

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 582 328**

51 Int. Cl.:

**H03H 9/02** (2006.01)

**H03H 9/24** (2006.01)

**B81B 3/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.05.2012 E 12786090 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.04.2016 EP 2707953**

54 Título: **Dispositivo micromecánico**

30 Prioridad:

**13.05.2011 FI 20115465**

**13.05.2011 US 201161485646 P**

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

**12.09.2016**

73 Titular/es:

**TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY  
(100.0%)  
Vuorimiehentie 3  
02150 Espoo, FI**

72 Inventor/es:

**PRUNNILA, MIKA;  
JAAKKOLA, ANTTI y  
PENSALA, TUOMAS**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 582 328 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

Dispositivo micromecánico

**Campo de la invención**

5 La invención está relacionada con compensación de temperatura de dispositivos micromecánicos, en particular resonadores. El dispositivo según la invención comprende las características de los preámbulos de las reivindicaciones independientes.

**Antecedentes de la invención**

10 Los resonadores basados en cristal de cuarzo usados ampliamente se pueden sustituir potencialmente por resonadores micromecánicos, típicamente basados en silicio, en muchas aplicaciones. Los resonadores de silicio se pueden hacer más pequeños que los resonadores de cuarzo y hay una pluralidad de métodos de fabricación estándar para resonadores de silicio. Sin embargo, un problema asociado con resonadores basados en silicio es que tienen una alta deriva de temperatura de la frecuencia de resonancia. La deriva se debe principalmente a la dependencia con la temperatura del módulo de Young del silicio, que provoca un coeficiente de temperatura de la frecuencia (TCF) de aprox. -30 ppm/°C. Esto provoca que la frecuencia de resonancia fluctúe debido a cambios en la temperatura ambiente. Resonadores MEMS hechos de silicio ordinario tienen una deriva de temperatura de aproximadamente 3000 ppm en un intervalo de temperaturas de 100 °C de ancho.

15 La gran deriva de temperatura intrínseca impide que los resonadores basados en silicio entren al mercado de osciladores dominados por el cristal de cuarzo. Sin embargo, se sabe cómo compensar la dependencia de la temperatura de diversas maneras. Las soluciones de la técnica anterior incluyen:

- 20 - Compensación activa con un sensor de temperatura y circuitos de control electrónico relacionados, pero no ha sido posible proporcionar un resonador con deriva de temperatura suficientemente baja con tecnología de bajo coste que fuera adecuado para aplicaciones de producción en masa y compitan con la calidad del cuarzo. Además, el uso de un circuito de compensación de temperatura aumenta el consumo de energía, que es una desventaja significativa especialmente en dispositivos con funcionamiento a batería. Además, el circuito de compensación tiende a aumentar el ruido eléctrico en el circuito de resonador.
- 25 - Compensación activa por estabilización de la temperatura del resonador con aislamiento de temperatura y calentamiento/enfriamiento controlado del resonador. Sin embargo, esta solución también aumenta el consumo de energía del dispositivo, y hace que el dispositivo sea complicado de producir. Los circuitos de compensación de temperatura también son lentos de controlar, y por lo tanto no pueden compensar suficientemente bien cambios rápidos o grandes de temperatura ambiente.
- 30 - Compensación pasiva por adición de SiO<sub>2</sub> amorfo que exhibe signo opuesto de deriva de temperatura a la estructura. Esta tecnología se describe con más detalle, p. ej., en la publicación "Temperature compensation in silicon-based microelectromechanical resonators", F. Schoen et al. (ISBN: 978-1-4244-2978-3/09) y solicitud de patente internacional PCT/FI2010/050744. La compensación por SiO<sub>2</sub> lleva, sin embargo, a un equilibrio más complejo entre proceso de fabricación y prestaciones de resonador.
- 35 - Compensación pasiva por dopaje tipo-p fuerte, tal como dopaje con boro, compensa fuertemente para modos de cizalladura caracterizados por  $c_{44}$ , como el modo Lamé, pero menos o nada en absoluto en algunos otros modos, limitando la aplicabilidad a modos algo especiales y geometrías de excitación en el caso de piezoactuación. En particular, los modos de extensión no son bien compensados por dopaje tipo-p. Un resonador de silicio con dopaje tipo-p homogéneamente tiene una deriva de temperatura de aproximadamente 300 ppm en un intervalo de 100 °C.
- 40

Métodos de compensación pasiva se tratan en solicitudes de patente finlandesas aún no publicadas 20105849, 20105851 y 20115151 del mismo solicitante, así como referencias citadas en las mismas, en particular A.K. Samarao et al. "Passive TCF Compensation in High Q Silicon Micromechanical Resonators", IEEE International Conference in Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2010), 2010, pág. 116-119; US 2010/0127596 y US 45 4719383.

Un artículo de A.K. Samarao et al., "Intrinsic Temperature Compensation of Highly Resistive High-Q Silicon Microresonators via Charge Carrier Depletion", Frequency Control Symposium (FCS), 2010 IEEE International, 1-4 de junio de 2010, páginas: 334 - 339, describe un resonador de onda acústica en bruto que comprende elemento resonador de silicio con dopaje de boro (dopaje-p) para reducir la deriva de temperatura del resonador. El elemento resonador con dopaje de boro (dopaje-p) comprende, adicionalmente, una o más capa de fósforo difuso (dopaje-n) con el fin de crear una o más uniones-pn con el elemento resonador. Las uniones-pn que forman una región de agotamiento con baja concentración de portador de carga baja tienen el efecto de que se podría lograr un TCF local de -3 ppm/°C.

Otros resonadores MEMS se describen en el documento EP2302792A1 y de ARASH HAJJAM et al. "Temperature compensated single-device electromechanical oscillators" IEEE 24<sup>a</sup> International Conference in Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2011), 23/1/2011, publicado el 17/3/2011, páginas 801-804, ARASH HAJJAM et al. "Sub-100ppb/°C Temperature Stability in Thermally Actuated High Frequency Silicon Resonators via Degenerate Phosphorous Doping and Bias Current Optimization", IEEE International Electron Device Meeting, diciembre de 2010, describen también la posibilidad de dopaje tipo-n de silicio con fósforo con el fin de mejorar aún más la TCF.

Informan de una deriva de temperatura local de 0,05 ppm/°C en un resonador de silicio con dopaje térmicamente por difusión. El dopaje por difusión, sin embargo, tiene como resultado un fuerte gradiente de concentración de portadores de carga en el resonador y una concentración de dopante-n de aproximadamente  $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  o mayor, que se muestra más adelante como necesario para compensación eficiente de T, se puede crear únicamente en una región que penetra un grosor de aproximadamente 2 micrómetros desde la superficie del dispositivo. Los niveles de concentración logrados también pueden ser dependientes de la geometría exacta del dispositivo, que establece restricciones de diseño. Así, hay límites severos para el diseño del resonador con respecto a su volumen, grosor y disponibilidad de modos de resonancia, por ejemplo. Por ejemplo, modos de onda acústica en bruto no son compensados eficazmente en temperatura en resonadores con dopaje por difusión.

Técnicas de compensación conocidas proporcionan baja deriva de temperatura únicamente en intervalos de temperatura que a menudo son demasiado estrechos para, p. ej., uso de electrodomésticos.

Así, existe la necesidad de mejores resonadores de semiconductor compensado por temperatura y otros dispositivos.

## 20 **Compendio de la invención**

Una meta de la invención es proporcionar una estructura novedosa de semiconductor compensado en temperatura cuyas propiedades de sensibilidad a temperatura se puedan manejar bien no únicamente a nivel local, es decir, en una sola temperatura sino en un ancho intervalo de temperaturas.

La meta se logra mediante la invención según se define en las reivindicaciones independientes.

Según una realización, el dispositivo micromecánico comprende un elemento semiconductor anclado a una estructura de soporte de modo que puede desviarse o resonar, el elemento comprende al menos dos tipos de regiones que tienen diferentes propiedades de material. Las propiedades de material y volúmenes relativos de los materiales definen un material eficaz que tiene las características deseadas de compensación de temperatura. Con más detalle, cada una de dichas regiones comprende uno o más agentes de dopaje tipo-n, las concentraciones de dopaje, agentes de dopaje y/o orientaciones de cristal de las regiones se configuran de modo que las sensibilidades a temperatura de la rigidez generalizada son de signo opuesto al menos a una temperatura para las distintas regiones. Preferiblemente, dicha configuración es adicionalmente de manera que la deriva de temperatura total de la rigidez generalizada del elemento semiconductor es 50 ppm o menos en un intervalo de temperaturas de 100 °C. Este intervalo de temperaturas se centra típicamente alrededor de 25 °C.

Se ha encontrado que es posible proporcionar incluso dispositivos en los que la deriva de temperatura total de la rigidez generalizada del elemento semiconductor es 50 ppm o menos en un intervalo de temperaturas de 300 °C o incluso intervalos más anchos.

Adicionalmente, se proporcionan medios de impulso o detección acoplados funcionalmente a dicho elemento semiconductor para accionar o detectar dicha resonancia o desviación. También puede haber a la vez medios de impulso y detección

El término "deriva de temperatura" (de rigidez generalizada del elemento semiconductor en un intervalo de temperaturas) se utiliza para hacer una distinción a medición local de la sensibilidad a temperatura a únicamente una temperatura (expresada usualmente como TCF en unidades ppm/°C). En el caso de un resonador, la deriva de temperatura de la rigidez generalizada es igual al doble de la deriva de temperatura de la frecuencia del resonador.

El término "rigidez generalizada" es una función de los parámetros elásticos del material semiconductor, es decir, parámetros conocidos como  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  en el caso de cristales cúbicos, como cristales de silicio, y por ejemplo en el caso de resonadores representa la constante de resorte eficaz del modo de resonancia en el que el dispositivo se adapta para entrar en resonancia.

Según una realización, las regiones que tienen diferentes propiedades de material son regiones distintas, que significa que hay una interfaz afilada de propiedades de material entre las regiones. Según otra realización, las regiones se forman por un gradiente continuo de una o más propiedades de material.

Según una realización, las sensibilidades a temperatura de la rigidez generalizada son generalmente opuestas en todo dicho intervalo de temperaturas, o al menos en la mayoría del mismo, para las distintas regiones. Esto es, en

una región o regiones en las que una de las regiones tiene un coeficiente de temperatura positivo, otra región tiene un coeficiente negativo.

5 Las sensibilidades a temperatura pueden cambiar de magnitud y signo en el intervalo de temperaturas. Puede ser por ejemplo de modo que la primera región tenga una sensibilidad a temperatura negativa a una segunda temperatura diferente de la primera temperatura, y dichas segunda región tenga una sensibilidad a temperatura positiva de la rigidez generalizada a una segunda temperatura.

Según la realización preferida la al menos una primera región y al menos una segunda región comprenden diferentes concentraciones de dopaje del uno o más agentes de dopaje tipo-n. Las diferentes concentraciones de dopaje-n contribuyen o provocan enteramente la diferencia en las sensibilidades a temperatura.

10 Según una realización la al menos una primera región y al menos una segunda región comprenden diferentes agentes de dopaje tipo-n. Los diferentes agentes de dopaje-n contribuyen o provocan enteramente la diferencia en las sensibilidades a temperatura.

15 Según una realización la al menos una primera región y al menos una segunda región comprenden diferentes orientaciones de cristal. Las orientaciones de cristal contribuyen o provocan enteramente la diferencia en las sensibilidades a temperatura.

Según una realización, la diferencia en las sensibilidades a temperatura es una consecuencia de dos o más de las configuraciones mencionadas anteriormente.

Según una realización, las regiones se configuran de modo que la deriva de temperatura total de la rigidez generalizada del elemento semiconductor sea 10 ppm o menos en un intervalo de temperaturas de 100 °C.

20 Las regiones que tienen diferentes propiedades de material se vinculan mecánicamente de manera que forman un elemento resonador, por ejemplo, cuya deriva de temperatura total es diferente de las derivas de temperatura de cada una de las distintas regiones. Según una realización, las regiones se apilan una encima de otra en una dirección de grosor del elemento semiconductor. Según una realización, las regiones se disponen lateralmente, es decir, en dirección de anchura, una respecto a otra en el elemento semiconductor. Si hay más de dos regiones, también es posible una combinación de estos planteamientos.

25 Según una realización, los al menos dos tipos de región se repiten periódicamente para formar una estructura de superrejilla. Esto significa que hay una secuencia que se encuentra en dos lugares del resonador esencialmente en la misma forma. Por ejemplo, en el caso de dos tipos diferentes de regiones A y B, puede ser una pila ABAB. En el caso de tres tipos diferentes de regiones A, B y C, puede ser una pila ABCABC.

30 Según una realización, la concentración de dopaje en un tipo de región es  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  o menos en uno y más de  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  en otro tipo de región.

Según una realización, la concentración de dopaje en un tipo de región es  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  o menos en uno y más de  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  en otro tipo de región.

35 Según una realización, el tipo de regiones que tienen una concentración de dopaje-n más grande (el más grande) que el otro tipo (de todos tipos) de dichas regiones se proporciona en mayor volumen que el otro tipo de regiones.

Según una realización, la concentración de dopaje del tipo de regiones que tienen una concentración de dopaje-n más grande (el más grande) que el otro tipo (de todos tipos) de dichas regiones forma al menos un 35 % del volumen total del elemento semiconductor.

40 En una realización particular el dispositivo comprende un tipo de región con una concentración de dopaje de  $5 \times 10^{19} - 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , este tipo de región asciende al 35 - 75 % del volumen total del elemento resonante, y otro tipo de región que no está dopada o que tiene una concentración de dopaje de menos de  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , este tipo de región asciende al 25 - 65 % del volumen total del elemento resonante.

Según una realización, la concentración de dopaje-n en cada una de las regiones es esencialmente homogénea.

45 Según una realización, el elemento semiconductor es un elemento resonador alineado con la matriz de cristal del material semiconductor de manera que el resonador exhibe un modo de resonador cuya frecuencia modal es dominada por el término de elasticidad (c11-c12) de los materiales semiconductores del elemento resonador. Esta expresión significa que no más del 20 % de la contribución de frecuencia procede de otros términos (p. ej., el término  $c_{44}$ ).

50 Las regiones pueden ser, p. ej., capas de silicio crecidas epitaxialmente (apilamiento vertical). Según una realización, las regiones son zanjas fabricadas por proceso de llenado de zanja (apilamiento horizontal). Según una realización se utiliza un proceso de implantación y recocido. Según todavía una realización adicional, se utiliza una

técnica de unión de oblea. Estas técnicas también se pueden combinar de una manera adecuada para lograr la estructura deseada para el elemento semiconductor.

5 Según una realización, el dispositivo es un resonador, por el que el elemento semiconductor es un elemento resonante anclado a una estructura de soporte y el dispositivo comprende medios de impulso eléctrico para sacar un modo de resonancia para el elemento resonante. El resonador se puede utilizar en diversas aplicaciones, por ejemplo aquellas en las que actualmente se utilizan resonadores de cuarzo u otros tipos de resonadores de silicio.

Los medios de impulso o detección pueden comprender, p. ej., medios de impulso o detección piezoeléctricos dispuestos en contacto mecánico con el elemento semiconductor. También se puede utilizar accionamiento electrostático.

10 Si los medios de impulso y/o detección tienen una contribución significativa a la sensibilidad a temperatura del dispositivo, las concentraciones de dopaje o volúmenes relativos de los tipos de región se adaptan para compensar los efectos de los medios de impulso y/o detección en la sensibilidad a temperatura.

Según un ejemplo, el presente método para diseñar un dispositivo micromecánico comprende

- elegir un material semiconductor básico para el elemento semiconductor,
- 15 - elegir un dopante-n a añadir al material semiconductor,
- diseñar la estructura interior del material semiconductor,

20 en donde el diseño de la estructura interior comprende determinar al menos dos concentraciones de dopante-n, tipos y/o orientación de cristal de capas con dopaje-n y sus volúmenes relativos en las distintas regiones del elemento semiconductor de modo que la deriva de la sensibilidad a temperatura de la rigidez generalizada del elemento semiconductor sea inferior a 50 ppm, en particular inferior a 10 ppm en un intervalo de temperaturas de 100 °C.

25 Según una realización, el elemento resonador comprende un cristal crecido por método Czochralski, en el que el uno o más agentes de dopaje tipo-n están presentes ya en la fase de crecimiento de cristal. Según otra realización, el elemento resonador comprende un cristal que ha crecido epitaxialmente con el uno o más agentes de dopaje tipo-n ya presentes en la fase de crecimiento. Estos dos métodos se pueden utilizar para producir dopaje homogéneo del cristal en cada región distinta. La fabricación es directa, p. ej., alterando la cantidad de dopante-n depositado en cada región distinta.

30 La invención ofrece ventajas significativas. Las estructuras reivindicadas han mostrado un gran potencial en compensación de temperatura pasiva en amplios intervalos de temperaturas. No únicamente se compensa eficazmente el coeficiente de temperatura de primer orden, sino también el orden más alto, en particular los coeficientes de temperatura de segundo y, opcionalmente, tercer orden.

35 En particular, la configuración del material eficaz se puede diseñar de manera que los términos de primer y segundo orden de los coeficientes de temperatura de los diferentes materiales del elemento semiconductor se cancelen entre sí al nivel reivindicado. Como se muestra con los ejemplos y la teoría de más adelante, esto tiene como resultado una disminución relativa significativa en la deriva de temperatura total en un amplio intervalo de temperaturas, comparado con componentes del material eficaz solo.

La estructura de resonador entera se puede hacer de material con dopaje-n sin la necesidad de usar óxidos, por ejemplo, que provocan pérdida de prestaciones.

La invención se puede aplicar al menos para todos materiales semiconductores de muchos valles, de los que silicio con dopaje-n es un ejemplo.

40 También la estructura se puede implementar sin dopantes-n. Por consiguiente, la presencia de uniones-pn se evita en el resonador.

A continuación, se describirán con más detalle realizaciones de la invención con referencia a los dibujos adjuntos.

### Breve descripción de los dibujos

45 La figura 1 muestra cómo se cambia la deriva de temperatura si un resonador dopado homogéneamente se sustituye por una superrejilla.

Las figuras 2a. c ilustran con más detalle el principio de compensación de temperatura con gráficas de frecuencia vs. temperatura para dos concentraciones diferentes de dopante-n (n) y su configuración de superrejilla.

Las figuras 3 ilustran, en el caso de resonador dopado homogéneamente, (a) variación (en ppm) de la frecuencia de resonancia vs. concentración de dopante como un trazado de contorno, (b) la variación total de frecuencia en un intervalo de temperaturas de 100 °C vs. concentración de dopante y (c) la variación de frecuencia como una función de la temperatura a una densidad de dopante óptima.

5 Las figuras 4-9 (a)-(c) muestran gráficas correspondientes a las figuras 3a-c para diversas configuraciones según realizaciones de la invención.

Las figuras 7d y 8d muestran gráficas de frecuencia vs. temperatura para regiones y superrejillas según algunas realizaciones de la invención.

10 Las figuras 10-14 muestran la diferencia de frecuencia en ppm como una función de la temperatura para realizaciones adicionales y ejemplos de la invención.

Las figuras 15-17 muestran gráficas y esquemas que soportan a estudios teóricos llevados a cabo para soportar la invención.

### Descripción detallada de realizaciones

15 En la siguiente descripción, se describe una realización en la que distintas regiones de un elemento resonador semiconductor comprenden diferentes concentraciones de dopante-n, incluyendo algunas variaciones.

20 En una imagen simplificada, la pendiente de la frecuencia de resonador vs. temperatura, es una pendiente positiva o negativa en cada punto de temperatura, dependiendo de la concentración de dopante. Estos efectos se pueden combinar para cancelarse entre sí no únicamente en algunos puntos sino en toda la región ancha de temperatura, si el resonador se forma de un material eficaz optimizado que comprende regiones laterales y/o verticales arbitrarias con diferentes niveles de dopaje.

Estas regiones no tienen que ser discretas: las concentraciones dentro del cuerpo de resonador también pueden variar continuamente dentro del volumen de resonador, y se puede obtener el mismo efecto de cancelación.

25 Según una realización, el elemento semiconductor es una viga. El término "viga" generalmente se refiere a elementos cuya relación de aspecto en el plano (anchura vs. longitud) es al menos 5. Típicamente, la relación de aspecto es al menos 10.

Según una realización, el elemento semiconductor es una placa. La placa puede ser rectangular. Por ejemplo, puede ser una placa cuadrada. La placa también puede ser poligonal, circular o elíptica. La relación de aspecto de una placa (cualquier dimensión lateral vs. grosor) es inferior a 5.

30 Según un aspecto, el dispositivo según la invención comprende elemento resonador al menos parcialmente con dopaje-n y comprende medios de transductor para excitar un modo de resonancia en el elemento resonador. El modo de resonancia puede ser uno de los siguientes:

- modo de cizalladura en un elemento resonador de placa,
- modo de extensión cuadrada (SE) en un elemento resonador de placa,
- modo de extensión en anchura (WE) en un elemento resonador de placa,
- 35 - modo de flexión en un elemento resonador de placa,
- modo de extensión en un elemento resonador de viga,
- modo de flexión en un elemento resonador de viga, o
- modo de torsión en un elemento resonador de viga.

40 Según una realización, el elemento resonante se adapta para ser excitado con los medios de impulso a un modo Lamé, que es un ejemplo particular de modo de cizalladura en una placa rectangular.

Si el elemento resonador es una placa, se puede fabricar en una oblea (100) de manera que los lados de la placa coincidan con las direcciones [100] del cristal del material semiconductor del elemento resonador.

Si el elemento resonador es una viga adaptada para entrar en resonancia en un modo de torsión, se puede fabricar

- 45 - en una oblea (100) o en una oblea (110), estando el eje principal de la oblea orientado a lo largo de la dirección [110] del material semiconductor, o

- en una oblea (110) de modo que el eje principal de la viga esté a lo largo de una dirección que se obtiene rotando la viga dentro del plano 20-50 grados desde la dirección [110] hacia la dirección [100] del material semiconductor.

5 Si el elemento resonador es una viga adaptada para entrar en resonancia en un modo de extensión o de flexión, el eje principal de la viga se puede orientar a lo largo de la dirección [100] del material semiconductor.

Estos modos, geometrías adecuadas y orientaciones de cristal para ellas y su compensación de temperatura local se tratan más específicamente en nuestra solicitud previa FI 20115151.

10 Según una realización, el material eficaz comprende una superrejilla vertical en la que se alteran capas de silicio con diferentes concentraciones de dopaje-n. Ha mostrado que una deriva inferior a 10 ppm en un intervalo de temperaturas amplio de 100 °C se puede lograr con dicha configuración. Una pila de superrejilla ejemplar de capas de silicio con niveles de dopaje alternos  $n_1$  y  $n_2$  se ilustra en las figuras 1 y 2c. Ejemplos de modos de resonancia que se pueden compensar con esta forma de disposición son el modo Lamé de un resonador de placa y ciertos modos de flexión/extensión y torsión de un resonador de placa. Una manera práctica de fabricar una superrejilla de silicio vertical es hacer crecer silicio epitaxialmente sobre un sustrato. La concentración de dopante-n se puede controlar durante el crecimiento, lo que produce un perfil de concentración dependiente del grosor.

15 Otra manera práctica de formar una superrejilla de silicio es unir en oblea dos obleas de silicio que tengan diferentes concentraciones de dopante-n. Los grosores de las obleas unidas se deben controlar de tal manera que sus proporciones sean correctas para minimizar la deriva de frecuencia debida a temperatura.

20 Además de epitaxial los diferentes niveles de dopaje se pueden crear por implantación y recocido posterior. En este método la superficie superior de un semiconductor se implanta con alta dosis de dopantes tipo-n. La etapa de recocido activa la dosis y simultáneamente conduce los dopantes más profundamente en el semiconductor. Así, se crea un perfil de dopaje vertical. Enmascarando diferentes regiones antes de la implantación, este método también puede dar perfiles laterales. Este método se puede combinar con unión en oblea, que permite, por ejemplo, que la superficie inferior de la capa activa de Si en oblea de silicio sobre aislamiento (SOI) tenga mayor concentración de dopaje que la superficie superior. Dicha estructura se puede implantar además desde la parte superior (y recocer) cuando la parte inferior y la parte superior de la capa Si tienen mayor dopaje y la parte media menor dopaje.

25 Los dispositivos según la invención se pueden accionar con medios de impulso, es decir, medios de transductor conocidos per se. Según una realización los medios de transductor comprenden un elemento accionador piezoeléctrico. Según otra realización, los medios de transductor comprenden medios de accionamiento electrostático. Más específicamente estas técnicas se tratan en el documento FI 20115151 y sus subreferencias.

30 A continuación se tratan con más detalle algunos diseños ejemplares de un resonador de placa en un modo Lamé y un ejemplo de un resonador de viga.

#### **Dopaje homogéneo (resonador Lamé)**

35 Investiguemos primero cómo se comporta la frecuencia de un resonador Lamé dopado homogéneamente como función de densidad de dopante-n ( $\text{cm}^{-3}$ ) y temperatura (K). La figura 3a muestra la variación ppm de la frecuencia de resonancia como un trazado de contorno (frecuencias a  $T=300$  K han sido la referencia para el cálculo de variación ppm, y la pendiente como función de n se ha eliminado del trazado.

40 Se observa que hay dos regiones de meseta: una a aproximadamente  $\lg_{10}(n) = 19$ , y la otra  $\lg_{10}(n) = 20,2$ . Sin embargo, ninguna de estas mesetas es "horizontal" - como resultado de que la frecuencia cambia como función de la temperatura para todas densidades n de dopante-n.

La variación total de frecuencia en todo el intervalo de temperaturas  $T=250 \dots 350$  K en cada densidad de dopante-n se muestra en la figura 3b.

45 Hay dos mínimos correspondientes a las mesetas mencionadas anteriormente. La variación de frecuencia total mínima de 100 ppm en un intervalo de 100 °C se obtiene a  $n = 1,55e20 \text{ cm}^{-3}$ . La figura 3c muestra la variación de frecuencia como función de la temperatura a la densidad de dopante-n donde se produce la minimización.

#### **Ejemplo 1 de configuración de superrejilla (resonador de placa en modo Lamé)**

Las figuras 4a - 4c muestran gráficas correspondientes a las de las figuras 3a - 3c pero utilizando una superrejilla con los siguientes parámetros de diseño:

$$n_a = 1,44e20 \text{ cm}^{-3}, p_a = 0,656 \text{ (aproximadamente 66 \%)}$$

50  $n_b = 1e19 \text{ cm}^{-3}, p_b = 0,344 \text{ (aproximadamente 34 \%)}$

donde  $n_i$  indica la concentración de dopante-n, y  $p_i$  indica el volumen relativo de material i. Esta configuración disminuye la variación de frecuencia total de 100 ppm a 3 ppm en un intervalo de 100 °C.

**Ejemplo 2 de configuración de superrejilla (resonador de placa en modo Lamé)**

5 Es beneficioso si se pueden utilizar menores densidades de dopante-n para la superrejilla. Las figuras 5a - 5c muestran gráficas correspondientes a las de las figuras 4a - 4c y 3a - 3c pero utilizando una superrejilla con los siguientes parámetros de diseño:

$$n_a = 7,87e19 \text{ cm}^{-3}, p_a = 0,639 \text{ (aproximadamente 64 \%)}$$

$$n_b = 1e18 \text{ cm}^{-3}, p_b = 0,361 \text{ (aproximadamente 36 \%)}$$

10 Esta configuración disminuye la variación de frecuencia total de 100 ppm a 9 ppm en un intervalo de 100 °C, que no es tan bueno como antes pero se logra con un nivel de concentración significativamente menor.

**Ejemplo 3 de configuración en superrejilla (resonador de viga en modo de extensión o flexión)**

Los ejemplos anteriores muestran que la deriva de temperatura de resonador en modo Lamé se puede reducir utilizando la superrejilla de silicio con dopaje-n. De una manera similar la invención se puede aplicar a resonadores de viga con un modo de resonancia de extensión o flexión.

15 La deriva de temperatura de dicho modo de resonancia se puede minimizar, p. ej., con una pila de superrejilla de

$$n_a = 1,03e20 \text{ cm}^{-3}, p_a = 0,733 \text{ (aproximadamente 73 \%)}$$

$$n_b = 9e18 \text{ cm}^{-3}, p_b = 0,267 \text{ (aproximadamente 27 \%)}$$

Las figuras 6a - 6c muestran gráficas correspondientes a las de las figuras 3-5 para este caso. La deriva de frecuencia total calculada es 6 ppm en un intervalo de 100 °C.

20 De manera similar, también se pueden encontrar parámetros de diseño adecuados que minimizan la deriva de frecuencia para resonadores de viga en un modo de resonancia a torsión.

**Ejemplo 4 de configuración de superrejilla (resonador de placa en modo Lamé)**

25 Este ejemplo demuestra que el efecto puede ser aplicable a una superrejilla, en la que la región con menor concentración de dopante-n (material "b") es silicio "no dopado" o dopado de manera relativamente débil, de modo que un resonador de material "b" solo tendría un coeficiente de temperatura de 1<sup>er</sup> orden del orden de -30 ppm/°C. Se han calculado valores  $c_{ij}$  de elementos de matriz elástico de material "b" como función de la temperatura utilizando datos de C. Bourgeois et al., "Design of resonators for the determination of the temperature coefficients of elastic constants of monocrystalline silicon", en Frequency Control Symposium, 1997., Proceedings del 1997 IEEE International, 1997, 791-799. Se asume que el material b es silicio dopado con fósforo tipo-n con resistividad de 0,05 Ωcm, que corresponde a concentración de fósforo de menos de  $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Se calculan propiedades de material "a" por la teoría presentada a continuación en una sección de teoría.

30 En la configuración óptima, la concentración de dopante-n de material "a" es  $n_a = 7,50e19 \text{ cm}^{-3}$ , y las cantidades relativas de materiales a y b son  $p_a = 0,68$  (68 %)  $p_b = 0,32$  (32 %), respectivamente.

35 Las figuras 7a - 7c muestran gráficas correspondientes a las de las figuras 3-6 para este caso. La deriva de frecuencia total son 8 ppm en un intervalo de 100 °C.

La figura 7d ilustra las contribuciones individuales de materiales "a" y "b", y muestran en detalle la dependencia de temperatura de superrejilla. Los títulos en la figura incluyen los coeficientes de temperatura hasta tercer orden.

40 Soportado por el resultado de este ejemplo, además de los materiales de silicio simulados con dopaje n/p calculados en el ejemplo, el material "b" también puede ser silicio policristalino, que se sabe que tiene un TCF lineal de aproximadamente -30 ppm/C.

**Ejemplo 5 de configuración de superrejilla (resonador de placa en modo Lamé)**

45 Este ejemplo es similar al ejemplo 4 anterior, con la excepción de material b con dopaje-p de manera relativamente débil en lugar de dopaje-n débil. De nuevo, el coeficiente de temperatura de material "b" es aproximadamente -30 ppm/C. Se han calculado valores  $c_{ij}$  de elementos de matriz elástica de material b como función de la temperatura utilizando datos de C. Bourgeois et al. Se asume que el material b es silicio dopado con boro tipo-n con resistividad de 4 Ωcm, que corresponde a concentración de boro de menos de  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Se calculan propiedades de material "a" por la teoría presentada en una sección de teoría.

En la configuración óptima, la concentración de dopante-n óptima de material "a" es

$n_a = 7,15e19 \text{ cm}^{-3}$ , y las cantidades relativas de materiales "a" y "b" son  $p_a = 0,68$  (68 %)  $p_b = 0,32$  (32 %), respectivamente.

5 Las figuras 8a - 8c muestran gráficas correspondientes a las de las figuras 3-7 para este caso. La deriva de frecuencia total son 8 ppm en un intervalo de 100 °C.

La figura 8d ilustra las contribuciones individuales de los materiales "a" y "b", y muestran en detalle la dependencia de temperatura de superrejilla. Los títulos de figura incluyen los coeficientes de temperatura hasta tercer orden.

**Ejemplo 6 de configuración de superrejilla (resonador de placa en modo Lamé con efecto de expansión térmica)**

10 En todos ejemplos anteriores los efectos de expansión térmica se han despreciado. Como se trata en la sección "Modelo teórico para TCF lineal de un resonador" más adelante, una contribución a TCF de resonador proviene de la expansión térmica. Este ejemplo ilustra qué sucede a la configuración de superrejilla óptima, cuando se tienen en cuenta efectos de expansión térmica. En el cálculo se han utilizado coeficientes de expansión térmica como los informados en el documento de C. Bourgeois et al., hasta 2º orden.

15 Las figuras 9a-c muestran el resultado para un ejemplo que es similar al de las figuras 7a-c (ejemplo 4), con la excepción de que se tiene en cuenta el efecto de la expansión térmica.

Se observa que la configuración de superrejilla óptima se cambia de ( $n_a = 7,50e19 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_a = 0,68$ ,  $p_b = 0,32$ ) a ( $n_a = 5,94e19 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_a = 0,48$ ,  $p_b = 0,52$ ), que produce una deriva de frecuencia total de 5 ppm en un intervalo de temperaturas de 100 °C.

20 Este ejemplo demuestra que la invención se puede utilizar para reducir notablemente la deriva de frecuencia total de un resonador al intervalo reivindicado a pesar del efecto de la expansión térmica, aunque al encontrar parámetros de superrejilla adecuados puede cambiar. Hablando generalmente, en una superrejilla de dos materiales, si el tipo de material que tiene una concentración de dopaje-n más grande que el otro tipo de material forma al menos el 35 % del volumen total del elemento semiconductor, se puede cumplir esta condición.

**25 Ejemplo 7 de configuración de superrejilla (resonador de placa en modo Lamé, simulación de método por elementos finitos)**

Se realizó un análisis modal de método por elementos finitos para una placa de silicio de 320x320x15 um para confirmar la validez del ejemplo 2. Se modelizó la placa para que consistiera en una pila vertical de dos regiones, región A que era la capa inferior de grosor  $p_a \cdot 15 \text{ um}$  y que tenía una concentración de dopante  $n_a$ , y región B que era la capa superior de grosor  $p_b \cdot 15 \text{ um}$  y tenía una concentración de dopante  $n_b$ . Se alinearon lados de placa a lo largo de las direcciones de cristal [100].

30 Se utilizó Comsol multiphysics para las simulaciones. El análisis se realizó para diversas temperaturas ( $T=250...350 \text{ K}$ ), y se calcularon elementos de matriz de rigidez  $c_{ij}$  para materiales A y B en cada temperatura según la teoría descrita antes en la sección de teoría

35 Utilizando exactamente los mismos parámetros que en el ejemplo 2, es decir,  $n_a = 7,87e19 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_a = 0,639$ ,  $n_b = 1e18 \text{ cm}^{-3}$  and  $p_b = 0,361$ , se obtuvo una variación de frecuencia como función de la temperatura que corresponde bastante a la calculada en el ejemplo 2.

40 La figura 10 muestra la diferencia de frecuencia en ppm como una función de la temperatura. Los puntos azules (B) muestran datos simulados. La curva roja (R) muestra polinomial de 3º orden ajustada a los datos de simulación. La curva verde (G) muestra datos calculados en el ejemplo 2. La diferencia más pequeña puede haber ocurrido debido a la imprecisión numérica (el tamaño máximo de elemento de malla FEM fue 50x50x5 um) y también debido al hecho de que el modo de resonancia puede ser perturbado ligeramente debido a una pila no simétrica (en las direcciones de grosor) formada por los materiales A y B.

**45 Ejemplo 8 de configuración de superrejilla (resonador de viga en modo de extensión en longitud, simulación de método por elementos finitos)**

De una manera similar al ejemplo 7, se simuló el modo de resonancia en extensión en longitud de un resonador de viga de dimensiones de 320\*20\*15 um (lados alineados con la dirección de cristal [100]). La figura 11 muestra la variación de frecuencia en unidades ppm, que es acorde con el resultado del ejemplo 2. Parámetros de superrejilla fueron

50  $n_a = 1,03e20 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_a = 0,733$ ,  $n_b = 9e18 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_b = 0,267$  (como en el ejemplo 2).

**Ejemplo 9 de configuración de superrejilla (resonador de viga en modo de flexión en el plano, simulación de método por elementos finitos)**

Se simuló el modo de resonancia en flexión (doblez) en el plano del resonador de viga del ejemplo 8. Dado que la dependencia de la frecuencia de resonancia en los parámetros  $c_{ij}$  es ligeramente diferente del modo de resonancia en extensión de longitud del ejemplo 8 (tratado en el contexto del documento FI 20115151, en cierto modo más grande (25 ppm en un intervalo de 100 °C) se observa deriva de frecuencia, cuando los parámetros de superrejilla son similares a los del ejemplo 8 (figura 12a).

Sin embargo, una configuración de superrejilla más óptima se obtiene aumentando ligeramente la cantidad relativa de material A: cuando los parámetros de superrejilla son  $n_a = 1,03e20 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_a = 0,75$ ,  $n_b = 9e18 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_b = 0,25$ , se llega a una deriva de frecuencia total de 5 ppm en un intervalo de 100 °C (véase la figura 12b).

**Ejemplo 10 de configuración de superrejilla (resonador de viga en modo de flexión fuera del plano, simulación de método por elementos finitos)**

En este ejemplo se investiga el modo de resonancia de flexión (doblez) fuera del plano de la viga de los ejemplos 8 y 9. En este caso el método analítico de cálculo de la frecuencia de resonancia de material eficaz ya no es válido, como se trata en la sección "Efecto de promedio". Cuando se utilizan parámetros de superrejilla del ejemplo 9 la deriva de frecuencia permanece sobre el nivel de 200 ppm (figura 13a).

Una configuración de superrejilla más óptima es  $n_a = 1,03e20 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_a = 0,89$ ,  $n_b = 9e18 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_b = 0,11$ . Con estos parámetros se llega a una deriva de frecuencia de 6 ppm en un intervalo de 100 °C (figura 13b).

**Ejemplo 11 de configuración de superrejilla (resonador de viga en modo de torsión, simulación de método por elementos finitos)**

Se simuló un resonador de viga en un modo de resonancia de torsión de la misma manera que en ejemplos anteriores. Las dimensiones laterales de viga fueron 320x20 um y su grosor era de 10 um. Los lados se orientaron a lo largo de las direcciones [110]; la normal que define la dirección de grosor fue [100].

Con configuración de superrejilla  $n_a = 1,03e20 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_a = 0,90$ ,  $n_b = 9e18 \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_b = 0,10$ , se llegó a una deriva de frecuencia de 5ppm en un intervalo de 100 °C (figura 14).

**Variaciones de la invención**

## Variaciones

Los ejemplos anteriores actúan para probar la viabilidad de la invención. Hay un conjunto interminable de tipos diferentes de combinaciones de capa de las superrejillas minimizadoras de deriva de temperatura para diversos diseños de resonador y modos de resonancia que se encuentran dentro del alcance de la invención. Por ejemplo,

se podrían utilizar más de dos concentraciones-n para las capas,

al elegir la capa hay libertad para los grosores y el orden de las capas,

la superrejilla no tiene que ser una pila discreta (por ejemplo, la concentración-n se puede variar continuamente como función del grosor),

la superrejilla puede tener periodicidad en dos dimensiones (por ejemplo, puede ser una distribución de regiones locales de un tipo de material en otro tipo de material en el plano de oblea),

una o algunas de las regiones pueden ser no dopadas o con dopaje-p, en particular dopaje-p ( $n < 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ).

La respuesta de frecuencia vs temperatura del resonador se puede adaptar también con un objetivo de optimización diferente a la minimización de deriva de temperatura. Por ejemplo, en el caso de un resonador piezoactivado el objetivo puede ser compensar la contribución de las partes que no son de silicio (piezomaterial + metales relacionados) con la deriva de frecuencia. En tal caso, las partes que no son de silicio también se cubren con el término elemento resonador, ya que afectan a la frecuencia de resonancia y entran en resonancia con el elemento.

Los principios de la invención se pueden aplicar no únicamente a resonadores sino a cualquier dispositivo micromecánico distinto a un resonador (p. ej. acelerómetro, giroscopio) que contenga uno o más resortes que sean una parte integral para la funcionalidad del dispositivo y que experimentan flexión, extensión, torsión en el modo de funcionamiento del dispositivo. Esto es porque la deriva de temperatura de la rigidez k de cualquier resorte que experimenta extensión, doblez o torsión se puede reducir utilizando una superrejilla con dopaje-n. Por lo tanto, la invención se puede aplicar para cualquier dispositivo MEMS cuyas prestaciones dependan de dichos resortes.

Además, el material eficaz no tiene que ser una superrejilla, es decir, una estructura repetitiva. En lugar de eso, también se pueden utilizar algunas otras configuraciones de capa, siempre que formen un sistema de resorte acoplado y las pendientes de las sensibilidades a temperatura coincidan adecuadamente en cada punto del intervalo de temperaturas deseado.

5 **Teoría**

Investigaciones teóricas proporcionan soporte adicional para la invención. A continuación, se introducen brevemente algunos modelos que se pueden utilizar para explicar los ejemplos mencionados anteriormente.

Efecto de promedio

10 Considérese primero un resonador hecho de una superrejilla de pila vertical. Se asume que el resonador entra en resonancia en un modo de resonancia cuya frecuencia es independiente del grosor. Esta suposición se mantiene, p. ej., para el modo de resonancia de Lamé de un resonador de placa, y aproximadamente se mantiene para el modo de extensión al cuadrado de un resonador de placa así como para un modo de resonancia de extensión en anchura/extensión en longitud de un resonador de viga.

15 En general, un resonador se puede describir como un sistema de masa de resorte. Por consiguiente, un resonador hecho de una superrejilla de silicio  $n_1/n_2$  se puede modelar como un sistema de dos masas de resorte acopladas rígidamente  $(k_1, m_1)$  y  $(k_2, m_2)$ , véase la figura 17. En este planteamiento los parámetros de modelo concentrado  $k_i, m_i$ , representan la contribución de todas las capas del tipo  $i$  de la pila de superrejilla.

Como resortes en paralelo se añaden entre sí, se mantiene que la frecuencia de resonador compuesta es la suma rms ponderada de las frecuencias de resonador "virtual":

$$\begin{aligned} (2\pi f_{total})^2 &= \frac{k_{total}}{m_{total}} = \frac{k_1 + k_2}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{k_1}{m_1} (m_1 / m_{total}) + \frac{k_2}{m_2} (m_2 / m_{total}) \\ &= p_1 (2\pi f_1)^2 + p_2 (2\pi f_2)^2 \end{aligned}$$

⇒

20 
$$f_{total} = \sqrt{p_1 f_1^2 + p_2 f_2^2},$$

donde los pesos  $p_i$  son las cantidades relativas de los materiales 1 y 2, respectivamente.

El resultado se puede generalizar para un caso de una cantidad arbitraria de capas diferentes, es decir, puede haber más de dos tipos de capas:

25 
$$f_{total} = \sqrt{\sum_i p_i f_i^2}$$

Además, el resultado se puede formular para perfiles continuos:

$$f_{total} = \sqrt{\frac{1}{d} \int_{z=0}^{z=d} f^2(z) dz}$$

donde  $f(z)$  es la frecuencia del "resonador virtual" infinitesimalmente delgado de grosor  $dz$  y  $d$  es el grosor total del resonador.

5 Los ejemplos 1-6 anteriores se han calculado analíticamente utilizando la fórmula de promedio de media cuadrática descrita anteriormente. La validez del método se puede verificar comparando el ejemplo 2 con el ejemplo 7 (modo Lamé de resonador de placa), y comparando el ejemplo 3 con el ejemplo 8 (modo de extensión en longitud de resonador de viga), donde se encuentra que la concordancia con la simulación por elementos finitos es muy buena.

10 Si el modo de resonancia es de manera que su frecuencia no dependa del grosor y/o si el material eficaz no se basa en una pila de superrejilla vertical (la superrejilla puede ser lateral, o, en general las regiones con diferentes concentraciones dopantes pueden formar una disposición geométrica sin restricciones en dos o tres dimensiones), la fórmula de media cuadrática tratada antes ya no es válida. En dichos casos, diferentes regiones dentro del cuerpo de resonador contribuyen con diferentes pesos a la rigidez generalizada del resonador. Un ejemplo de este tipo de caso es la resonancia de flexión (doblez) fuera del plano de un resonador de viga: elementos de volumen cerca de la superficie superior/inferior de la viga tiene un mayor efecto en la rigidez generalizada del resonador que elementos de volumen central.

15 En estos casos, todavía es aplicable el planteamiento general de cancelar coeficientes de temperatura positivos/negativos (de primer orden y superior) con concentraciones de dopante seleccionados adecuadamente y volúmenes relativos, y, posiblemente, disposición seleccionada adecuadamente de las regiones. Esas configuraciones óptimas se pueden encontrar, p. ej., por simulaciones por elementos finitos. Los ejemplos 7-11 muestran dichas configuraciones simuladas de FEM para ciertos modos de resonancia.

20 Modelo teórico para la TCF lineal de un resonador

La frecuencia de un resonador se puede dar en una forma generalizada por

$$f = \frac{1}{L} \times \sqrt{\frac{c}{\rho}},$$

25 donde  $c$  es la rigidez generalizada del material (que tiene en cuenta el modo de resonancia, geometría de resonador y su orientación con respecto al cristal),  $\rho$  es la densidad de material y  $L$  es la dimensión generalizada del resonador.

La rigidez generalizada es una función de parámetros elásticos (constantes de rigidez)  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  del material. Su forma funcional varía según el modo de resonancia, geometría de resonador y su orientación con respecto al cristal,  $c$  can se puede interpretar como la constante de resorte eficaz de un modo de resonancia específico. Expresiones analíticas exactas únicamente existen para muy pocos modos, tales como para el

- 30
- Modo Lamé para una placa rectangular con lados alineados con las 100 direcciones:  $c$  se da por  $c_{11}$ - $c_{12}$
  - Modo Lamé para una placa rectangular con lados alineados con las 110 direcciones:  $c$  se da por  $c_{44}$ .

Cuando cambia la temperatura la frecuencia de resonancia cambia debido al cambio de parámetros de material y en las dimensiones del resonador. El coeficiente de temperatura de la frecuencia de resonancia

$$TC_f = \frac{1}{f} \frac{df}{dT}$$

35

depende de parámetros de material de la siguiente manera:

$$TC_f = TC_v - \alpha,$$

40 donde  $\alpha$  es el coeficiente lineal de la expansión térmica teniendo en cuenta la elongación del resonador y  $TC$  de la velocidad acústica es

$$TC_v = \frac{1}{v} \frac{dv}{dT} = \frac{1}{2} (TC_c - TC_\rho) = \frac{1}{2} (TC_c + 3\alpha),$$

que lleva a

$$TC_f = \frac{1}{2}(TC_c + \alpha)$$

- 5 Usualmente el efecto claramente dominante es el primer término, es decir, coeficiente térmico de la rigidez  $TC_c$ , mientras que el efecto de expansiones térmicas es mucho menor. Si se puede modificar de manera suficientemente fuerte  $TC_c$  del material resonante, se pueden realizar resonadores estables a temperatura.

Dependencias de temperatura de constante elástica como función de la temperatura

- 10 Los autores han modelado teóricamente la contribución libre de electrones para las constantes elásticas ( $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$ ) del silicio utilizando el planteamiento de muchos valles de Keyes (R.W. Keyes, Solid State Physics, Vol. 20, 1967). El modelo contiene un solo parámetro de ajuste, el potencial de deformación uniaxial  $\bar{\Sigma}_u$ . Este parámetro se ajusta a los datos publicados por Hall ("Electronic Effect in the Elastic Constants of n-Type Silicon", Physical Review, vol. 161 (2), págs. 756-761, 1967) utilizando los puntos de datos en el intervalo de temperaturas  $T = 100...308$  K. El ajuste dio  $\bar{\Sigma}_u = 9,6$  eV. Para la densidad de estados de masa se utilizó el valor estándar  $m_{de} = 0,32 * m_e$  (siendo  $m_e$  la masa en reposo de electrones).

En el documento FI 20115151 se utilizó teoría para explicar la minimización del TCF lineal de un resonador: para una geometría de resonador adecuada y un cierto modo de resonancia, el TCF lineal podría ser cero con un nivel óptimo de concentración de dopante-n.

- 20 Ahora, se utiliza la teoría para explicar la minimización de la deriva de temperatura en un intervalo más amplio debido a la compensación de efectos de sensibilidad a temperatura de orden superior.

Las figuras 15a-c muestran el comportamiento de las constantes elásticas de silicio ( $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$ ) como una función de la concentración y temperatura de dopante. Se han calculado valores de constante elástica para intervalo de temperaturas absolutas  $T=250...350$  K, y para concentraciones de dopante  $n = 1e18...1e20$   $1/cm^3$ .

- 25 De manera importante para compensación de temperatura, hay ciertos modos de resonancia, cuya frecuencia es fuertemente dependiente del término de diferencia  $c_{11}-c_{12}$  (dichos modos se tratan más en el documento FI 20115151; ejemplos de estos modos son el modo de Lamé de una placa en forma de cuadrado y modos de extensión/torsión de una viga). La diferencia  $c_{11}-c_{12}$  se traza en la figura 16a.

- 30 Se deduce que dependiendo de la concentración de dopante,  $c_{11}-c_{12}$  puede ser una función creciente o decreciente de la temperatura. Ejemplos de dichos casos se ilustran con las líneas marcadas con círculos/cruces en la figura 16a y en la figura 16b: con  $n=5e18/cm^3$   $c_{11}-c_{12}$  es una función decreciente y con  $n=7e19/cm^3$   $c_{11}-c_{12}$  es creciente con la temperatura. A concentraciones intermedias los contornos en la figura 16a son casi paralelos al eje x, lo que significa que la variación de  $c_{11}-c_{12}$  es relativamente pequeña como función de la temperatura - esto se ilustra con la línea marcada con rombos en las figuras 16a y 16b correspondientes a  $n=1,2e19/cm^3$ . En términos de TCF lineal a dicho valor de concentración el TCF es cero (TCF se define como la pendiente de la curva a  $T = 25$  C, es decir, a  $T = 298$  K).

- 35 Sin embargo, incluso en este punto óptimo se deja un comportamiento no lineal considerable, que lleva a un cambio de  $c_{11}-c_{12}$  como función de la temperatura. Esto se observa bien en la figura 16c, que es una versión ampliada de la figura 16b. Como resultado, parece que con concentración de dopante constante la deriva de frecuencia del modo de resonancia, que es fuertemente dependiente del término  $c_{11}-c_{12}$ , sería más de 100 ppm en un intervalo de temperaturas de 100 °C incluso cuando la concentración de dopante es óptima.

La teoría confirma la funcionalidad de la invención. Dos (o más) regiones de regiones dopadas de manera diferente de silicio pueden actuar juntas de tal manera que el comportamiento con la temperatura del material eficaz/compuesto resultante es la suma ponderada de sus constituyentes.

- 45 La figura 16d muestra el comportamiento de  $c_{11}-c_{12}$  vs. temperatura de un ejemplo de un material eficaz, que consiste en una contribución del 63,9 % de material con dopaje  $n = 7,87e19/cm^3$  y contribución del 36,1 % del material con dopaje  $n = 1e18/cm^3$ . Se ha asumido que elementos de matriz elástica  $c_{11}$  y  $c_{12}$  para el material eficaz se dan como promedios ponderados de los elementos de matriz elástica correspondiente de los constituyentes, como se ha tratado con más detalle en la sección "Efecto de promedio".

**REIVINDICACIONES**

1. Un dispositivo micromecánico que comprende
- un elemento semiconductor que puede desviarse o resonar y que comprende al menos dos regiones que tienen diferentes propiedades de material, y
- 5
- medios de impulso o detección acoplados funcionalmente a dicho elemento semiconductor,
  - al menos una de dichas regiones comprende uno o más agentes de dopaje tipo-n,
  - en volúmenes relativos, concentraciones de dopaje, agentes de dopaje y/u orientaciones de cristal de las regiones se configuran de modo que
- 10
- o las sensibilidades a temperatura de la rigidez generalizada son de signo opuesto al menos a una temperatura para las regiones, y
  - o la deriva de temperatura total de la rigidez generalizada del elemento semiconductor es 50 ppm o menos en un intervalo de temperaturas de 100 °C,
- caracterizado por que la al menos una primera región y al menos una segunda región son regiones distintas que comprenden diferentes concentraciones de dopaje del uno o más agentes de dopaje tipo-n.
- 15
2. El dispositivo según la reivindicación 1, caracterizado por que
- la al menos una primera región y al menos una segunda región comprenden diferentes agentes de dopaje tipo-n, y
- la al menos una primera región y al menos una segunda región comprenden diferentes orientaciones de cristal.
3. El dispositivo según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que
- dichas regiones se apilan una encima de otra en una dirección de grosor del elemento semiconductor, y
- 20
- dichas regiones se disponen lateralmente una respecto a otra en el elemento semiconductor.
4. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que
- dichas regiones se disponen en el elemento semiconductor en una configuración repetida periódicamente en al menos una dimensión para formar una estructura de superrejilla, y
- dichas regiones se disponen en el elemento semiconductor como una distribución bidimensional lateral.
- 25
5. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que todas dichas regiones se dopan con el mismo agente dopante tipo-n con concentraciones diferentes.
6. El dispositivo según la reivindicación 5, caracterizado por que la concentración de dopaje en una región es  $5e19 \text{ cm}^{-3}$  o menos y más de  $5e19 \text{ cm}^{-3}$  en otra región.
- 30
7. El dispositivo según la reivindicación 5, caracterizado por que la concentración de dopaje en una región es  $2e19 \text{ cm}^{-3}$  o menos y más de  $2e19 \text{ cm}^{-3}$  en otra región.
8. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que el tipo de regiones que tienen una concentración de dopaje-n más grande que el otro tipo de dichas regiones forma al menos un 35 % del volumen total del elemento semiconductor.
- 35
9. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que la concentración de dopaje en cada una de las regiones es esencialmente homogénea.
10. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que el elemento semiconductor es un elemento resonante anclado a una estructura de soporte y el dispositivo comprende medios de impulso eléctrico para sacar un modo de resonancia para el elemento resonante.
- 40
11. El dispositivo según la reivindicación 10, caracterizado por que el elemento resonante es una placa y está adaptado para ser excitado con dichos medios de impulso eléctrico a un modo seleccionado del grupo de
- un modo de cizalladura, tal como un modo Lamé,
  - modo de extensión cuadrada (SE),

- modo de extensión en anchura (WE),
- modo de flexión.

12. El dispositivo según la reivindicación 10, caracterizado por que el elemento resonante es una viga y está adaptado para ser excitado con dichos medios de impulso eléctrico a un modo seleccionado del grupo de

- 5
- modo de extensión,
  - modo de flexión,
  - modo de torsión.

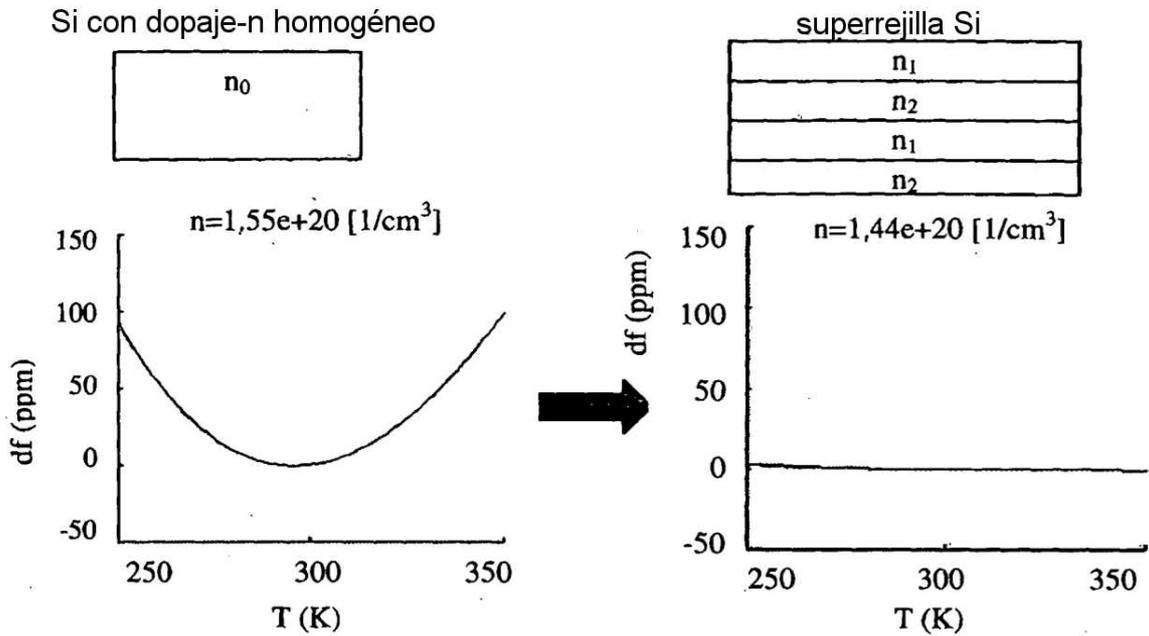
13. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que comprende

- 10
- un tipo de región con una concentración de dopaje de  $5 \times 10^{19}$  -  $2 \times 10^{20}$   $\text{cm}^{-3}$ , este tipo de región asciende al 35 - 75 % del volumen total del elemento resonante,
  - otro tipo de región que no está dopada o que tiene una concentración de dopaje de menos de  $2 \times 10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$ , este tipo de región asciende al 25 - 65 % del volumen total del elemento resonante.

14. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que los medios de impulso o detección comprenden medios de impulso y/o detección piezoeléctricos dispuestos en contacto mecánico con el elemento semiconductor.

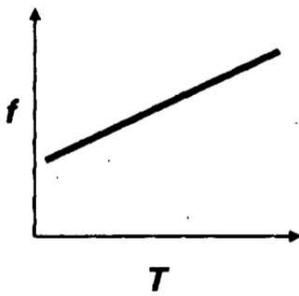
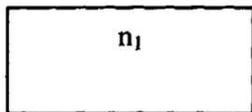
- 15
15. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que
- dicha primera región tiene una sensibilidad a temperatura negativa de la rigidez generalizada a una segunda temperatura diferente de la primera temperatura,
  - dicha segunda región tiene una sensibilidad a temperatura positiva de la rigidez generalizada a la segunda temperatura.
- 20

16. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que dicha región de temperatura se centra alrededor de 25 °C.



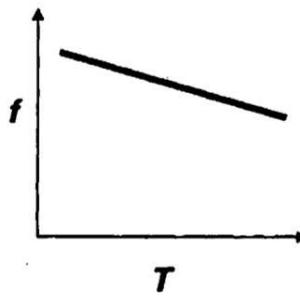
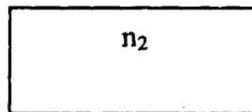
**Fig. 1**

Si con dopaje-n homogéneo concentración  $n_1$



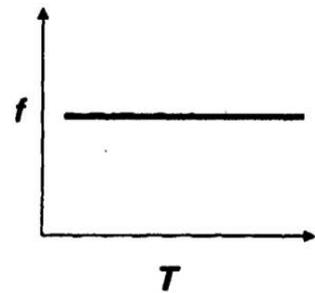
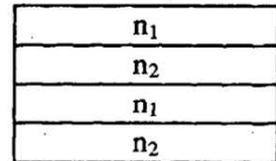
**Fig. 2a**

Si con dopaje-n homogéneo concentración  $n_2$

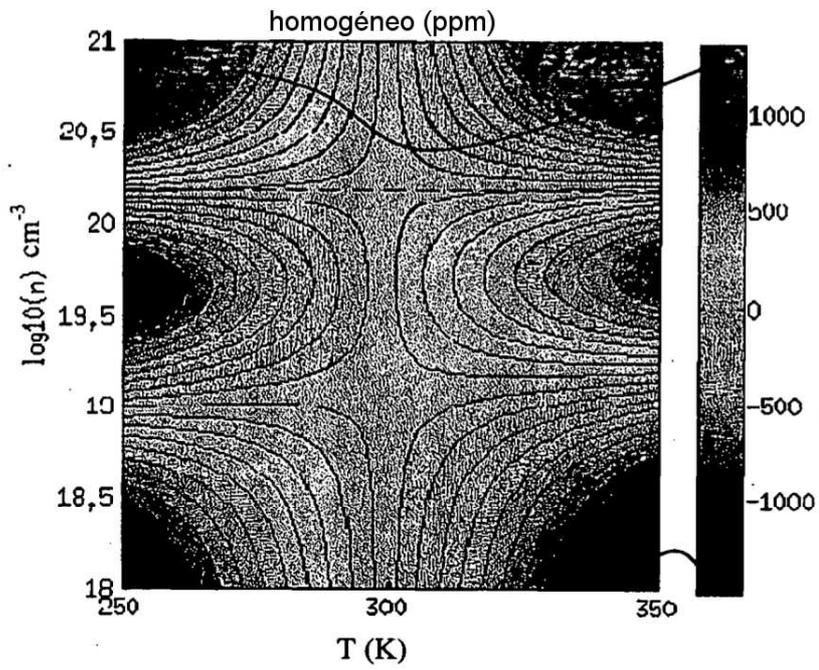


**Fig. 2b**

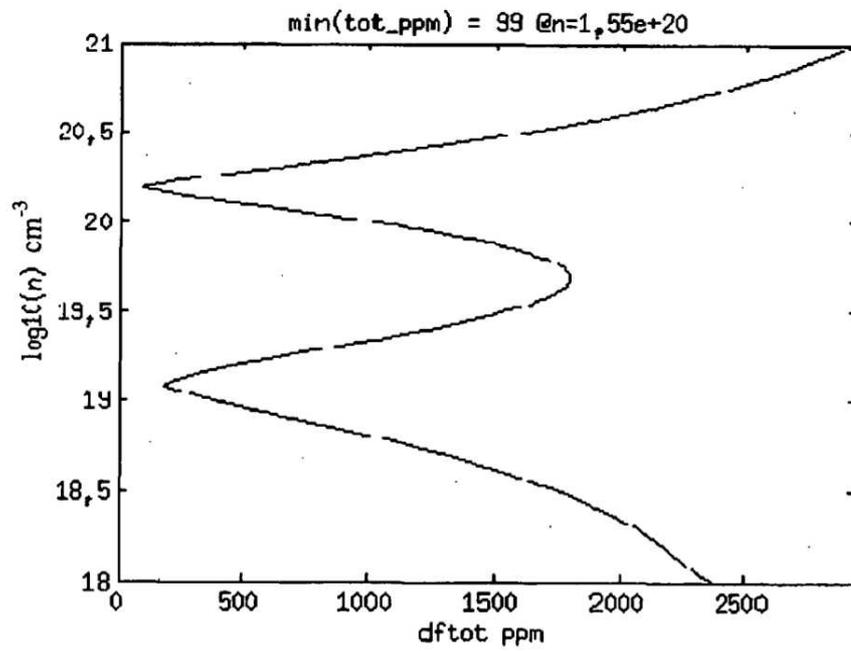
superrejilla Si  $n_1 / n_2$



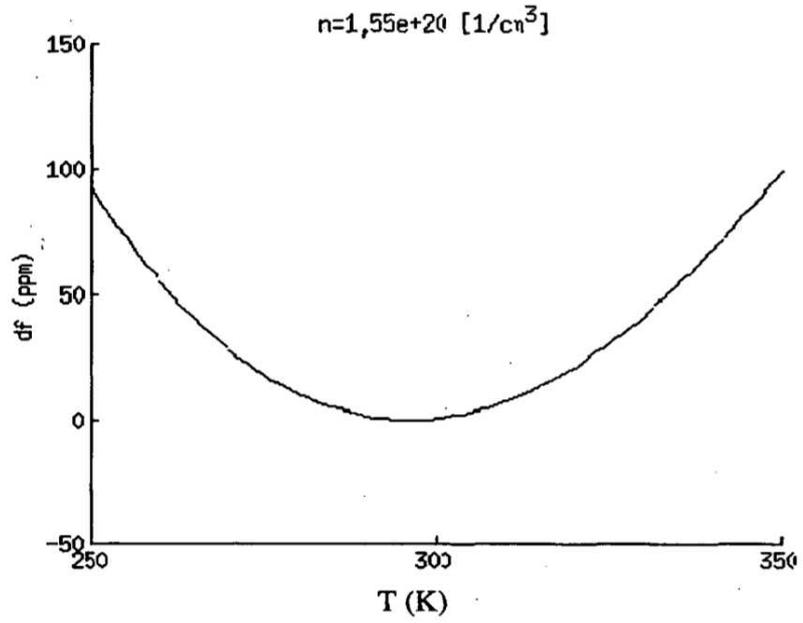
**Fig. 2c**



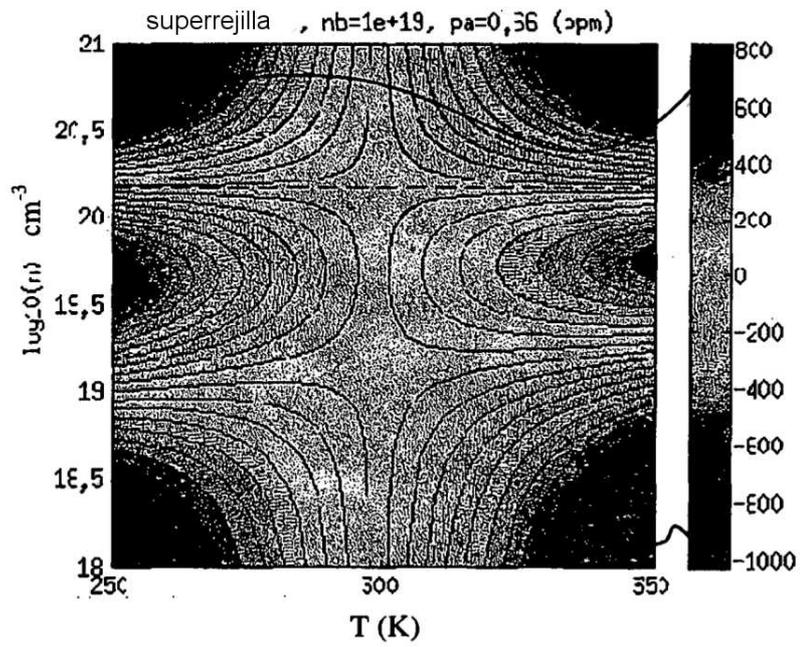
**Fig. 3a**



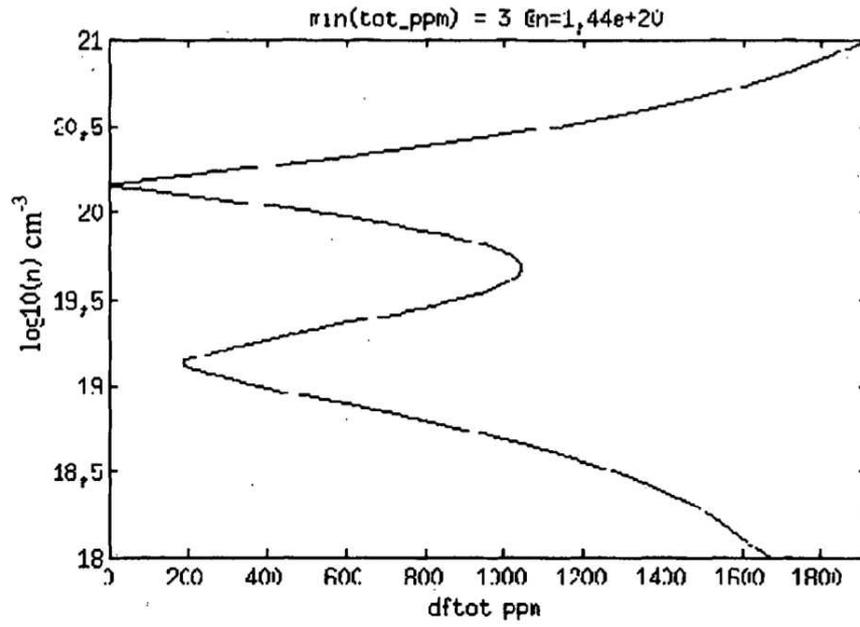
**Fig. 3b**



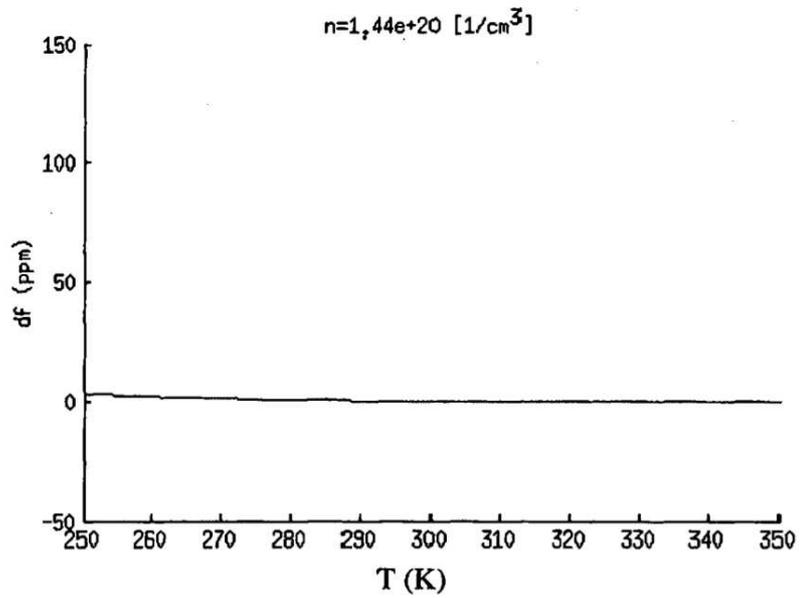
**Fig. 3c**



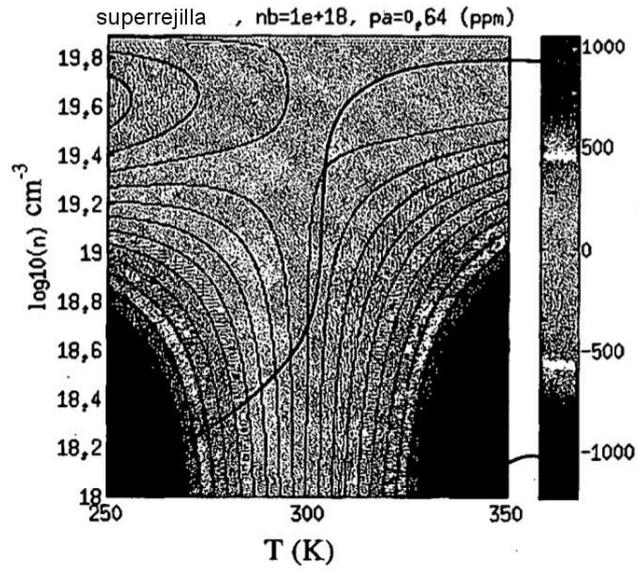
**Fig. 4a**



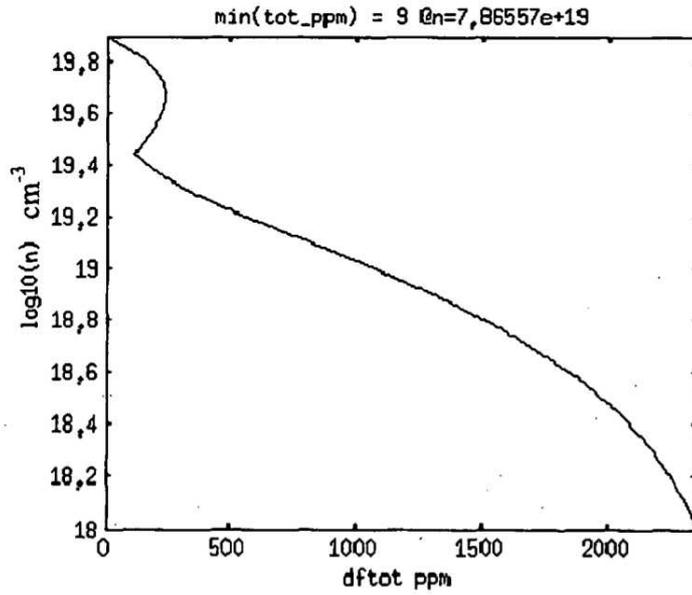
**Fig. 4b**



**Fig. 4c**



**Fig. 5a**



**Fig. 5b**

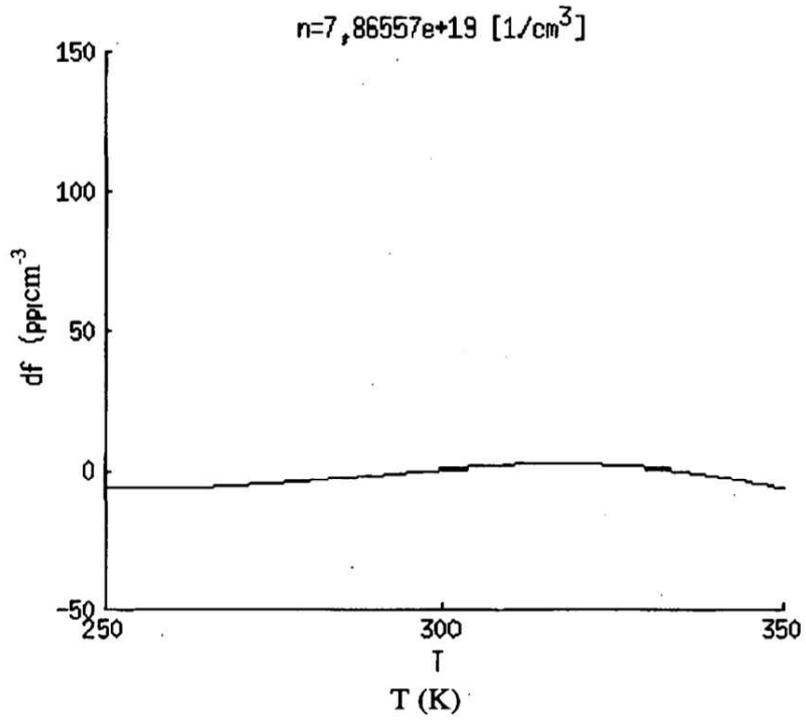


Fig. 5c

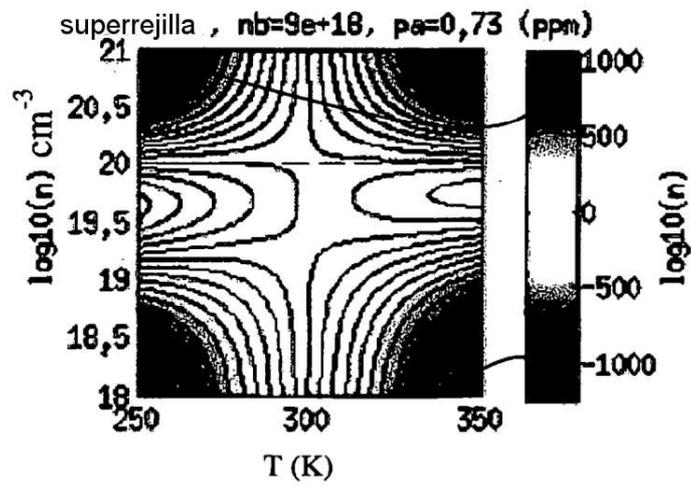


Fig. 6a

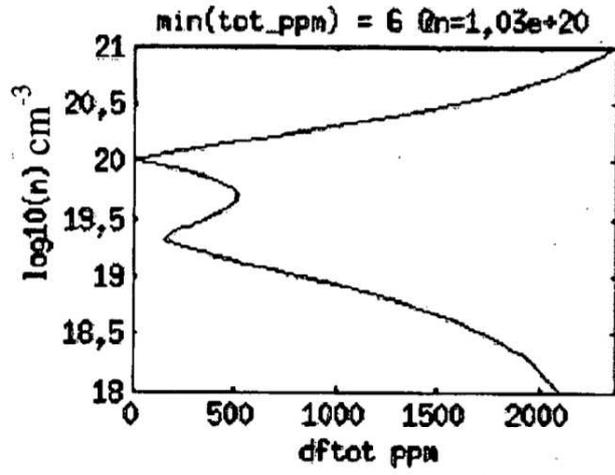


Fig. 6b

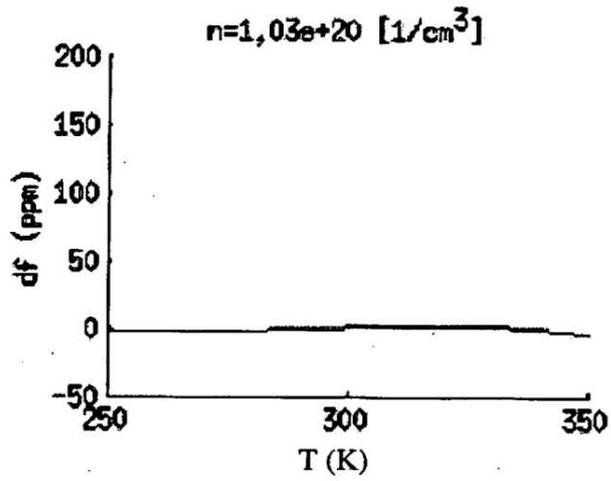


Fig. 6c

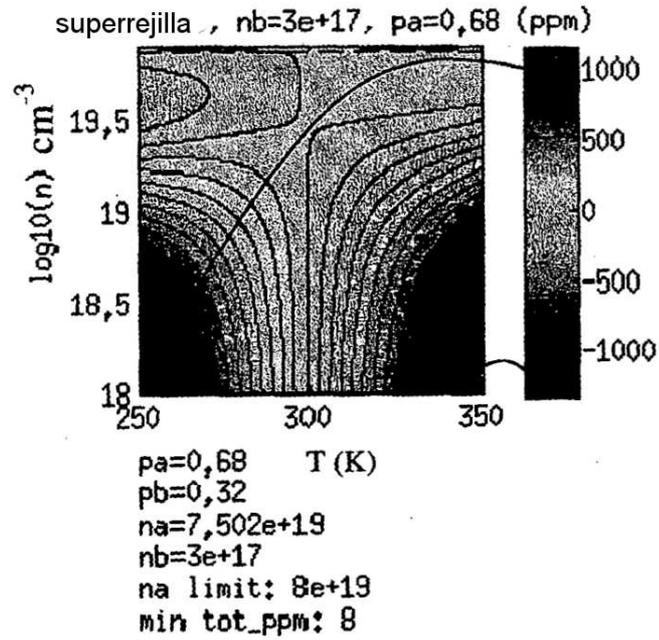


Fig. 7a

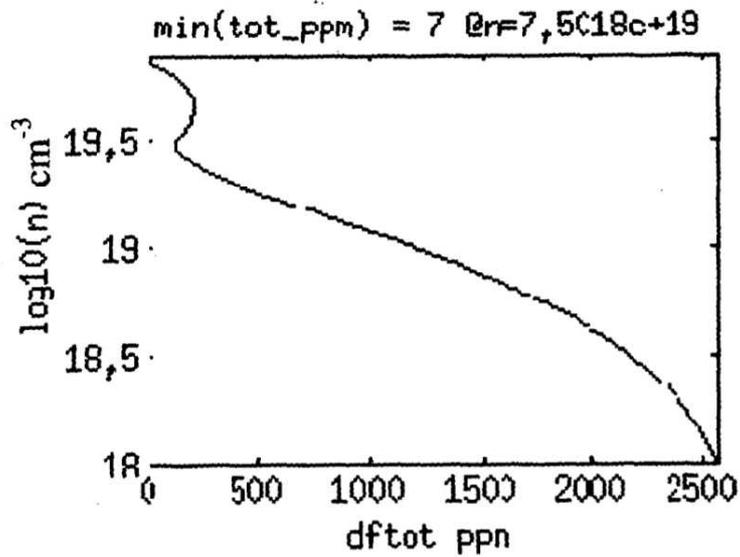


Fig. 7b

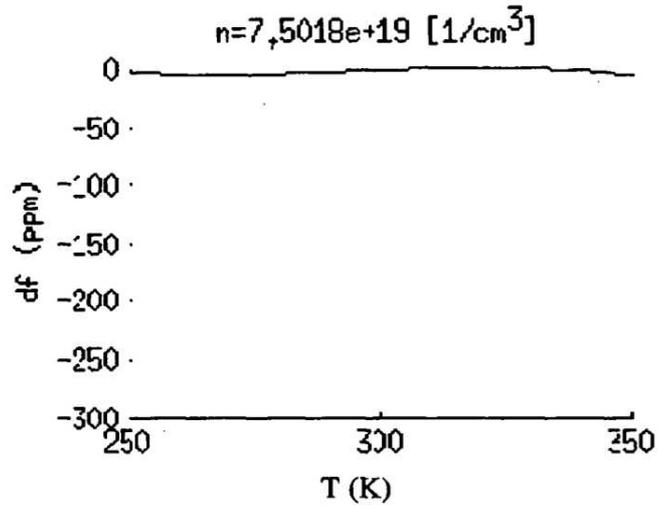


Fig. 7c

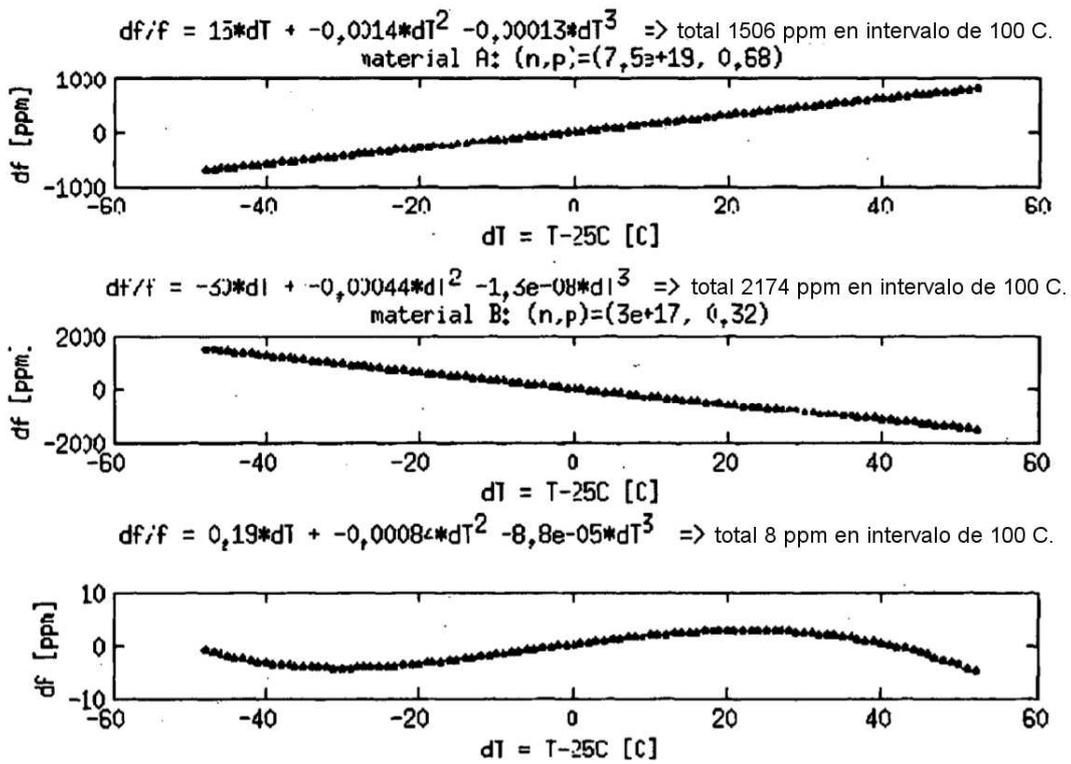


Fig. 7d

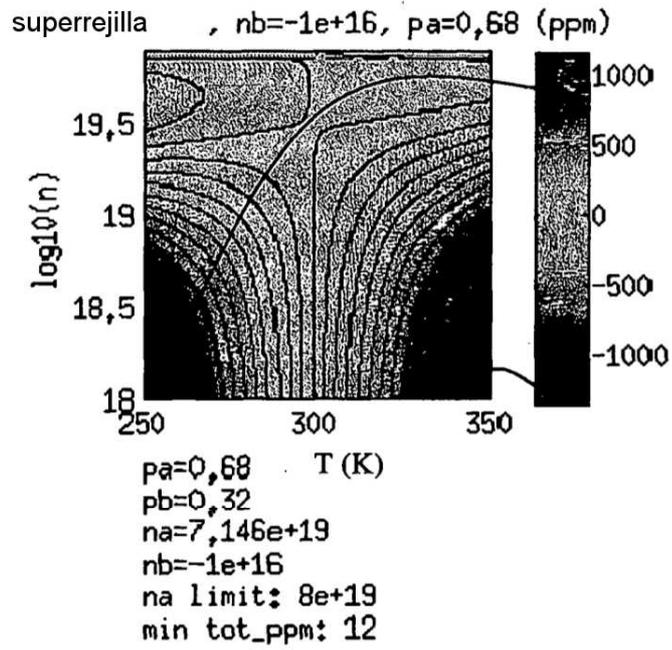


Fig. 8a

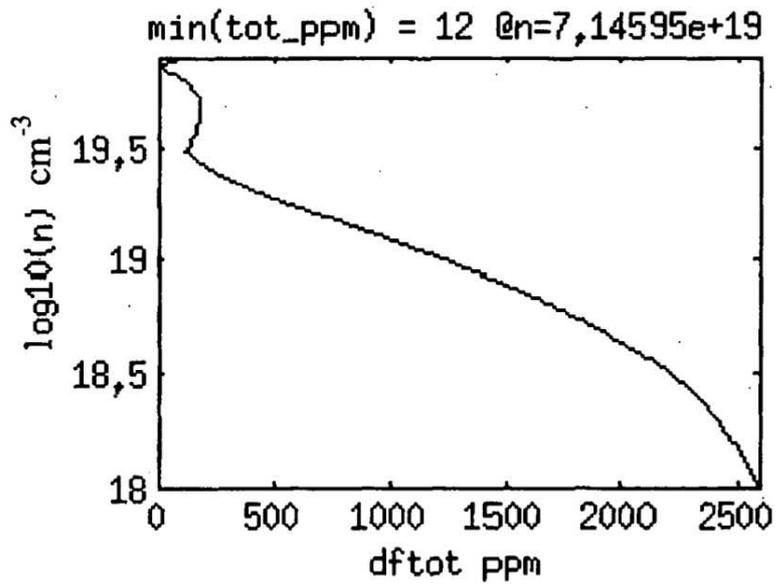


Fig. 8b

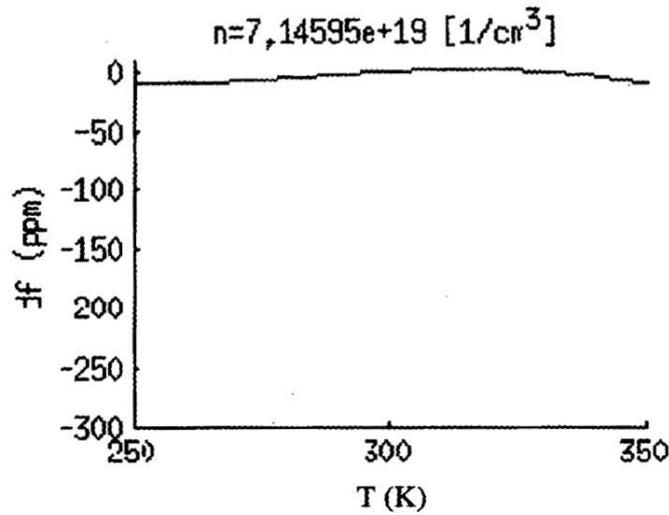


Fig. 8c

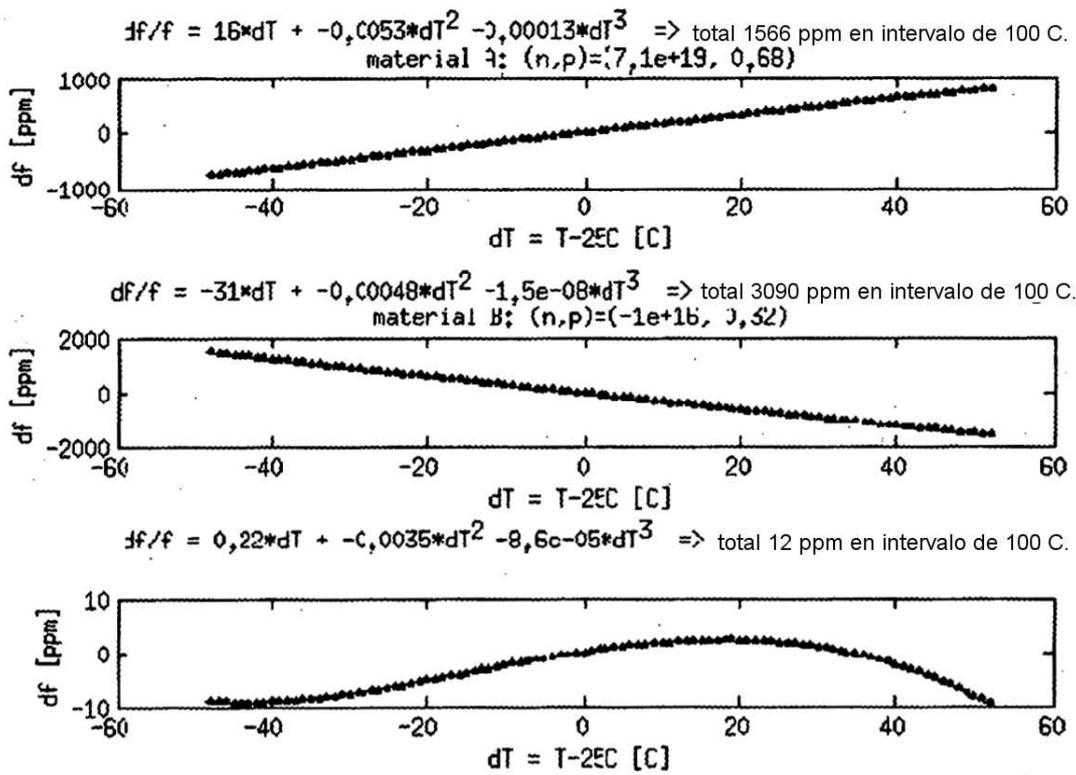


Fig. 8d

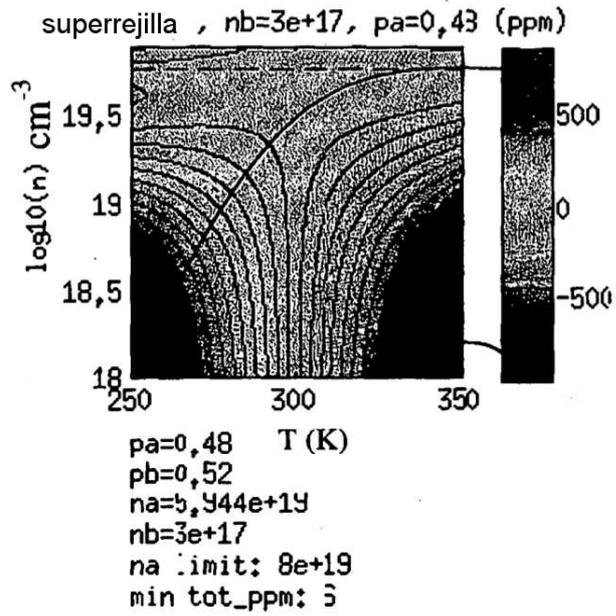


Fig. 9a

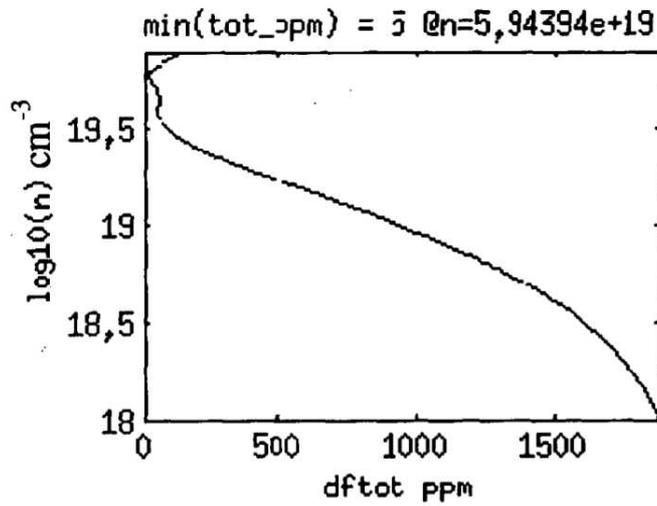


Fig. 9b

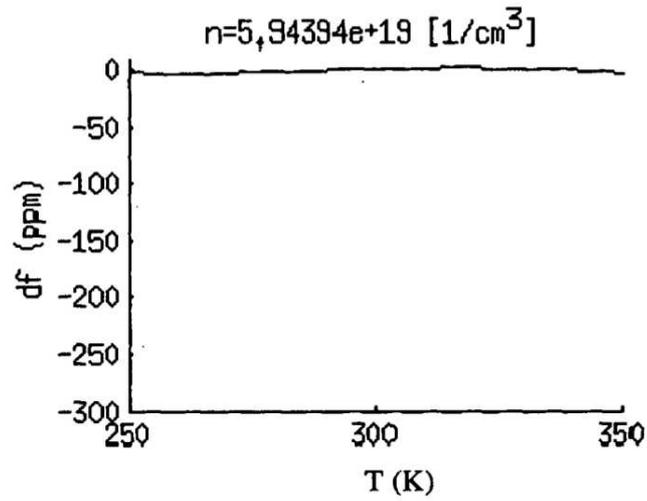


Fig. 9c

$df/f=0,16*dT + -0,0022*dT^2 - 7,2e-05*dT^3 \Rightarrow$  total 110 ppm en intervalo de 100 C.

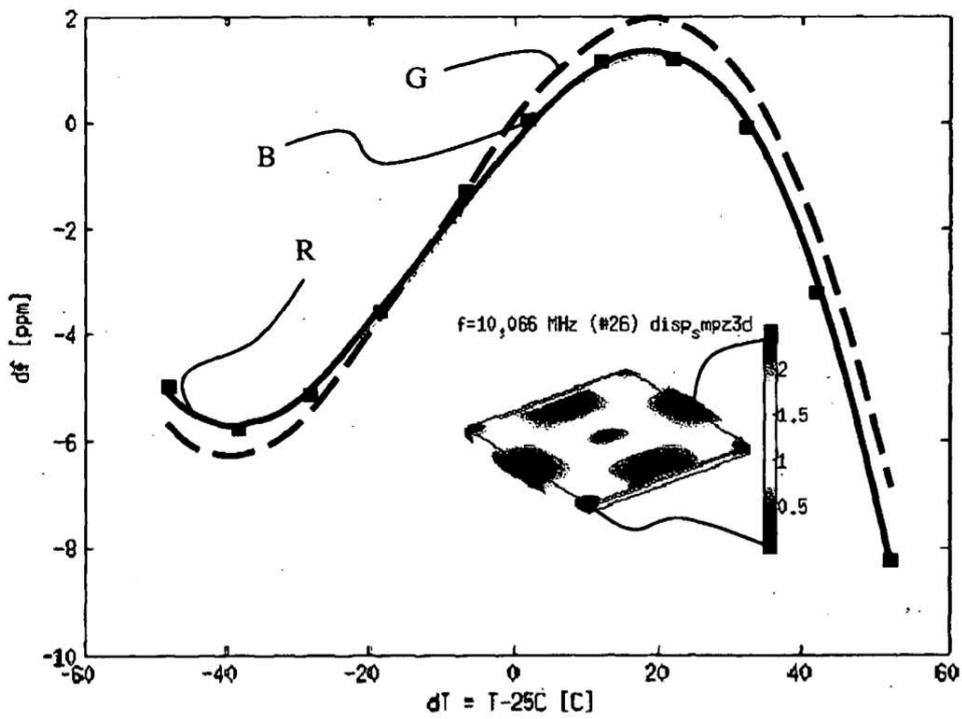


Fig. 10

$df/f=0,13*dT + -0,0011*dT^2 - 5e-05*dT^3 \Rightarrow$  total 5 ppm en intervalo de 100 C.

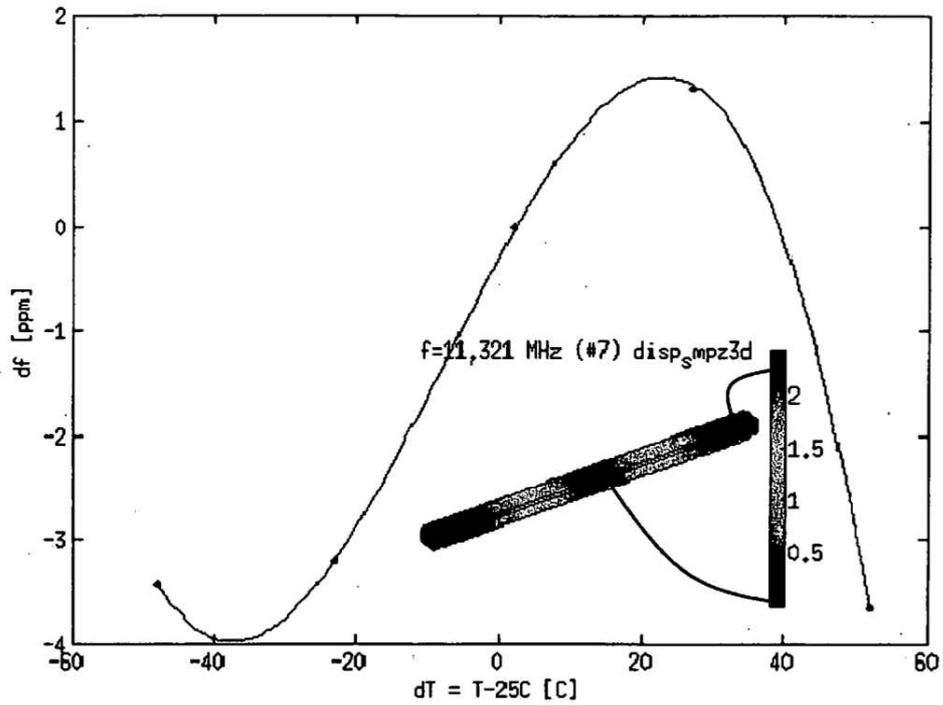


Fig. 11

$df/f= -0,11*dT + -0,0011*dT^2 - 4,9e-05*dT^3 \Rightarrow$  total 25 ppm en intervalo de 100 C.

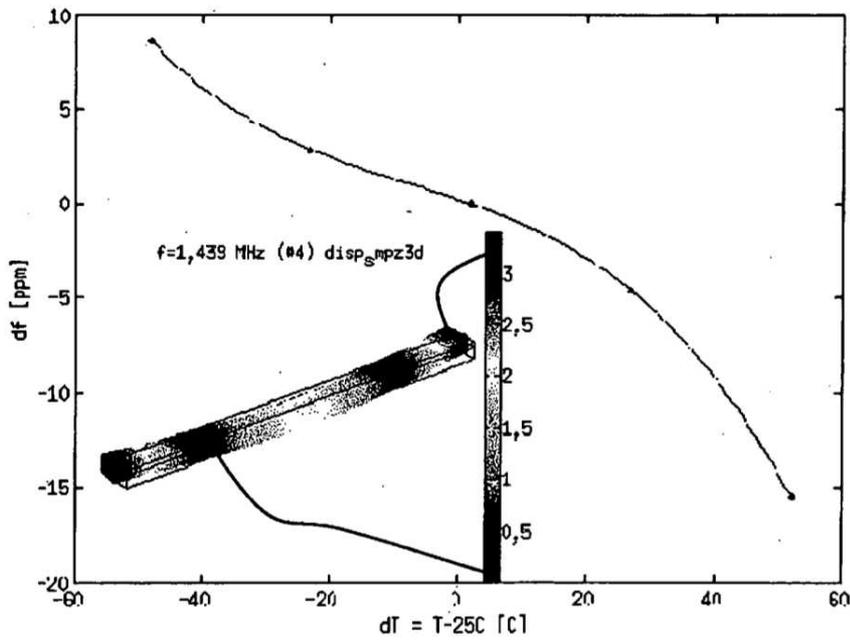


Fig. 12a

$$df/f = 0,12 \cdot dT + 0,00012 \cdot dT^2 - 5,3e-05 \cdot dT^3 \Rightarrow \text{total 5 ppm en intervalo de 100 C}$$

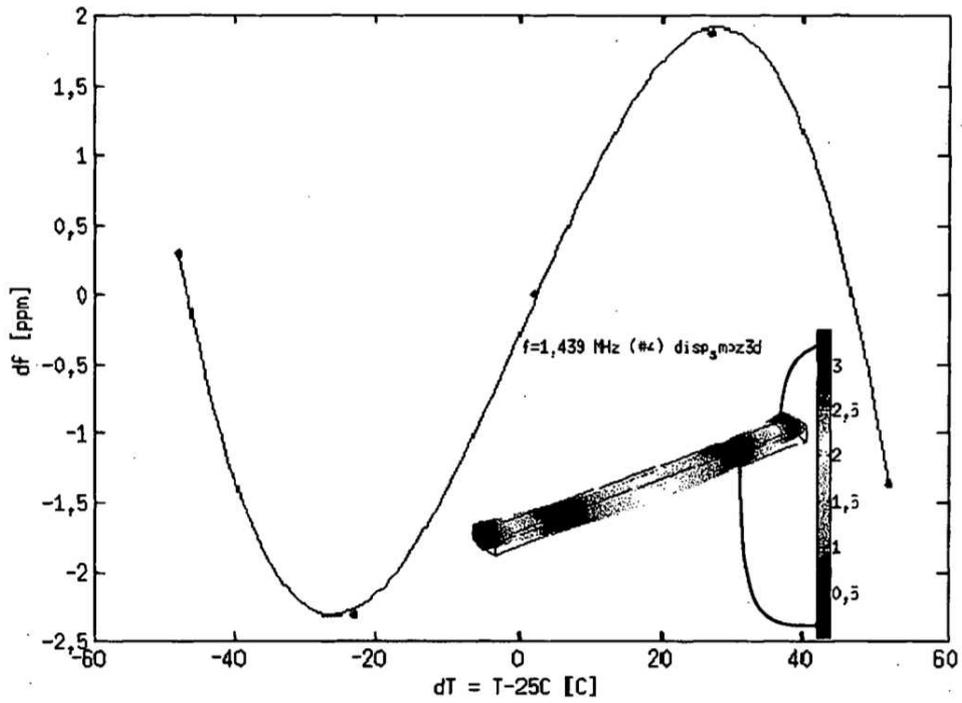


Fig. 12b

$$df/f = 2.1 \cdot dT + 0,012 \cdot dT^2 - 1,1e-05 \cdot dT^3 \Rightarrow \text{total 223 ppm en intervalo de 100 C.}$$

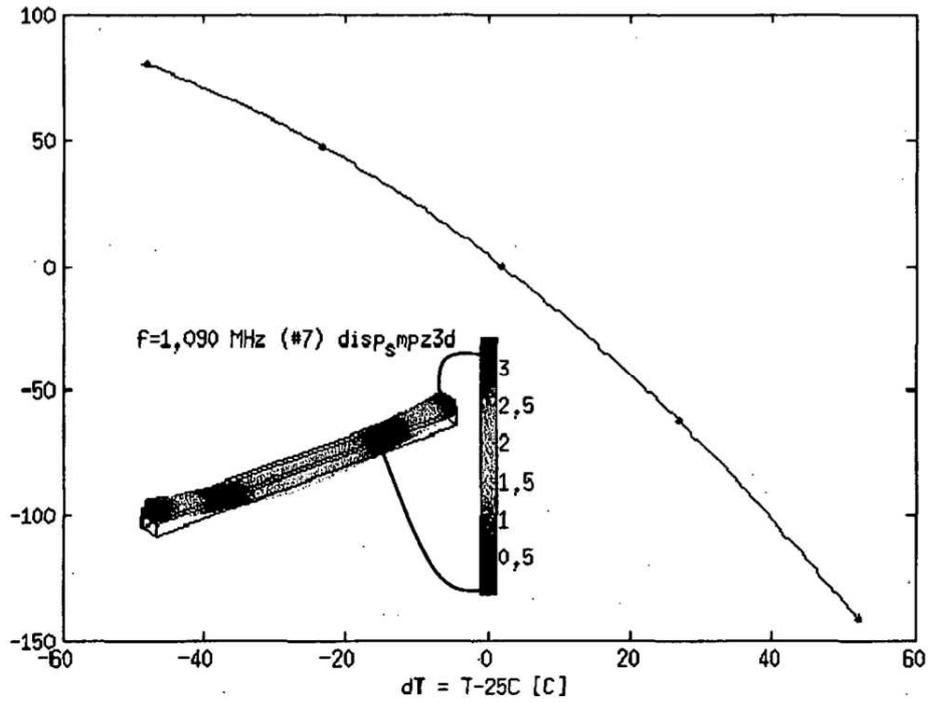


Fig. 13a

$df/f = 0,076*dT + -0,00055*dT^2 - 5,2e-05*dT^3 \Rightarrow$  total 6 ppm en intervalo de 100 C.

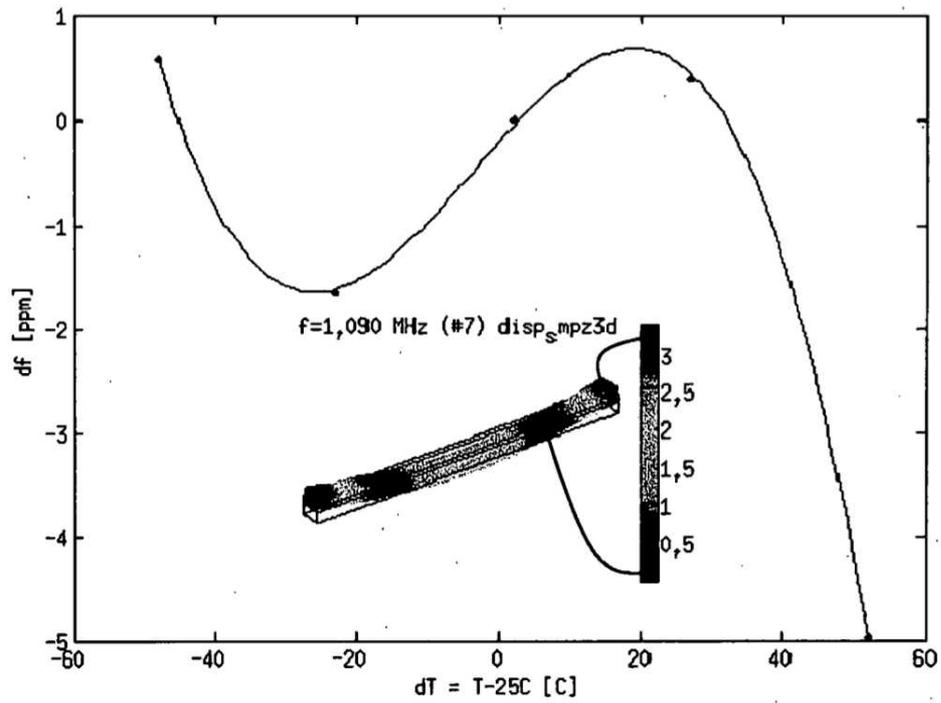


Fig. 13b

$$df/f = 0,12 \cdot dT + 0,00011 \cdot dT^2 - 5,2e-05 \cdot dT^3 \Rightarrow \text{total 5 ppm en un intervalo de 100 C.}$$

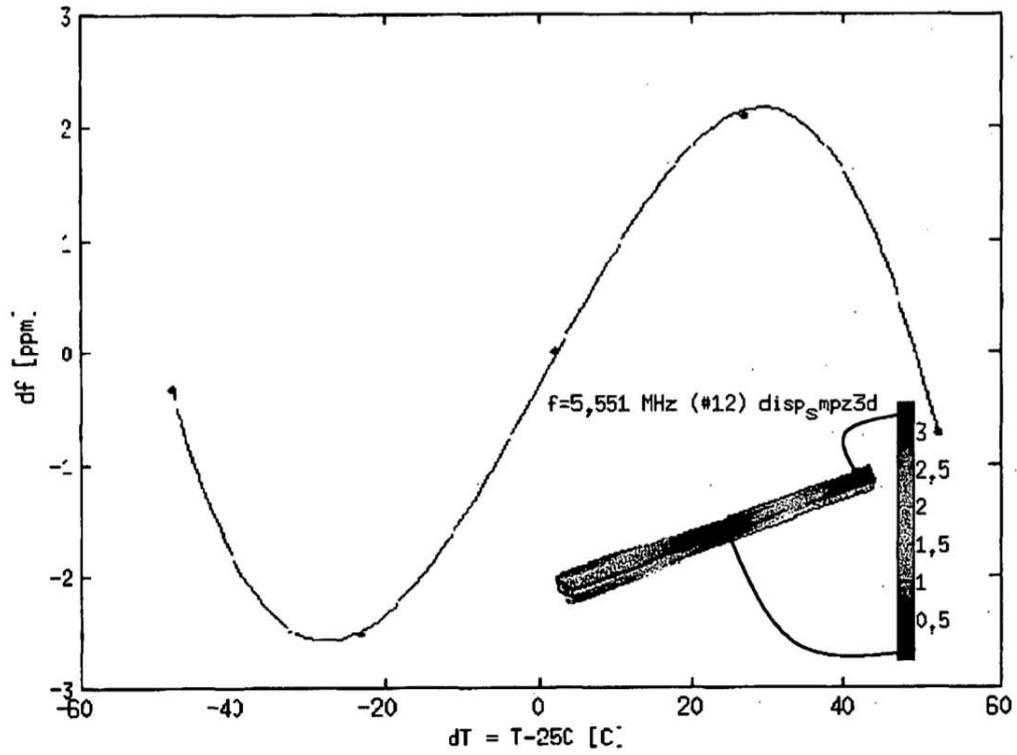


Fig. 14

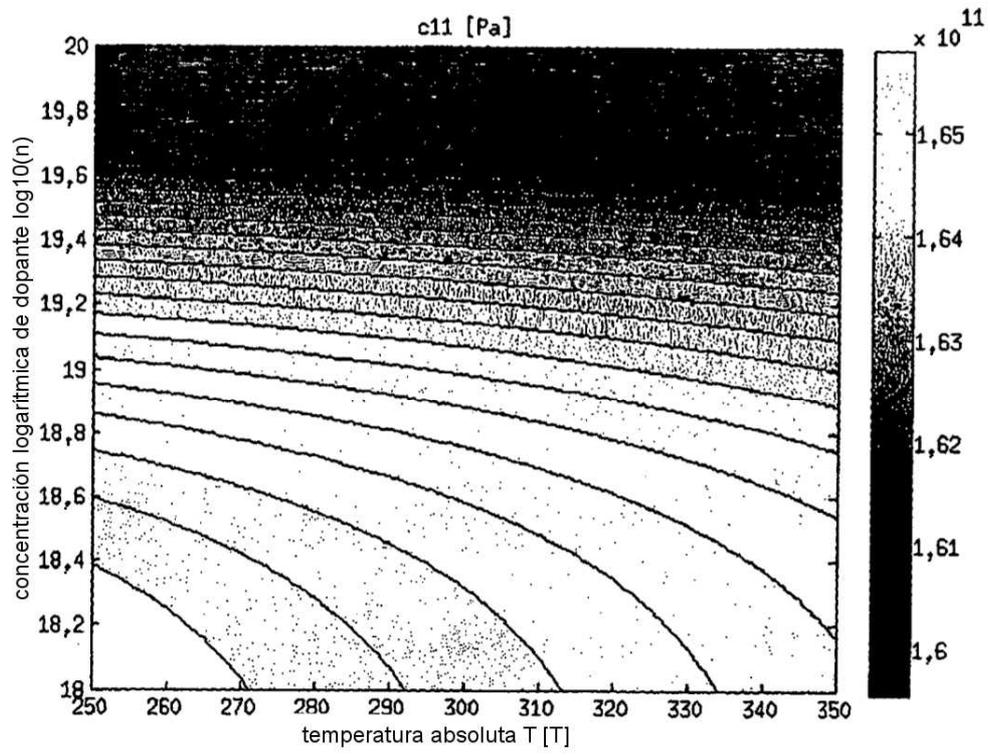


Fig. 15a

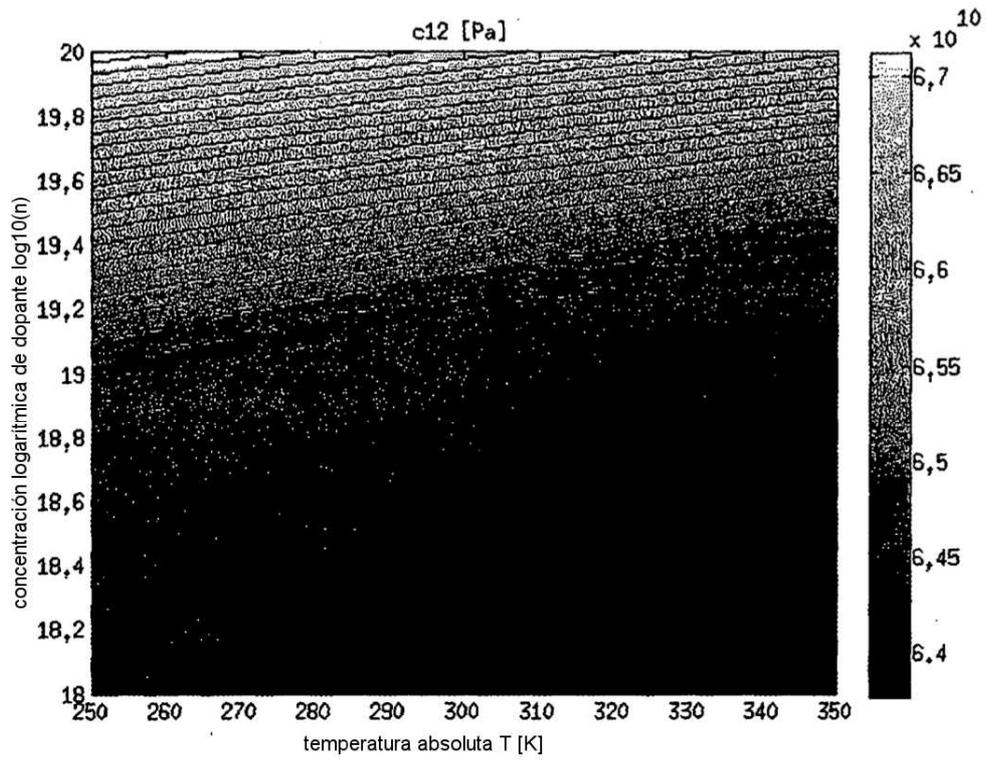


Fig. 15b

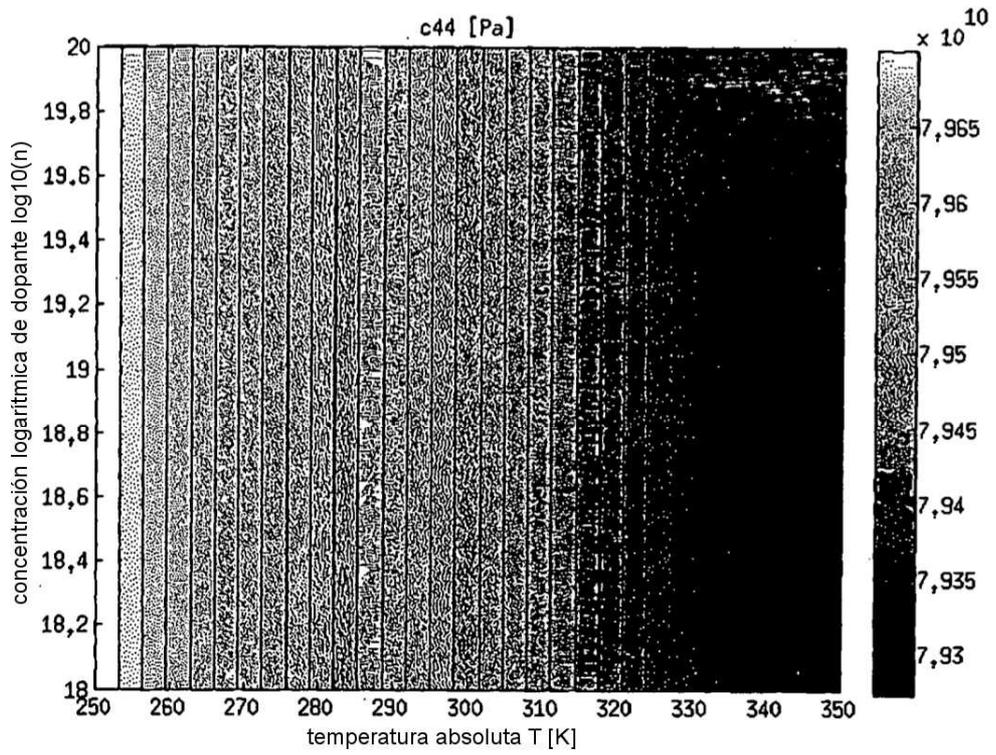


Fig. 15c

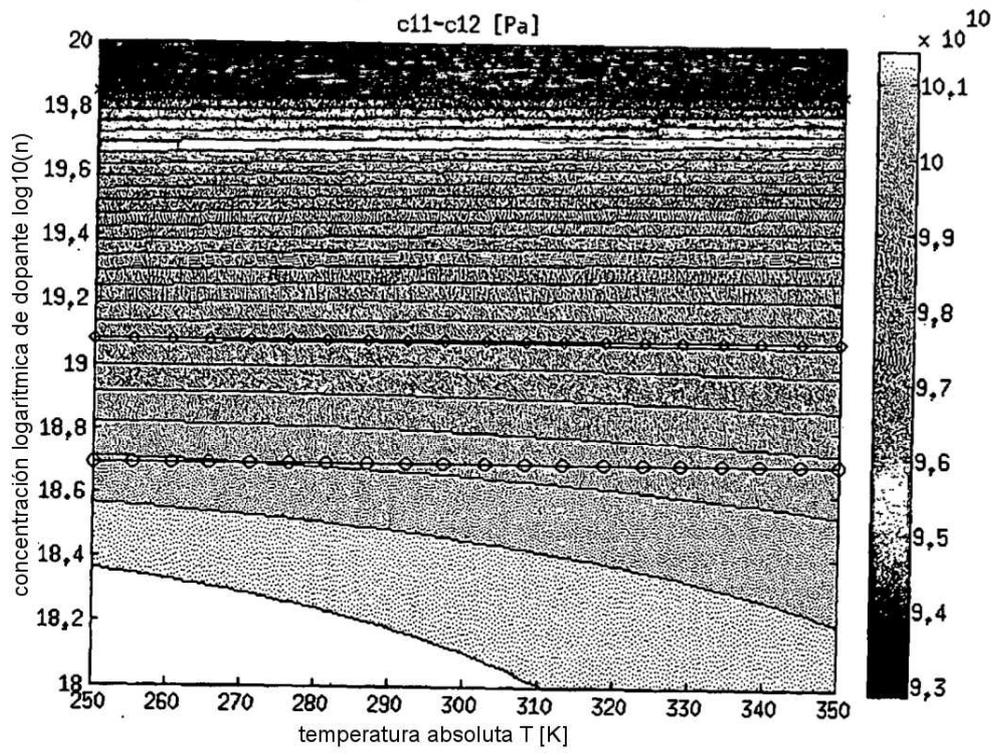


Fig. 16a

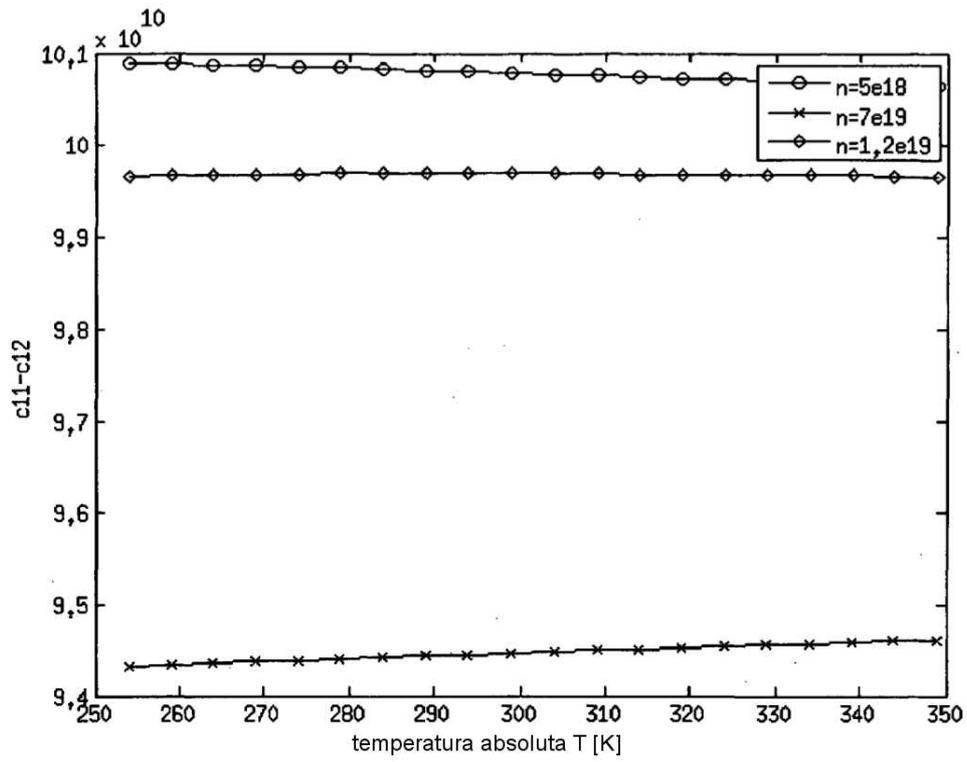


Fig. 16b

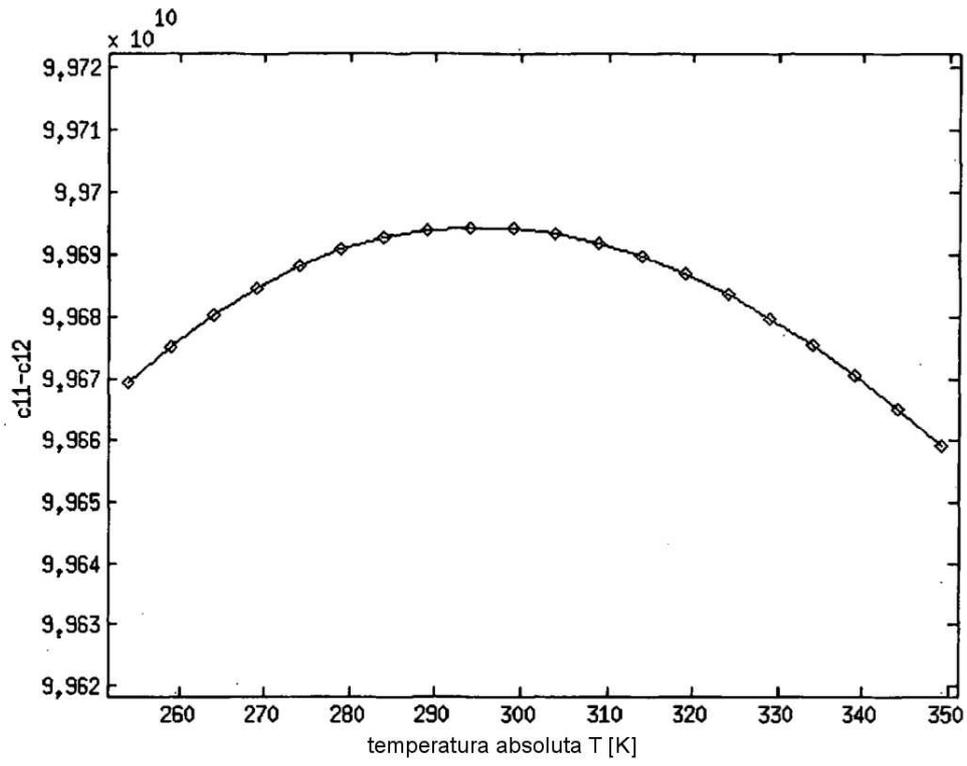


Fig. 16c

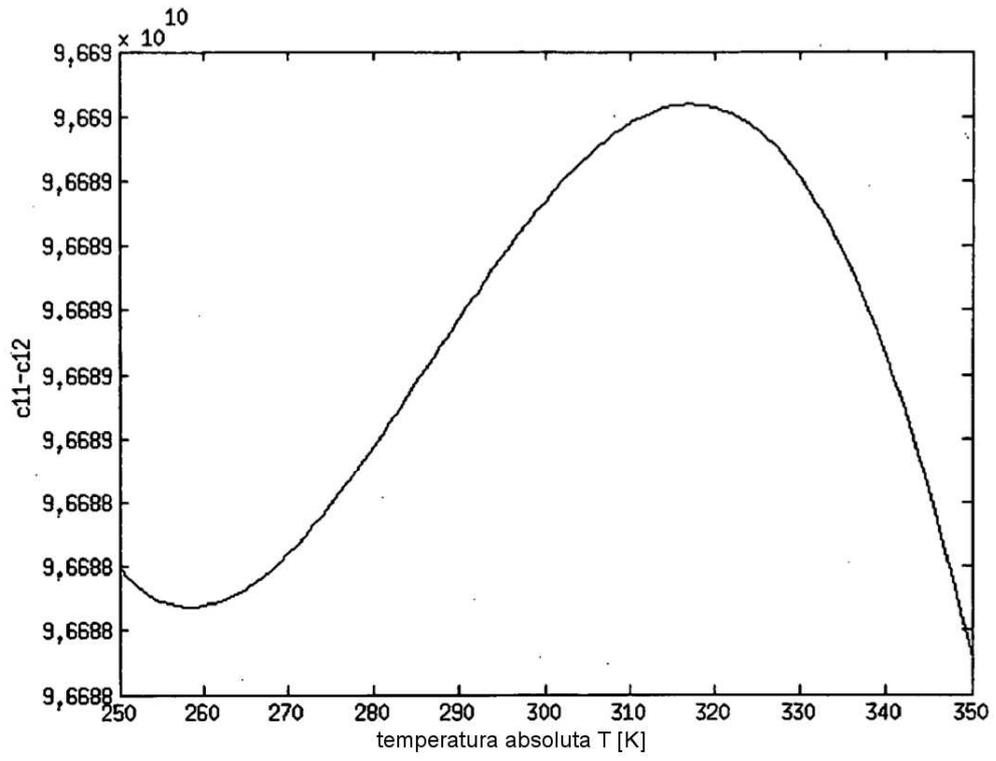


Fig. 16d

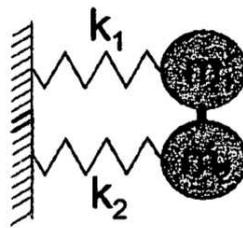


Fig. 17