

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 570 398**

21 Número de solicitud: 201431530

51 Int. Cl.:

**G01K 5/00**

(2006.01)

12

## PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

**16.10.2014**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**18.05.2016**

Fecha de la concesión:

**03.03.2017**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**10.03.2017**

56 Se remite a la solicitud internacional:

**PCT/ES2015/070752**

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (CSIC) (70.0%)**

**C/ Serrano, 117**

**28006 Madrid (Madrid) ES y**

**SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN  
BRATISLAVA (30.0%)**

72 Inventor/es:

**VAZQUEZ VILLALABEITIA, Manuel y**

**KOLESAR, Vladimir**

74 Agente/Representante:

**PONS ARIÑO, Ángel**

54 Título: **SENSOR DE TEMPERATURA PARA SISTEMAS MICROELECTROMECÁNICOS Y  
PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN**

57 Resumen:

Sensor de temperatura para sistemas microelectromecánicos y procedimiento de fabricación.

El objeto de la invención es un sensor de temperatura con estructura cilíndrica y constituido por un material compuesto, que comprende un núcleo metálico y al menos un recubrimiento sobre dicho núcleo metálico con la característica de presentar una asimetría radial en cualquier sección transversal de la estructura.

Constituye igualmente un objeto de la presente invención un procedimiento de fabricación del sensor de temperatura basado en la solidificación rápida del núcleo metálico en el interior del primer recubrimiento y subsiguientes etapas de deposición de otros recubrimientos metálicos.

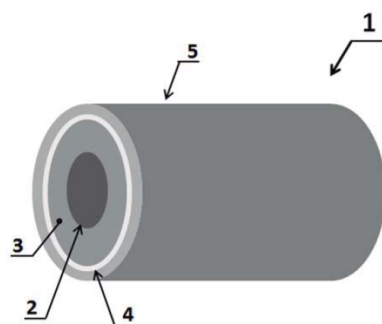


Fig. 2

ES 2 570 398 B1

**Sensor de temperatura para sistemas microelectromecánicos y procedimiento de fabricación**

**DESCRIPCIÓN**

5

**SECTOR Y OBJETO DE LA INVENCION**

La presente invención se encuadra en el ámbito de los sistemas microelectromecánicos (en adelante MEMS, del inglés "*microelectromechanical systems*") y especialmente en el control de temperatura basado en la respuesta mecánica de materiales compuestos a cambios  
10 inducidos por calentamiento eléctrico.

Específicamente, el objeto de la invención es un sensor de temperatura con estructura cilíndrica y formado por un material compuesto, que comprende un núcleo metálico y al menos un recubrimiento sobre dicho núcleo metálico con la característica de presentar una  
15 asimetría radial en cualquier sección transversal de la estructura.

**ESTADO DE LA TECNICA**

Recientemente, el estudio y desarrollo de diversos sistemas microelectromecánicos, MEMS, está recibiendo mucha atención. La principal ventaja reside en la facilidad para controlar la  
20 expansión térmica dentro del régimen elástico en aleaciones al someter a la muestra a procesos de calentamiento externo o por efecto Joule. El funcionamiento se basa en la diferente deformación térmica de sus componentes individuales.

El elemento sensor consiste esencialmente en un hilo cilíndrico de material compuesto  
25 cuyas deformaciones en tracción o pandeo se comportan dentro del régimen elástico ante variaciones de temperatura originadas por efecto Joule.

La obtención de simetría u homogeneidad perfecta a lo largo de su eje es prácticamente imposible en un hilo compuesto. De hecho, esta asimetría está en el origen de la  
30 funcionalidad de los sensores de temperatura objeto de la presente invención, consecuencia de la diferencia en los valores de los coeficientes de expansión térmica de las capas metálicas individuales. Este efecto se ve aumentado cuando dichas capas metálicas están aisladas por una capa intermedia vítrea cuyo coeficiente de expansión térmica es mínimo en comparación con los de las capas que la rodean.

35

Un aspecto muy importante en relación a los elementos de un MEMS es la técnica de fabricación empleada. La elección de un procedimiento adecuado facilitará la obtención de elementos en forma cilíndrica, evitando así la necesidad de empleo de numerosos pasos intermedios así como complejas técnicas de manipulación en capas micrométricas.

5

En este caso, se emplea la técnica de enfriamiento ultrarrápido ( $10^5$  K/s) y estiramiento ("quenching and drawing" en inglés), también conocida como técnica de Taylor-Ulitovsky modificada [G.G. Keller, R.T. Howe, *Hexsil tweezers for teleoperated microassembly*; Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual International Workshop on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS'97), Nagoya, Japan, 26-30 January 1997, pp. 72-77; A.V. Ulitovsky, Pribory i Tekhnika experimentu 3, 115 (1957)], que permite la obtención de microhilo metálico recubierto por una microcapa aislante de vidrio borosilicato o Pyrex de forma continua (longitudes de varios kilómetros), en un único proceso. Esta técnica, de bajo, coste, permite en definitiva la obtención en serie de microhilo metálico cubierto de vidrio borosilicato o Pyrex en un tiempo muy reducido, algunos segundos. El microhilo metálico se encuentra sometido a intensas tensiones mecánicas durante este proceso de fabricación, originadas por el enorme gradiente térmico durante el enfriamiento ultrarrápido, y en gran medida por los diferentes coeficientes de expansión térmica del vidrio de borosilicato o Pyrex y el núcleo metálico [H. Chiriac, and T.A. Ovari, Progress in Materials Science 40, 333 (1996); I. Aștefănoaei, D. Radu and H. Chiriac, Journal of Physics D: Applied Physics 38, 2 (2005); I. Aștefănoaei, D. Radu and H. Chiriac, Journal of Physics: Condensed Matter 18, 9 (2006)]. El proceso de estiramiento del microhilo para su bobinado induce finalmente una deformación de pandeo en el mismo.

## 25 **EXPLICACION DE LA INVENCION**

Constituye un primer objeto de la presente invención un sensor de temperatura para sistemas microelectromecánicos formado por una estructura cilíndrica de material compuesto que comprende:

30 - un núcleo metálico con microestructura amorfa, y

- un recubrimiento tubular de vidrio borosilicato (tipo Pyrex ®) sobre dicho núcleo metálico.

La característica diferencial del sensor de la invención frente a los dispositivos del estado de la técnica es que cualquier sección transversal de dicha estructura cilíndrica de material compuesto presenta una asimetría radial.

- 5 En una forma de realización preferente de la presente invención, el sensor de temperatura incluye adicionalmente un primer recubrimiento metálico realizado mediante pulverización catódica ("*sputtering*" en inglés) sobre el recubrimiento tubular de vidrio borosilicato y un segundo recubrimiento metálico electrodepositado sobre el primer recubrimiento metálico.
- 10 En otra forma de realización preferente, el núcleo metálico está formado por una aleación que comprende hierro-silicio-boro, con diámetro en el rango de 1 a 20 micras recubierto por vidrio borosilicato de espesor entre 2 y 10 micras. Opcionalmente, la aleación del núcleo metálico contiene adicionalmente cobalto.
- 15 Más preferentemente, el primer recubrimiento metálico aplicado sobre el vidrio de borosilicato mediante pulverización catódica está formado por un metal noble con espesor nanométrico (particularmente entre 27 y 33 nm) y el segundo recubrimiento metálico electrodepositado sobre la nanocapa de metal noble está constituido por una aleación metálica con carácter ferromagnético y espesor micrométrico (particularmente entre 1,85 y  
20 2,15  $\mu\text{m}$ ).

En cuanto a la operación del sensor de temperatura, puede haber dos configuraciones preferentes:

- 25 - en la primera un primer extremo de la estructura cilíndrica está conectado a un contacto eléctrico fijo, mientras que un segundo extremo está conectado a un contacto móvil o libre.
- en la segunda, ambos extremos de la estructura cilíndrica están conectados a contactos eléctricos fijos.

30

Constituye un segundo aspecto de la presente invención un procedimiento de fabricación del referido sensor de temperatura, que comprende una primera etapa de obtención en un único proceso de un núcleo metálico cilíndrico de diámetro micrométrico (particularmente entre 1 y 20  $\mu\text{m}$ ) recubierto por una capa micrométrica (particularmente entre 2 y 10  $\mu\text{m}$ ) de  
35 recubrimiento tubular de vidrio borosilicato mediante solidificación ultrarrápida.

En un modo de realización preferente, el procedimiento de fabricación comprende adicionalmente una etapa de deposición de un primer recubrimiento metálico sobre el recubrimiento tubular de vidrio borosilicato mediante pulverización catódica, y otra etapa de electrodeposición de un segundo recubrimiento metálico sobre el primer recubrimiento metálico.

## BREVE DESCRIPCION DE LAS FIGURAS

**Fig.1: a)** primera forma de conexión, en la cual un extremo de la estructura cilíndrica está conectado a un contacto eléctrico fijo y el otro extremo está conectado a un contacto móvil o libre. La flecha marca el régimen de trabajo en dirección axial respecto a la estructura cilíndrica; **b)** segunda forma de conexión, en la cual ambos extremos de la estructura cilíndrica están conectados a contactos eléctricos fijos. La flecha marca el régimen de trabajo en dirección perpendicular respecto a la estructura cilíndrica.

**Fig. 2:** Esquema de la estructura cilíndrica (microhilo) compuesta objeto de la invención constituida por un núcleo de FeSiB, recubierta de vidrio borosilicato (Pyrex ®), un primer recubrimiento de Au y un segundo recubrimiento de CoNi.

**Fig. 3:** Medida de la temperatura de la estructura cilíndrica de material compuesto en función de la corriente continua aplicada. Entre 20 mA y 35 mA, la temperatura es directamente proporcional a la corriente aplicada. La línea a trazos se obtiene por ajuste de los resultados experimentales a la descripción matemática de la función.

## DESCRIPCION DETALLADA DE LA INVENCION

El elemento sensor del MEMS es una estructura cilíndrica (1) de diámetro micrométrico constituido por varias capas o tubos micrométricos.

En una realización preferente la estructura cilíndrica (1) de material compuesto que comprende un núcleo metálico (2) con microestructura amorfa y un recubrimiento tubular de vidrio borosilicato (3) sobre dicho núcleo metálico (2). Preferentemente la estructura cilíndrica (1) incluye adicionalmente un primer recubrimiento (4) metálico sobre el

recubrimiento tubular de vidrio borosilicato (3) y un segundo recubrimiento metálico (5) sobre el primer recubrimiento metálico (4).

Las características que definen la funcionalidad como MEMS de este elemento sensor son las intensas tensiones mecánicas a las que está sometido en su interfase metal/aislante, los diferentes coeficientes de expansión térmica de ambos dominios, su asimetría a lo largo del eje, y su forma geométrica cilíndrica. Durante el proceso de calentamiento, el cambio de temperatura origina en la estructura cilíndrica (1) compuesta una deformación mecánica característica debido a los diferentes coeficientes de expansión térmica de sus capas. Esta deformación mecánica tiene lugar en las direcciones axial y radial, siendo de mayor amplitud en valor absoluto a lo largo de la dirección axial.

El elemento sensor con forma cilíndrica ofrece dos regímenes de trabajo en función del modo de conexión.

i) En el primer modo de conexión, un primer extremo (6) de la estructura cilíndrica está soldado a un contacto eléctrico fijo parte de un circuito eléctrico mientras que un segundo extremo (7) se suelda a un contacto eléctrico móvil o libre. La estructura cilíndrica (1) se deforma en la dirección axial al ser calentada dado que no existe fuerza axial opuesta debido a que el segundo contacto está libre. De este modo se obtiene un movimiento libre en ese extremo (Fig. 1a).

ii) En el segundo modo de trabajo un primer extremo (6) y un segundo extremo (7) de la estructura cilíndrica (1) están soldados a contactos eléctricos fijos en el circuito eléctrico. En este caso, tensiones de expansión térmica de la misma intensidad y sentido opuesto actúan en los extremos (6, 7) fijos, así como en la interfaz metal/vidrio. Como consecuencia de la asimetría de la estructura cilíndrica (1) a lo largo de su dirección axial aparece una deformación neta, la cual se pone de manifiesto por la diferencia de coeficientes de expansión térmica del metal y el vidrio. El resultado es una deformación de flexión o pandeo de la estructura cilíndrica (Fig. 1b).

En ambos regímenes de trabajo, las deformaciones observadas son reversibles como se indica en la Fig. 1. Al reducir la potencia de la fuente de calor, el elemento termomecánico recupera su forma inicial permaneciendo dentro de su régimen mecánico elástico, pudiéndose así alcanzar un movimiento alternativo. Las tensiones mecánicas en la interfaz metal/vidrio juegan un importante papel en este proceso reversible. La distribución cilíndrica

de tensiones internas en dicha interface optimiza su comportamiento elástico, al facilitar la recuperación de su forma inicial al reducir la fuente de calor.

Este elemento sensor termomecánico está protegido de corrosión ambiental por el carácter anticorrosivo de la capa metálica externa. El mismo tubo externo asegura el ajuste preciso del microelemento al aumentar o disminuir la intensidad de la fuente de calor.

## MODO DE REALIZACION DE LA INVENCION

### 10 Procedimiento de fabricación

El concepto general de la invención incluye cualquier material compuesto con geometría cilíndrica preparado mediante cualquier técnica o combinación de técnicas. En el presente ejemplo, se introduce un procedimiento de fabricación para una estructura cilíndrica de material compuesto específica que combina diversas técnicas, como la solidificación ultrarrápida (*"quenching and drawing"*), pulverización catódica (*"sputtering"*), y electrodeposición. Ha sido desarrollado recientemente para la preparación de dispositivos de sensado magnético.

Las composiciones específicas y los diámetros indicados a continuación deben entenderse como un ejemplo de la presente invención. En este ejemplo el núcleo metálico es de  $\text{Fe}_{76}\text{Si}_{11}\text{B}_{13}$  con estructura amorfa cubierto por vidrio borosilicato y se obtiene mediante el proceso de solidificación rápida de Taylor – Ulitovsky.

En el presente caso, la aleación metálica  $\text{Fe}_{76}\text{Si}_{11}\text{B}_{13}$  se encuentra en el interior de un tubo de vidrio borosilicato y es calentada mediante inducción a alta frecuencia.

Se calienta la aleación hasta su punto de fusión, formando una gota. Cuando el metal funde, la parte del capilar de vidrio borosilicato adyacente al metal fundido se ablanda envolviendo la gota de metal fundido. Se estira la parte ablandada del vidrio borosilicato para formar un capilar que se enrolla sobre una bobina giratoria. Bajo condiciones adecuadas en el proceso de formación del capilar, el metal fundido rellena el capilar de vidrio formando un núcleo metálico con un radio de  $5,00 \pm 0,15 \mu\text{m}$  completamente cubierto por el tubo de vidrio borosilicato con un espesor de  $8,5 \pm 0,15 \mu\text{m}$  (Figura 2).

Se deposita a continuación mediante pulverización catódica una capa de Au con un espesor de  $30 \pm 3$  nm sobre el vidrio borosilicato para la subsiguiente electrodeposición de una capa metálica externa. El recubrimiento externo de  $\text{Co}_{90}\text{Ni}_{10}$  con un espesor de  $2,00 \pm 0,15$   $\mu\text{m}$  se crece sobre el Au mediante electrodeposición galvanostática en un baño Watts a una densidad de corriente  $j = 12 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ . El radio total de la estructura de material compuesto obtenido es  $15,5 \pm 0,4$   $\mu\text{m}$ .

El núcleo metálico de  $\text{Fe}_{76}\text{Si}_{11}\text{B}_{13}$  se somete a un gradiente de temperatura

inducido por el enfriamiento que junto al proceso de formación del capilar y la presencia adicional del vidrio borosilicato externo induce complejos esfuerzos termomecánicos en direcciones radial, azimutal y axial. Adicionalmente, la presencia del recubrimiento de Au y el galvanizado metálico externo dan lugar a esfuerzos muy significativos.

#### 15 **Determinación de parámetros técnicos del sensor de temperatura**

Se llevaron a cabo dos tipos de experimentos para la determinación de los parámetros técnicos y de las condiciones de trabajo. Una estructura cilíndrica de material compuesto se conectó con ambos extremos unidos a contactos eléctricos fijos. Se aplicó corriente eléctrica a la vez que calentamiento mediante una fuente Joule para trabajar en el segundo régimen.

i) El primer tipo de experimento se focalizó en la observación visual de la estructura cilíndrica de material compuesto mediante microscopía óptica. Se halló que la deformación termomecánica es visible al microscopio óptico en el rango de la corriente continua aplicada (20 – 35 mA). Al aumentar la corriente aplicada, la amplitud de la deformación termomecánica se incrementó desde 0 a 9  $\mu\text{m}$ . Se observó la respuesta opuesta al disminuir la corriente continua desde 35 mA a 20 mA, decreciendo la amplitud de la deformación desde 9  $\mu\text{m}$  a 0  $\mu\text{m}$ . Se realizaron diversos experimentos similares, confirmándose en todos los casos que la amplitud de la deformación es directamente proporcional a la corriente continua aplicada, lo que puede expresarse como:

$$A = k_1 \times I + q_1 \quad (1)$$

donde A es la amplitud de la deformación termomecánica, I es la corriente continua aplicada, adoptando los parámetros  $k_1$  y  $q_1$  los valores:

$k_1 = (0,6 \pm 0,03) \mu\text{m}/\text{mA}$  y  $q_1 = -12$  para valores de I entre 20 y 35 mA.

Variando la corriente entre 20 y 35 mA se producen oscilaciones mecánicas en la estructura. El experimento se realizó igualmente en estructuras cilíndricas compuestas solo por el núcleo metálico y el tubo de vidrio borosilicato, observándose también el efecto descrito.

5

ii) en el segundo tipo de experimentos, se midió la temperatura de la estructura cilíndrica de material compuesto mientras se aplicaba corriente continua entre 0 y 35 mA. Se halló que la temperatura aumentaba al incrementarse la corriente continua aplicada entre 0 y 35 mA, lo que es evidencia directa del efecto termomecánico. En el rango entre 20 y 35 mA la temperatura es directamente proporcional a la corriente continua aplicada, lo que explica la deformación termomecánica en este rango de corriente continua aplicada (ver Figura 3). A partir del ajuste aplicado se llegó a una expresión fenomenológica que relaciona la dependencia de la temperatura con la corriente continua aplicada (línea discontinua en la Fig. 3):

15

$$T = k_2 \times I + q_2 \quad (2)$$

donde  $k_2 = 0,174 \pm 0,015$  K/mA y  $q_2 = 294,24 \pm 0,44$  K cuando  $I$  está entre 20 y 35 mA.

De las ecuaciones (1) y (2) se determina que la amplitud de la deformación termomecánica depende de la temperatura según:

20

$$A(T) = kT - kq_2 + q_1 \quad (3)$$

donde  $k = k_1/k_2 = 3,5 \pm 0,5$   $\mu\text{m}/\text{K}$ . De la ecuación (3) se deduce que la amplitud de la deformación es función de la temperatura.

25

## REIVINDICACIONES

1. Sensor de temperatura para sistemas microelectromecánicos formado por una estructura cilíndrica (1) de material compuesto que comprende:

5

- un núcleo metálico (2) con microestructura amorfa y

- un recubrimiento tubular de vidrio borosilicato (3) sobre dicho núcleo metálico (2)

10    caracterizado porque cualquier sección transversal de dicha estructura cilíndrica (1) de material compuesto presenta una asimetría radial.

2. Sensor de temperatura según la reivindicación 1, caracterizado porque incluye adicionalmente un primer recubrimiento (4) metálico sobre el recubrimiento tubular de vidrio borosilicato (3) y un segundo recubrimiento metálico (5) sobre el primer recubrimiento metálico (4).

15

3. Sensor de temperatura según una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, caracterizado porque:

20

- el núcleo metálico (2) está formado por una aleación que comprende hierro-silicio-boro y tiene un diámetro comprendido entre 1 y 20  $\mu\text{m}$ ,

- el recubrimiento tubular de vidrio borosilicato (3) tiene un espesor comprendido entre 2 y 10  $\mu\text{m}$ .

25

4.- Sensor de temperatura según la reivindicación 3, caracterizado porque la aleación del núcleo metálico (2) contiene adicionalmente cobalto.

5. Sensor de temperatura según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, caracterizado porque:

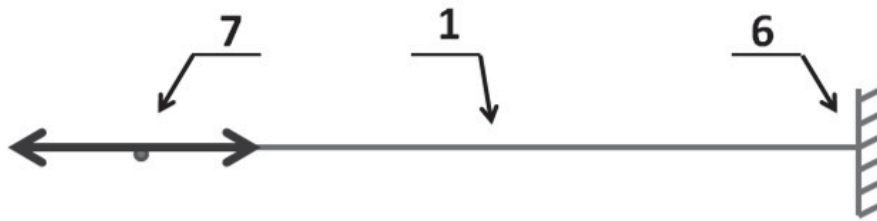
30

- el primer recubrimiento metálico (4) aplicado sobre el recubrimiento tubular de vidrio borosilicato (3) está formado por un metal noble con espesor comprendido entre 27 y 33 nm,

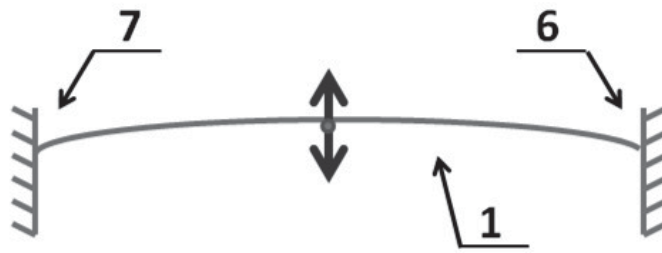
- el segundo recubrimiento metálico (5) electrodepositado sobre la nanocapa de metal noble está constituido por una aleación metálica con carácter ferromagnético y espesor comprendido entre 1,85 y 2,15  $\mu\text{m}$ .

- 5     **6.** Sensor de temperatura según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque un primer extremo (6) de la estructura cilíndrica (1) está conectado a un contacto eléctrico fijo, mientras que un segundo extremo (7) está conectado a un contacto móvil o libre.
- 10    **7.** Sensor de temperatura según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque un primer extremo (6) y un segundo extremo (7) de la estructura cilíndrica (1) están conectados a contactos eléctricos fijos.
- 15    **8.** Procedimiento de fabricación de un sensor de temperatura según se define en las reivindicaciones 1 a 7, que comprende una primera etapa de obtención en un único proceso de un núcleo metálico (2) cilíndrico de diámetro comprendido entre 1 y 20  $\mu\text{m}$  recubierto por una capa de espesor comprendido entre 2 y 10  $\mu\text{m}$  de recubrimiento tubular de vidrio borosilicato (3) mediante solidificación ultrarrápida.
- 20    **9.** Procedimiento de fabricación de un sensor de temperatura según la reivindicación 8, caracterizado porque comprende adicionalmente una etapa de deposición de un primer recubrimiento metálico (4) sobre el recubrimiento tubular de vidrio borosilicato (3) mediante pulverización catódica y otra etapa de electrodeposición de un segundo recubrimiento (5) metálico sobre el primer recubrimiento metálico (4).

25



a



b

Fig. 1

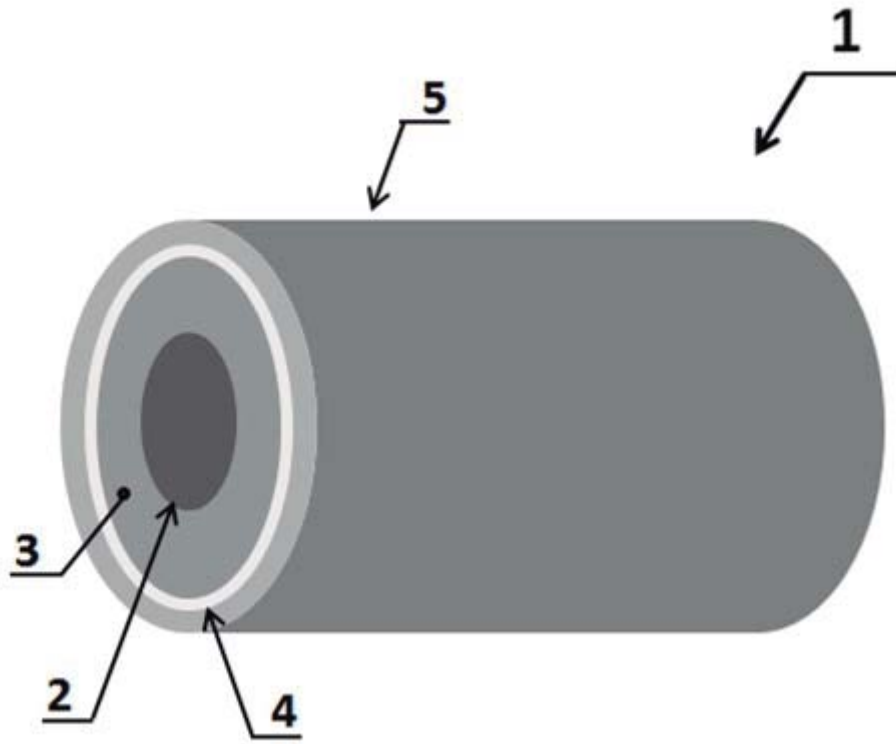


Fig. 2

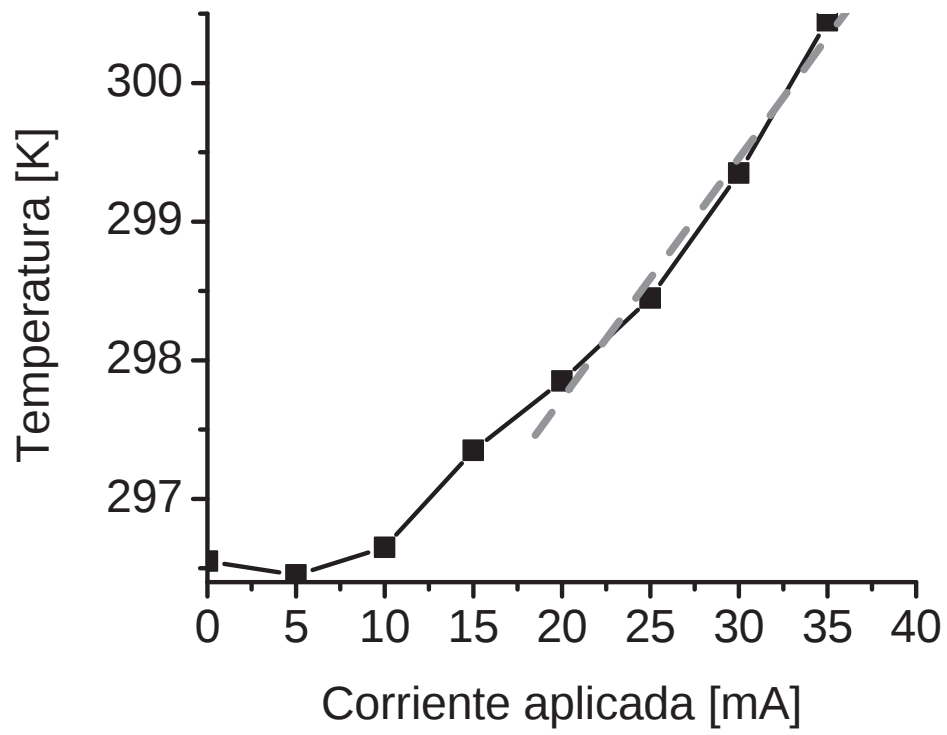


Fig. 3