma de v.
- 50 10. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la viga en voladizo (80) se extiende entre 10 y 400  $\mu\text{m}$  en perpendicular a partir de una montura.
- 55 11. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las paredes del canal (60) son lisas.
- 60 12. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el canal (60) define una abertura para recibir un flujo de fluido y una abertura en la que la viga en voladizo (80) se encuentra con la montura.
- 65 13. Aparato de medición tal como se reivindica en la reivindicación 12, en el que la longitud del canal (60) entre la abertura para recibir un flujo de fluido y la abertura en la que la viga en voladizo (80) se encuentra con la montura es sustancialmente igual a la longitud de entrada hidrodinámica.
14. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 12 a 13, en el que la viga en voladizo (80) está adaptada para estar montada de manera desmontable sobre una base, con la base adaptada para recibir la viga en voladizo (80) para formar el canal (60).
15. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la viga en voladizo (80) es por lo menos parte de un cabezal de detección o microplaca de viga en voladizo para un microscopio de fuerza atómica.
16. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el canal (60) es sustancialmente rígido.
17. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una cubierta para cubrir la viga en voladizo (80) y el canal (60), opcionalmente en el que la cubierta es transparente.

18. Aparato de medición tal como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el canal (60) tiene una entrada de fluido y una salida de fluido y la viga en voladizo (80) está colocada de tal modo que sobresale hacia la salida de fluido.



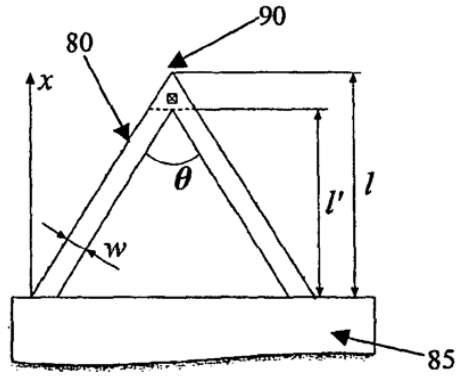


Figura 3

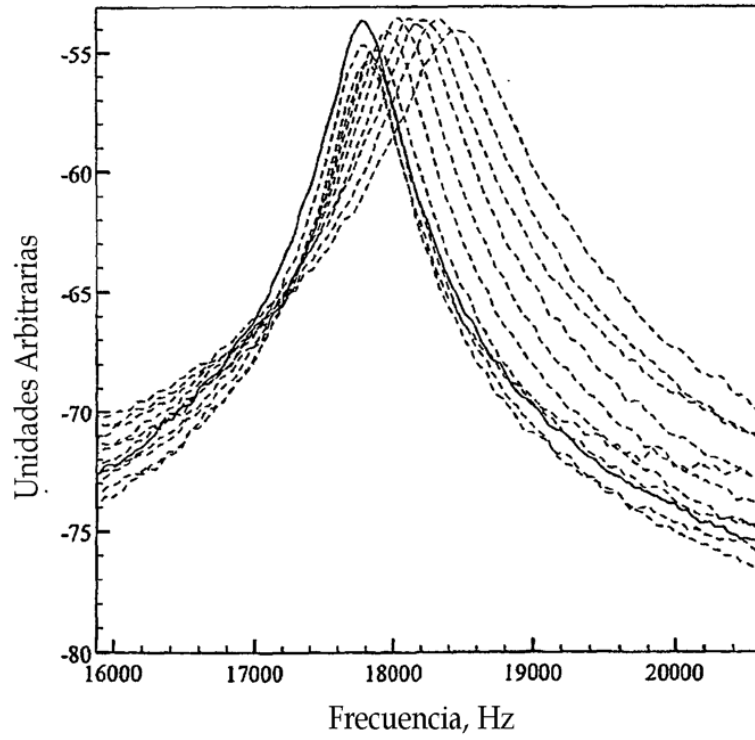


Figura 4

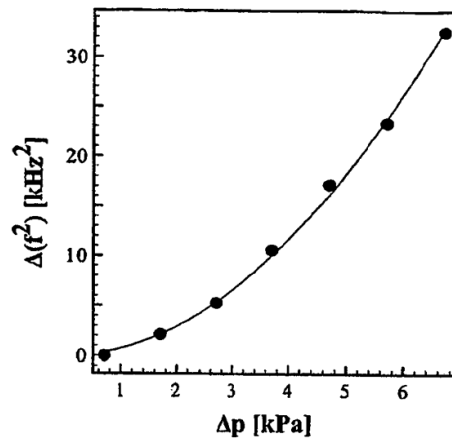


Figura 5