

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 773 726**

21 Número de solicitud: 201930020

51 Int. Cl.:

**G02F 1/00** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

**14.01.2019**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**14.07.2020**

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

**09.10.2020**

Fecha de concesión:

**11.05.2021**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**18.05.2021**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE  
COMPOSTELA (100.0%)  
Edificio EMPRENDIA- Campus Vida, s/n  
15782 Santiago de Compostela (A Coruña) ES**

72 Inventor/es:

**VÁZQUEZ RAMALLO, Manuel;  
CASTAÑO VERDE, José Lorenzo;  
SEBASTIÁN VIZ, Alberto y  
MONTERO ORILLE, Carlos**

74 Agente/Representante:

**TORNER LASALLE, Elisabet**

54 Título: **Sensor bolométrico resistivo**

57 Resumen:

Sensor bolométrico resistivo (22) que comprende una película delgada (23) basada en un sensor superconductor de alta temperatura que se calienta cuando absorbe radiación electromagnética, variando su resistencia eléctrica; y medios (11) para medir dicha variación de la resistencia eléctrica e inferir una cantidad de radiación absorbida. La citada película delgada (23) incluye una o más regiones con un nivel de dopaje no óptimo, de modo que no maximiza una temperatura crítica superconductora del sensor bolométrico (22).

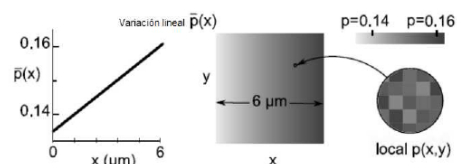


Fig. 4

ES 2 773 726 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015. Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

## DESCRIPCIÓN

### Sensor bolométrico resistivo

#### Campo de la técnica

La presente invención concierne en general al campo de los bolómetros. En particular la  
5 invención se refiere a un sensor bolométrico, resistivo, basado en superconductores de alta temperatura.

#### Antecedentes de la invención

Los bolómetros son detectores de radiación electromagnética que emplean un sensor que  
se calienta cuando absorbe dicha radiación. El aumento de temperatura deriva en un cambio  
10 de la resistencia eléctrica del sensor y ello es empleado para inferir la radiación que ha recibido. El esquema de funcionamiento de un bolómetro es resumido en las Figs. 1 y 2.

Las principales ventajas de los bolómetros frente a otros sensores de radiación (como por  
ejemplo los basados en el efecto fotoeléctrico, los fotodiodos, los fototransistores, o los  
sensores CCD y CMOS) son: mayor rango espectral, mayor rapidez y más sensibilidad a  
15 radiaciones muy débiles.

Los principales tipos de sensores para bolómetros que existen actualmente son:

a) sensores semiconductores – son los más usados, sobre todo  $V_xO_y$  (habitualmente  $V_2O_5$ ). Requieren un baño térmico, pero no criogénico. Ahora bien, a menudo se operan a  
temperaturas criogénicas si la radiación a medir es tan débil como para requerir evitar el  
20 ruido por ruido propio “self-noise” (detección de fuego militar amigo, etc.) o en ciertos entornos especiales (satélites, por ejemplo).

b) sensores LTS-TES, o sensores superconductores de baja temperatura - emplean  
superconductores como Al o Ti, que a causa de su pequeño valor de temperatura crítica  $T_c$   
precisan criogenia basada en He líquido (LHe, temperatura de ebullición 4.2K a presión  
25 ambiental). Se emplean principalmente en algunas aplicaciones para astrofísica y donde se requiere una sensibilidad altísima, por la extrema debilidad de la radiación a medir. De hecho, suelen operarse a temperaturas incluso mucho menores que 4.2K (aproximadamente 10 mK) para así eliminar el self-noise térmico que influiría en dichas aplicaciones.

c) sensores HTS-TES, o sensores superconductores de alta temperatura - emplean superconductores de temperatura crítica igual o superior a 77K, con lo que precisan criogenia pero es suficiente la basada en Nitrógeno líquido (LN2), mucho más simple (y económica) que la basada en LHe. Los sensores HTS-TES propuestos hasta ahora emplean el nivel de dopaje óptimo (es decir, la composición química que maximiza su temperatura crítica; por ejemplo, en el compuesto más utilizado,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-\delta)}$ , se emplea dopaje nominal  $\delta=0.07$  que se corresponde con  $T_c \sim 90\text{K}$ ). Entonces las inhomogeneidades espaciales de temperatura crítica asociadas a pequeñas variaciones del valor local del dopaje son despreciables (pues la pendiente de la dependencia  $T_c(\delta)$  es nula al operarse en un máximo de dicha curva).

Si bien los sensores HTS-TES existentes (o propuestos hasta ahora) presentan alguna ventaja respecto a las demás opciones (LTS-TES y semiconductores), sus desventajas respecto a ellos hacen que su uso sea actualmente muy escaso. Las principales ventajas y desventajas se resumen en la tabla 1 siguiente:

tipo de sensor	sensibilidad TCR	potencia máxima medible por un pixel $(6 \times 6 \mu\text{m})^2$	tipo de refrigeración	Ancho térmico $\Delta T$
semiconductor ( $\text{V}_2\text{O}_5$ )	0.026 $\text{K}^{-1}$	80 mwatt	no criogénica	25 K
LTS-TES (Ti)	200 $\text{K}^{-1}$	$10^{-10}$ mwatt o menos	LHe	0.005 K
HTS-TES (YBCO $\bar{p}=0.155$ )	3.05 $\text{K}^{-1}$	5 mwatt	LN2	0.9 K

Tabla 1. Parámetros operativos de los principales sensores bolométricos existentes. Las cantidades corresponden a un mismo microbolómetro con parámetros típicos comunes, variándose sólo el material usado como sensor (en particular, dimensiones  $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m} \times 100\text{nm}$ , y suponemos que la refrigeración se realiza por contacto directo con el filme y el sustrato).

Con respecto a los sensores LTS-TES, los HTS-TES tienen una refrigeración más económica (LN2 vs LHe) y una potencia de saturación (la máxima radiación incidente medible) muy superior, pero ello viene acompañado de una sensibilidad (según su factor TCR, definido como la pendiente que tiene la curva  $R(T)$  en la región lineal de temperaturas

donde opera el bolómetro) unos dos órdenes de magnitud inferior. Además, la criogenia precisa una estabilidad  $\Delta T$  de menos de 1K, que puede ser difícil de obtener con LN2 (la criogenia LHe, mucho más cara y compleja, es también mucho más estable).

5 Con respecto a los sensores semiconductores, los más usados, si bien los sensores HTS-  
TES existentes presentan una sensibilidad TCR unas 50 veces superior, tienen las  
desventajas de precisar una refrigeración más cara y complicada (LN2 estabilizada con  $\Delta T$   
de menos de 1K, frente a refrigeración no criogénica) y de saturarse mucho antes (siendo su  
potencia de saturación un orden de magnitud menor que para los sensores  
semiconductores).

10 Exposición de la invención

Con el fin de eliminar algunas de las desventajas de los sensores HTS-TES frente a los  
sensores semiconductores, en particular, aumentar la potencia de saturación hasta hacerla  
comparable con las de los sensores semiconductores, y también relajar los requisitos de  
estabilidad del baño criogénico, haciéndolo con ello menos complejo, la presente invención  
15 proporciona un sensor bolométrico resistivo que al igual que los bolómetros del estado de la  
técnica comprende una película delgada basada en un sensor superconductor de alta  
temperatura que se calienta cuando absorbe radiación electromagnética, variando una  
resistencia eléctrica del sensor bolométrico; y unos medios para medir dicha variación de la  
resistencia eléctrica e inferir la cantidad de radiación absorbida.

20 A diferencia de las propuestas conocidas, en el sensor bolométrico propuesto la citada  
película delgada incluye una o más regiones con un nivel de dopaje no óptimo, de modo  
que no maximiza su temperatura crítica  $T_c$  superconductor.

Según la presente invención, particularmente, la película delgada tiene un espesor  
comprendido entre 50 y 400 nanómetros, preferiblemente de 100 nanómetros, y un área del  
25 orden de los micrómetros.

En un ejemplo de realización, la película delgada es de una perovskita superconductor de  
alta temperatura tal como:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.93}$  dopado con O;  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.93}$  dopado con Zn;  
 $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$  dopado con Sr;  $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$  dopado con O;  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  dopado  
con Pb;  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  dopado con O; o  $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6.21}$  dopado con O.

30 En un ejemplo de realización, la citada película delgada comprende una única región de  
dopaje nominal a lo largo de toda su superficie. Dicha región, única, tiene un valor nominal

homogéneo pero no óptimo, presentando por ello variaciones aleatorias de la temperatura crítica superconductor en la escala nanométrica.

Alternativamente, en otro ejemplo de realización, la citada película delgada comprende diferentes regiones de dopaje nominal a lo largo de toda su superficie, incluyendo regiones no óptimas o regiones no óptimas y óptimas. Las diferentes regiones de dopaje pueden estar dispuestas formando diferentes distribuciones de dopaje nominal, destacando las siguientes posibilidades: con variación constante, variación cuasi-exponencial, variación cuasi-exponencial discretizada.

El sensor bolométrico propuesto optimiza el límite de saturación a través del ensanchamiento de la región lineal de la transición, manteniendo una sensibilidad TCR del mismo orden de magnitud (o incluso aumentándolo). La temperatura operativa se mantiene en los valores correspondientes a la refrigeración con LN<sub>2</sub>, pero se aumenta el rango de tolerancia para la estabilización térmica, con lo que la criogenia necesaria tendrá un coste menor al de los bolómetros HTS-TES existentes hasta ahora.

#### 15 Breve descripción de los dibujos

Las anteriores y otras características y ventajas se comprenderán más plenamente a partir de la siguiente descripción detallada de unos ejemplos de realización, meramente ilustrativa y no limitativa, con referencia a los dibujos que la acompañan, en los que:

La Fig. 1 ilustra un esquema explicativo del funcionamiento de un bolómetro resistivo según se conoce en el estado de la técnica. En la figura superior se muestra el set up básico de funcionamiento, compuesto por la radiación incidente 10, la(s) lente(s) focalizadora(s) 5 y un array de microbolómetros 21 con el baño térmico 13. La figura inferior es un zoom 22 a un microbolómetro, para ilustrar las partes que lo conforman, es decir un enlace térmico 12, cables eléctricos para realizar la medida 11 y una película delgada 23.

La Fig. 2 representa los principios operacionales de los bolómetros resistivos. La figura superior (A) representa la fase de excitación, cuando la radiación incidente calienta el bolómetro, y varía su resistividad. A su vez se muestran las diferentes zonas de la curva de resistencia del bolómetro en la parte superior derecha. En la figura inferior (B) se muestra la fase de relajación, cuando ya no hay radiación incidente y el bolómetro vuelve a su estado térmico inicial.

La Fig. 3 ilustra los resultados de la simulación por elementos finitos para microbolómetros con una sola zona de dopaje nominal, los cuatro dopajes nominales descritos en la tabla 2

(círculos, cuadrados, rombos y triángulos) y las estimaciones obtenidas por medio de la teoría de medio efectivo para los mismos dopajes nominales (líneas negras). Además se muestra la anchura de la región lineal, que es la región operativa de cada bolómetro. Para comparación con los resultados obtenibles utilizando el estado de la técnica existente, también se muestran los resultados con una zona de dopaje nominal óptima (caso  $\bar{p}=0.155$ )

La Fig. 4 es un esquema representativo del sensor bolométrico propuesto suponiendo ahora varias zonas de dopaje nominal  $\bar{p}$ , tales que  $\bar{p}(x)$  presente una variación lineal a lo largo de la coordenada longitudinal  $x$ . A la izquierda se representa el dopaje nominal frente a la coordenada longitudinal. La figura es una representación 2D de la distribución nominal de dopajes con una escala de grises representada por la barra superior derecha. A su vez se representa la distribución gaussiana aleatoria intrínseca de dopaje local  $p(x,y)$  en la parte inferior derecha.

La Fig. 5 es una representación de la resistencia frente a la temperatura para el sensor bolométrico propuesto en la Fig. 4. La línea representa la estimación obtenida por medio de la teoría de medio efectivo, y los círculos representan los cálculos realizados por elementos finitos. A su vez se muestra la anchura  $\Delta T$  de la zona lineal del bolómetro.

La Fig. 6 es un esquema representativo del sensor bolométrico propuesto suponiendo ahora varias zonas de dopaje nominal  $\bar{p}$  tales que  $\bar{p}(x)$  sigan una función exponencial para la función  $dx/d\bar{p}$  (corresponde a la ecuación (3)). A la izquierda se representa el dopaje nominal frente a la coordenada longitudinal. La figura es una representación 2D de la distribución nominal de dopajes con una escala de grises representada por la barra superior derecha. A su vez se representa la distribución gaussiana aleatoria intrínseca de dopaje local  $p(x,y)$  en la parte inferior derecha.

La Fig. 7 es una representación de la resistencia frente a la temperatura para el sensor bolométrico propuesto en la Fig. 6. La línea representa la estimación obtenida por medio efectivo, y los círculos representan los cálculos realizados por elementos finitos. A su vez se muestra la anchura de la zona lineal del bolómetro.

La Fig. 8 es un esquema representativo del sensor bolométrico propuesto suponiendo varias zonas de  $p$ , siguiendo una distribución exponencial de la función  $dx/d\bar{p}$  pero ahora discretizada con dopajes nominales  $\bar{p}=0.136, 0.141, 0.145$  y  $0.160$ . A la izquierda se representa el dopaje nominal frente a la coordenada longitudinal. La figura es una representación 2D de la distribución nominal de dopajes con una escala de grises

representada por la barra superior derecha. A su vez se representa la distribución gaussiana aleatoria intrínseca de dopaje local  $p(x,y)$  en la parte inferior derecha.

La Fig. 9 es una representación de la resistencia frente a la temperatura para el sensor bolométrico propuesto en la Fig.8. La línea representa la estimación obtenida por medio efectivo, y los círculos representan los cálculos realizados por elementos finitos. A su vez se muestra la anchura de la zona lineal del bolómetro.

#### Descripción detallada de la invención y de unos ejemplos de realización

La presente invención proporciona un sensor bolométrico 22, resistivo, es decir, un detector térmico de radiación electromagnética, que incluye una película delgada 23 basada en superconductores de alta temperatura. La película delgada 23, dependiendo del ejemplo de realización, puede incluir una o más regiones con un nivel de dopaje no óptimo.

En un ejemplo de realización, el sensor bolométrico 22 puede estar basado en superconductores de alta temperatura con dopaje no óptimo y valor nominal homogéneo en toda la superficie de la película delgada 23, lo cual conlleva una distribución espacial aleatoria Gaussiana para los dopajes y temperatura crítica  $T_c$  locales.

En otro ejemplo de realización, el sensor bolométrico 22 puede estar basado en superconductores de alta temperatura con una distribución regular en el espacio (patroneado) del dopaje nominal y consiguientemente una distribución espacial de la temperatura crítica que es la suma de dos contribuciones: una regular (siguiendo el patroneado de dopaje nominal) más otra aleatoria Gaussiana (correspondiendo a las diferencias entre dopaje local y nominal para dopajes nominales no óptimos).

En aún otro ejemplo de realización, el sensor bolométrico 22 puede estar basado en superconductores de alta temperatura con una distribución regular en el espacio (patroneado) de la temperatura crítica local mediante procedimientos como variación del espesor de la película delgada u otros que no impliquen una distribución aleatoria adicional de la temperatura crítica.

Preferiblemente, el sensor bolométrico 22 propuesto comprende una película delgada 23 de espesor 100nm y área  $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ , en donde el material HTS es  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (abreviadamente YBCO). De cualquier modo debe notarse que otros materiales también podrían utilizarse, por ejemplo:  $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$  dopado con Sr;  $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$  dopado con

O;  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  dopado con Pb;  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  dopado con O; o  $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6.21}$  dopado con O.

Asimismo, la superficie del sensor bolométrico 22 puede considerarse dividida en pequeños dominios de aproximadamente  $30\text{nm} \times 30\text{nm}$ , cada uno con un único dopaje y temperatura crítica locales,  $p(x, y)$  y  $T_c(x, y)$ . A cada monodominio se le asigna un valor de dopaje local  $p(x, y)$  resultante de la suma del dopaje nominal  $\bar{p}(x)$  y las variaciones aleatorias nanométricas correspondientes a dicho valor nominal. Destacar que en todos los ejemplos de realización ilustrados, se consideran dopajes nominales variando solo en una dirección, más una distribución aleatoria Gaussiana. Ello deriva en el valor  $p(x, y)$ , y con ello  $T_c(x, y)$ , de cada monodominio.

Así, el comportamiento eléctrico global del sensor bolométrico 22 resulta del comportamiento como malla de resistores del conjunto de monodominios. Esto equivale a una red de  $200 \times 200$  elementos, que es representable mediante ecuaciones de malla eléctricas de 40001 variables (los detalles de estas ecuaciones, que son no lineales en el caso superconductor, pueden encontrarse en J.C. Verde et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 8800204; estas ecuaciones son resueltas, para cada temperatura, en el superconductor paralelo LBTS-epsilon [lbs.esc.es/epsilon](http://lbs.esc.es/epsilon)).

Adicionalmente, es posible realizar una estimación del comportamiento global del sensor bolométrico 22 mediante la aproximación conocida como "medio efectivo", resumida en J. Maza et al. Phys. Rev. B 43, (1991) 10560. Los resultados serán sólo una aproximación básica, pero computacionalmente rápida y constituyen un test de confirmación de los resultados cualitativos.

A continuación se detallarán diferentes ejemplos de realización según el dopaje incluido en la película delgada 23.

#### HTS-TES con $\bar{p}(x)$ uniforme:

Con referencia ahora a la Fig. 3 y a la tabla 2, en las mismas se muestran los resultados obtenidos para un valor único del dopaje nominal  $p$  en todo el sensor bolométrico 22 propuesto (El valor  $\bar{p}=0.155$  se corresponde con el dopaje óptimo, es decir el tradicionalmente usado para sensores HTS-TES, y se muestra sólo como referencia para comparar con el estado anterior de la técnica). Se observa en la Fig. 3 que a medida que el dopaje nominal disminuye la transición se hace más ancha.



distribución de dopaje nominal $\bar{p}$ del sensor HTS-TES	sensibilidad TCR	potencia máxima medible por un pixel $(6 \times 6 \mu\text{m})^2$	tipo de refrigeración	Ancho térmico $\Delta T$
Bolómetros HTS previos (YBCO $\bar{p}=0.155$ )	3.05 K <sup>-1</sup>	5 mwatt	LN2	0.9 K
implementación ejemplo 1: $\bar{p} = 0.147$ uniforme	2.67 K <sup>-1</sup>	5 mwatt	LN2	1.8 K
implementación ejemplo 2: $\bar{p} = 0.140$ uniforme	2.15 K <sup>-1</sup>	13 mwatt	LN2	2.3 K
implementación ejemplo 3: $\bar{p} = 0.135$ uniforme	2.16 K <sup>-1</sup>	25 mwatt	LN2	4.7 K

5 Tabla 2. Parámetros operativos logrables con la presente invención con dopajes nominales uniformes (el valor  $\bar{p}=0.155$  corresponde al estado anterior de la técnica). Las cantidades corresponden a un mismo sensor bolométrico con parámetros típicos comunes como en la tabla 1, variándose sólo el material usado como sensor.

HTS-TES con gradiente constante de  $\bar{p}(x)$

En la Fig. 4 se puede observar el esquema asociado al sensor bolométrico 22 con un  $\bar{p}(x)$  que tiene una variación lineal con la coordenada longitudinal de la película delgada 23, es decir:

10 
$$\bar{p}(x) = \frac{p_f - p_i}{L} x + p_i \quad (1)$$

Siendo  $p_i$  y  $p_f$  los valores inicial y final de dopaje, y L la longitud de la película delgada 23. Entonces, en este caso todos los dopajes nominales comprendidos entre los valores inicial y final,  $p_i$  y  $p_f$ , se encuentran con igual peso relativo,  $\bar{w}(\bar{p})$ , en la composición de la muestra, siendo en este caso  $\bar{w}(\bar{p})$  el valor:

$$\bar{w}(\bar{p}) = \frac{1}{p_f - p_i}$$

En la Fig. 5 y la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos. Como puede observarse, en este primer ejemplo con  $\bar{p}(x)$  variable los resultados los resultados TCR y  $\Delta T$  no mejoran los obtenidos para bolómetros HTS-TES con un dopaje nominal uniforme no óptimo. En concreto, tanto la sensibilidad TCR como la anchura de la zona lineal,  $\Delta T$ , son mayores para casos en los que el HTS-TES está formado por una película delgada 23 con un dopaje nominal no óptimo. La implementación sí sería útil, en cambio, en el caso de que se admitiesen zonas operativas no lineales, ya que el ancho en temperatura de la transición tomaría un valor muy ampliado,  $\Delta T_{\text{no lin}} \sim 15\text{K}$ .

distribución de dopaje nominal $p$ del sensor HTS-TES	sensibilidad TCR	potencia máxima medible por un pixel $(6 \times 6 \mu\text{m})^2$	tipo de refrigeración	Ancho térmico $\Delta T_{\text{lin}}$	Ancho térmico $\Delta T_{\text{no lin}}$
implementación ejemplo 4: gradiente uniforme $\bar{p}(x) = 0.135-0.161$	0.25 K <sup>-1</sup>	8 mwatt	LN2	1.4 K	15K

10 Tabla 3. Parámetros operativos logrables con la presente invención con una variación lineal del dopaje nominal  $p_i(x)$  a lo largo de su coordenada longitudinal. Las cantidades corresponden a un mismo sensor bolométrico con parámetros típicos comunes como en las tabla 1.

HTS-TES con una distribución exponencial continua de  $\bar{p}(x)$

En este caso, se utiliza una distribución exponencial de la función  $\bar{w}(\bar{p})$ , la fracción del sensor que posee un dopaje nominal  $\bar{p}$ , como sigue:

15 
$$\bar{w}(\bar{p}) = \frac{1}{L} \frac{dx}{d\bar{p}} = C \exp\left(\frac{p_i - \bar{p}}{p_0}\right)$$

Donde C es una constante que viene dada por:

$$\frac{1/p_0}{1 - \exp\left(\frac{p_i - p_f}{p_0}\right)}$$

Esta distribución se corresponde con la siguiente distribución  $\bar{p}(x)$ :

$$\bar{p}(x) = p_i - p_0 \ln \left\{ 1 - \frac{x}{L} \left( 1 - \exp\left(\frac{p_f - p_i}{p_0}\right) \right) \right\}$$

20 En la Fig. 6 se observa el esquema asociado a esta distribución de dopajes nominales tomando como valores numéricos  $p_i=0.135$ ,  $p_f=0.161$  y  $p_0=0.007$ . Por otro lado en la Fig. 7 y

tabla 4 se muestran los resultados obtenidos, que como puede verse son netamente mejores que con las distribuciones más simples testadas anteriormente, tanto en lo relativo a la sensibilidad TCR como en el ensanchamiento de la zona lineal y en la potencia máxima medible.

distribución de dopaje nominal $\bar{p}$ del sensor HTS-TES	sensibilidad TCR	potencia máxima medible por un pixel $(6 \times 6 \mu\text{m})^2$	tipo de refrigeración	Ancho térmico $\Delta T_{\text{lin}}$
implementación ejemplo 5: exponencial continua $\bar{p}(x) = 0.135-0.161$	0.18 K <sup>-1</sup>	48 mwatt	LN2	8.3 K

- 5 Tabla 4. Parámetros operativos logrables con la presente invención con una distribución exponencial de la función  $\bar{w}(\bar{p})$ . Las cantidades corresponden a un mismo sensor bolométrico con parámetros típicos comunes como en la tabla 1.

HTS-TES con una distribución exponencial discretizada de  $\bar{p}(x)$

- 10 Si bien la distribución exponencial continua testada anteriormente proporciona excelentes resultados, podría objetarse que su realización práctica puede ser difícil, por implicar un muy avanzado (aunque no imposible) grado de precisión en las técnicas de estructuración de los materiales HTS. Motivados por ese argumento, en el sensor bolométrico propuesto 22 también se han testado distribuciones de dopaje  $\bar{p}(x)$  consistentes en pasos discretos de diversos tamaños, en vez de variaciones continuas.

- 15 En la Fig. 8 se muestra un ejemplo de tal distribución a pasos. En este caso particular, se aplican cuatro dopajes nominales,  $\bar{p}(x) = 0.136, 0.141, 0.145$  y  $0.160$ , cada uno con un peso del 2.6%, 10.2%, 30.8% y 56.4% de la muestra, coherentes con una dependencia exponencial con  $\bar{p}$  proporcional a una exponencial

$$\bar{w} = C \exp\left(\frac{-\bar{p}}{p_0}\right)$$

- 20 Con  $p_0 = 0.007$  y  $C=1.523 \times 10^8$ .

En la Fig. 9 y en la tabla 5 se muestran asimismo los resultados obtenidos para dicha distribución. Como puede observarse, no sólo consigue igualarse la calidad del sensor obtenida para el caso continuo, sino que se mejoran las características del sensor bolométrico propuesto 22.

distribución de dopaje nominal $p$ del sensor HTS-TES	sensibilidad TCR	potencia máxima medible por un pixel $(6 \times 6 \mu\text{m})^2$	tipo de refrigeración	Ancho térmico $\Delta T$
implementación ejemplo 6: exponencial discreta  $\bar{p}(x) =$ 0.136,0.141,0.145,0.160	5.13 K <sup>-1</sup>	72 mwatt	LN2	12.7 K

Tabla 5. Parámetros operativos logrables con la presente invención con una distribución exponencial de la función  $\bar{w}(\bar{p})$  discretizada con dopajes nominales  $\bar{p}(x) = 0.136, 0.141, 0.145$  y  $0.160$ . Las cantidades corresponden a un mismo sensor bolométrico con parámetros típicos comunes como en la tabla 1.

5

El alcance de la presente invención está definido en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Sensor bolométrico resistivo, del tipo que comprende:

una película delgada (23) basada en un sensor superconductor de alta temperatura que se calienta cuando absorbe radiación electromagnética, variando una resistencia eléctrica del sensor bolométrico (22); y

5 medios (11) para medir dicha variación de la resistencia eléctrica e inferir una cantidad de radiación absorbida,

**caracterizado porque** dicha película delgada (23) incluye una o más regiones con un nivel de dopaje no óptimo, de modo que no maximiza una temperatura crítica superconductor del sensor bolométrico (22), en donde la película delgada incluye una distribución nominal de dopajes seleccionada de entre las siguientes distribuciones:

10 a)  $\bar{p}(x) = \frac{p_f - p_i}{L} x + p_i$ ;

b)  $\bar{p}(x) = p_i - p_0 \ln \left\{ 1 - \frac{x}{L} (1 - \exp \left( \frac{p_f - p_i}{p_0} \right)) \right\}$ ;

c)  $\bar{w} = C \exp \left( \frac{-\bar{p}}{p_0} \right)$ , donde C es una constante que viene dada por:  $\frac{1/p_0}{1 - \exp \left( \frac{p_i - p_f}{p_0} \right)}$ ,

15 siendo  $p_i$  y  $p_f$  los valores inicial y final de dopaje, y L la longitud de la película delgada (23).

2. Sensor bolométrico según la reivindicación 1, en donde dicha película delgada (23) es de una perovskita superconductor de alta temperatura como:

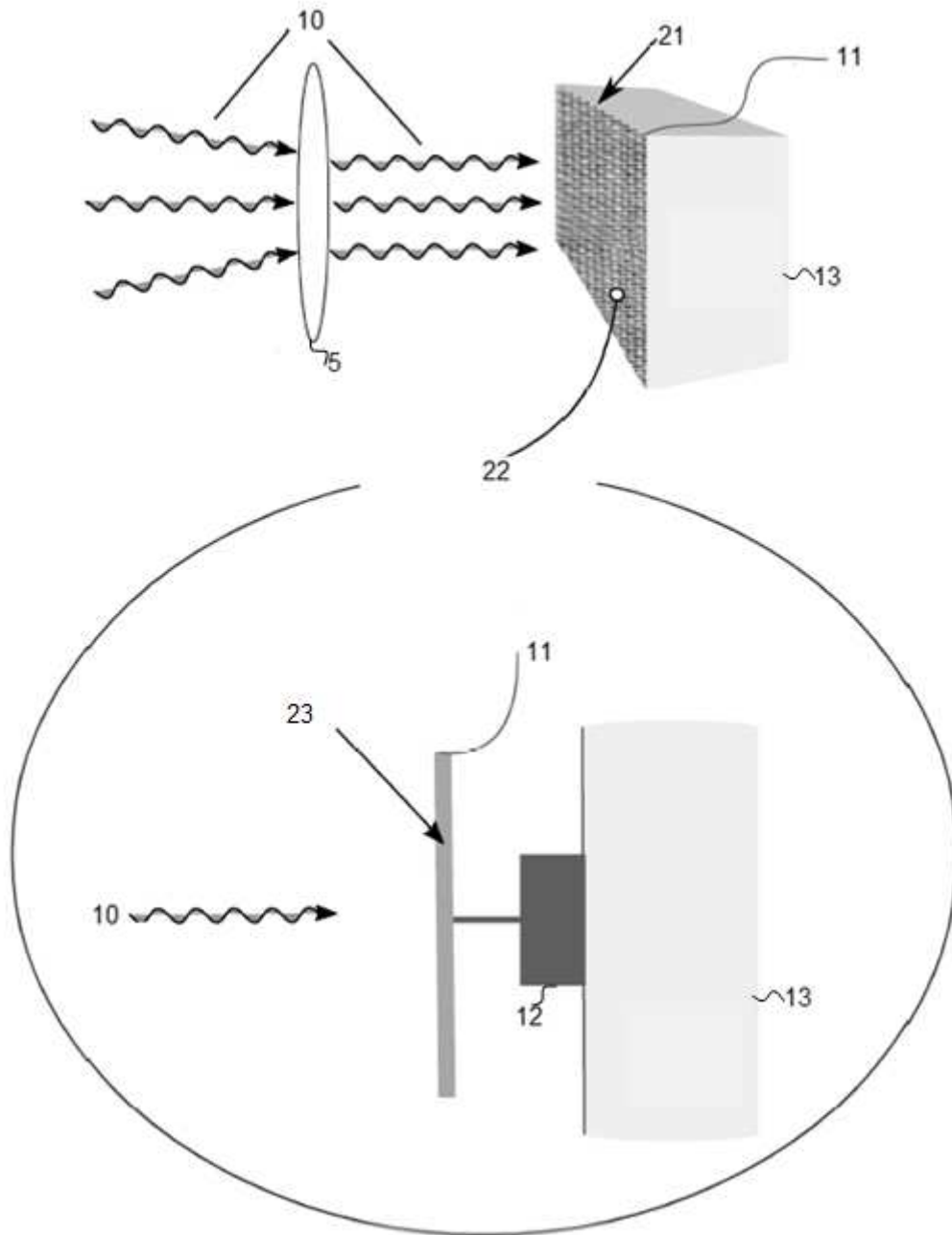
- 20 -  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.93}$  dopado con O;
- $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.93}$  dopado con Zn;
- $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$  dopado con Sr;
- $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$  dopado con O;
- $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  dopado con Pb;
- $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  dopado con O; o
- 25 -  $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6.21}$  dopado con O.

3. Sensor bolométrico según la reivindicación 1, en donde la película delgada (23) es de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -d y tiene un espesor comprendido entre 50 y 400 nanómetros.

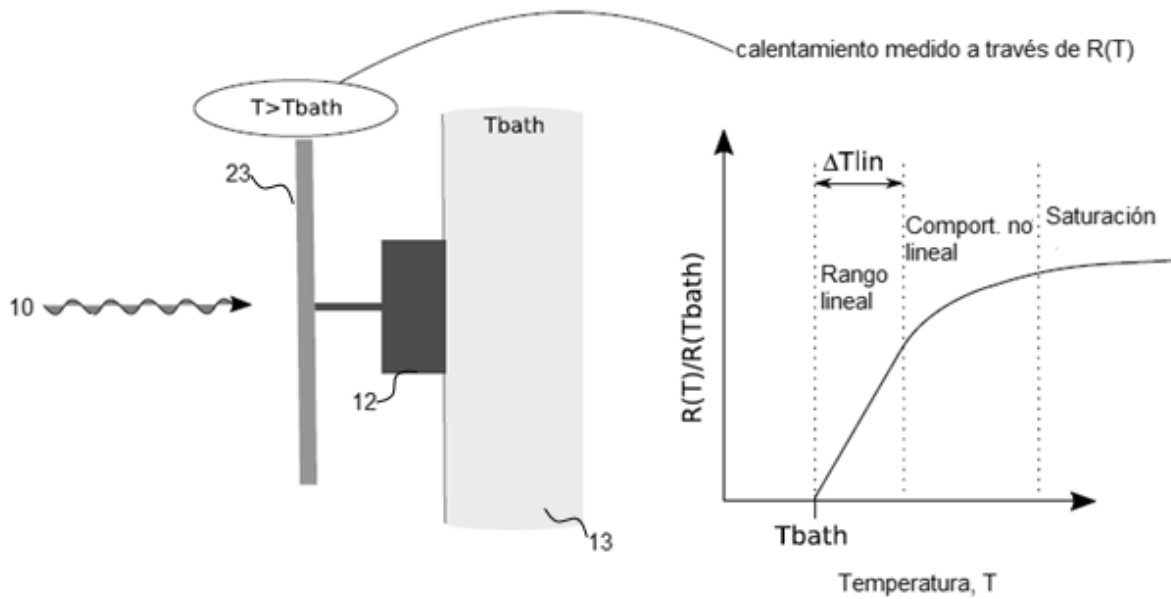
4. Sensor bolométrico según la reivindicación 1, en donde la distribución a) comprende unos valores de dopaje de  $p_f=0.161$  y  $p_i=0.135$ .

5. Sensor bolométrico según la reivindicación 1, en donde la distribución b) comprende unos valores de dopaje de  $p_f=0.161$ ,  $p_i=0.135$  y  $p_0=0.007$ .

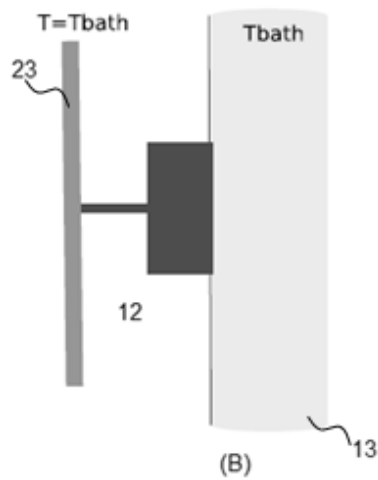
5 6. Sensor bolométrico según la reivindicación 1, en donde la distribución c) comprende unos valores de dopaje de  $p_f=0.160$ ,  $p_i=0.136$  y  $p_0=0.007$ .



**Fig. 1 (Estado de la técnica)**



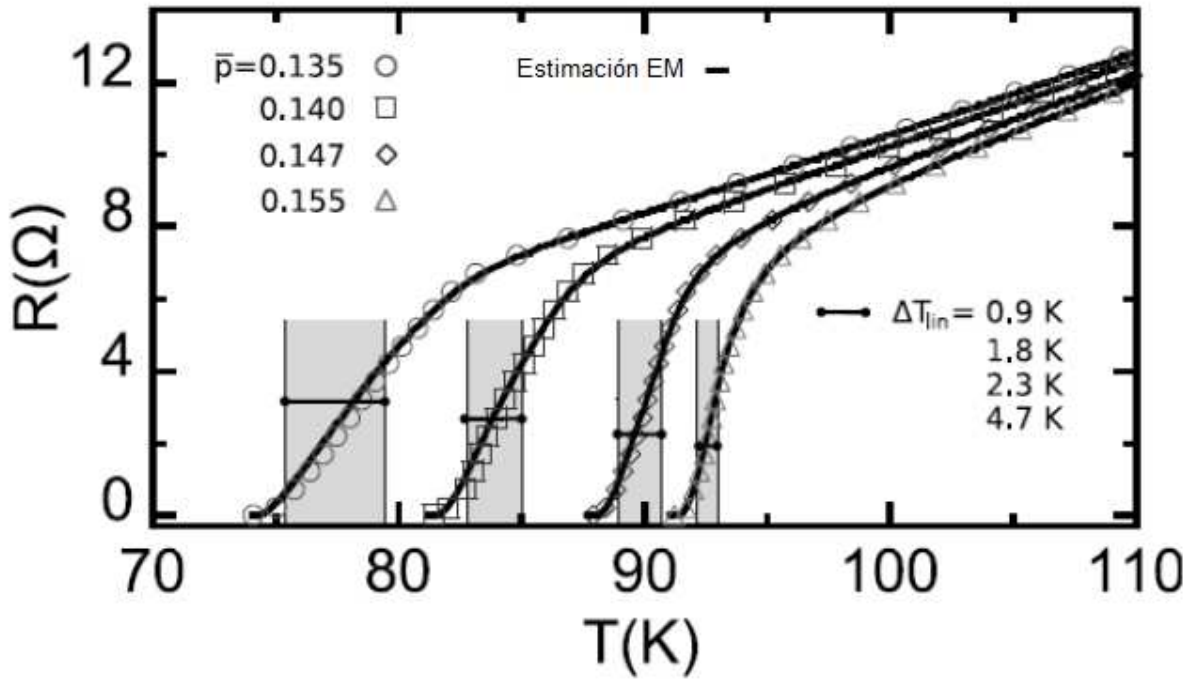
(A)



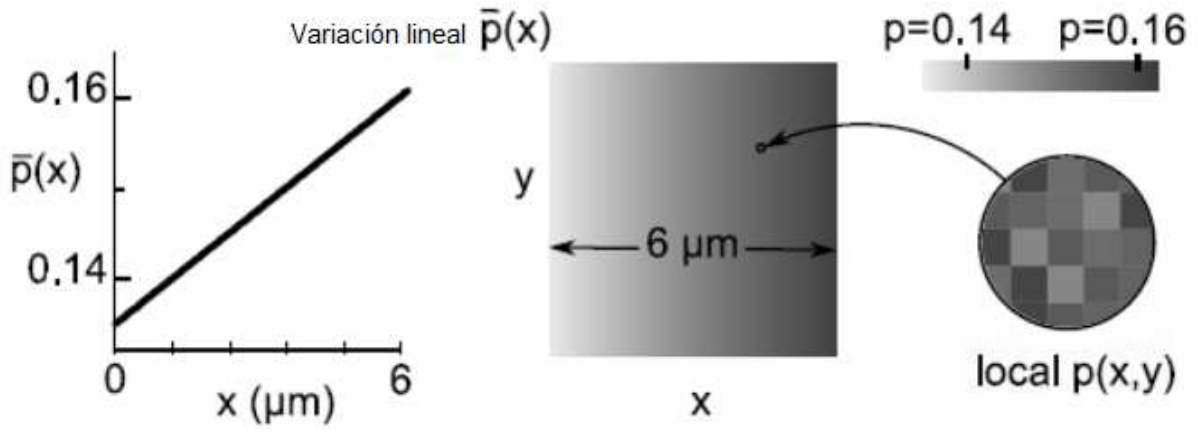
(B)

**Fig. 2 (Estado de la técnica)**

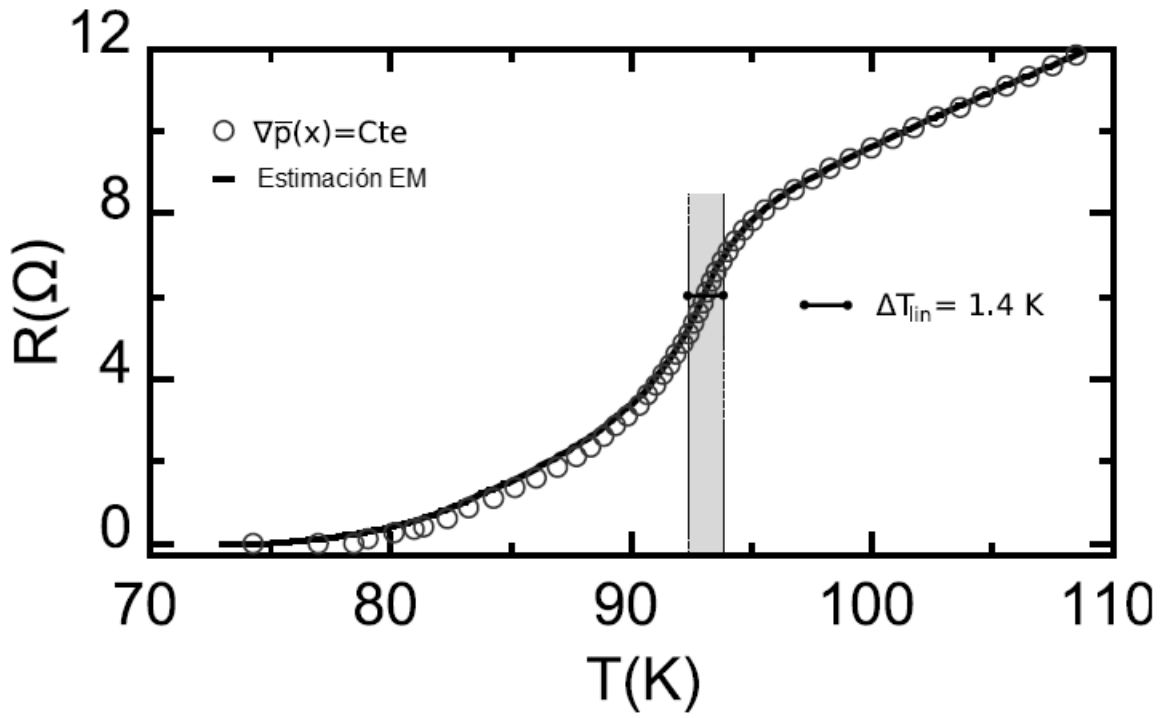




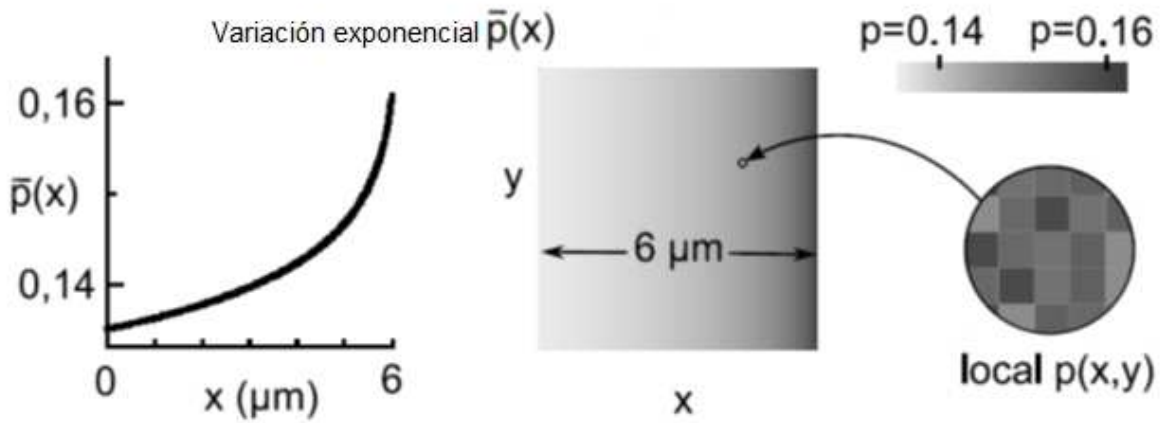
**Fig. 3**



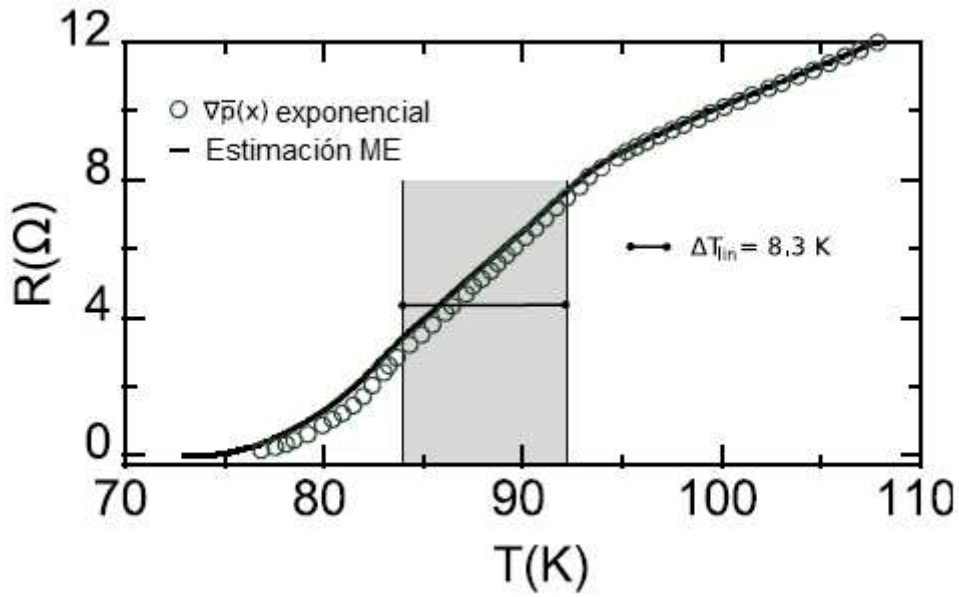
**Fig. 4**



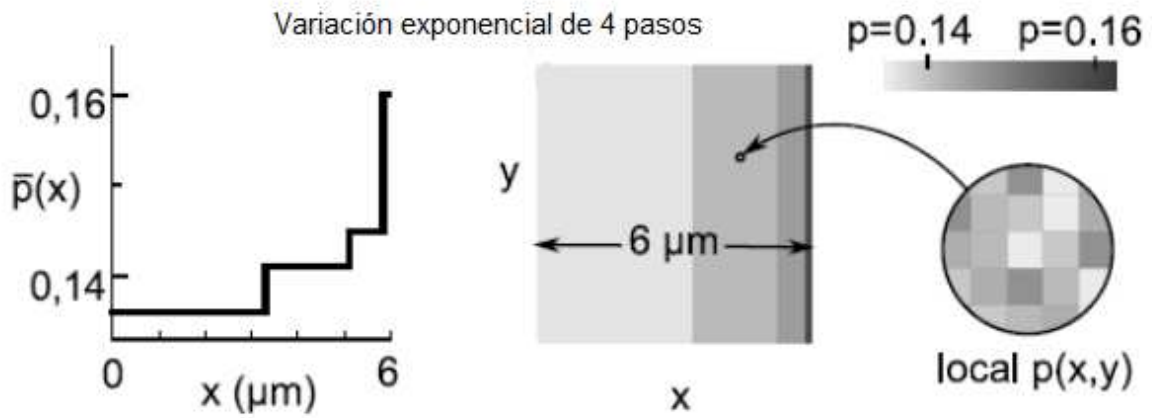
**Fig. 5**



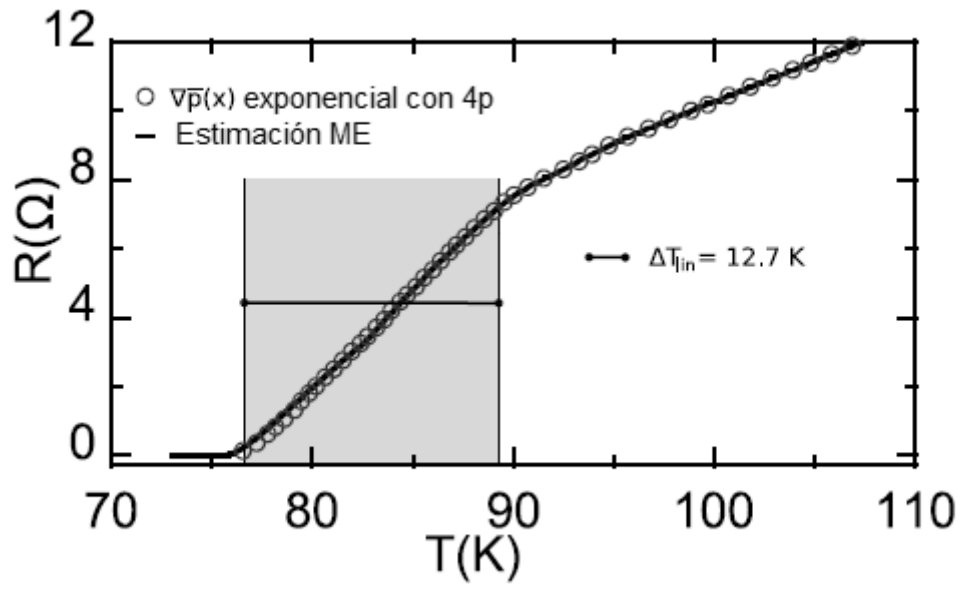
**Fig. 6**



**Fig. 7**



**Fig. 8**



**Fig. 9**