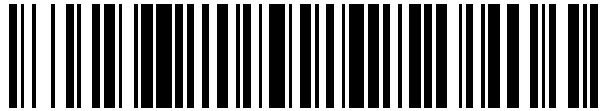


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 584 244**

51 Int. Cl.:

G01N 21/35 (2014.01)

G01C 3/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.07.2008 E 08796176 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.04.2016 EP 2167914**

54 Título: **Sistema para medir la posición o posiciones temporales de tránsito de pulsos en datos en el dominio del tiempo**

30 Prioridad:

12.07.2007 US 959196 P

17.07.2007 US 959883 P

24.07.2007 US 961771 P

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

26.09.2016

73 Titular/es:

PICOMETRIX, LLC (100.0%)

2925 BOARDWALK

ANN ARBOR, MI 48104, US

72 Inventor/es:

WHITE, JEFFREY S.;

FICTER, GREGORY D.;

ZIMDARS, DAVID A. y

WILLIAMSON, STEVEN L.

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 584 244 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

Sistema para medir la posición o posiciones temporales de tránsito de pulsos en datos en el dominio del tiempo

5 Antecedentes de la invención

La presente invención se refiere a métodos para medir los valores de tiempo de tránsito para pulsos en datos de forma de onda en el dominio del tiempo. Se presentarán ejemplos usando datos de terahercios en el dominio del tiempo para determinar propiedades de muestra. La radiación electromagnética de terahercios es potencialmente útil en muchas aplicaciones industriales de medición. En TD-THz, se generan de forma síncrona y se detectan unos pulsos de ciclo esencialmente singulares (una anchura de aproximadamente 1 ps, la figura 1) de radiación. Este método síncrono da como resultado una medición de alta fidelidad de la intensidad de campo eléctrico de la radiación a lo largo de un intervalo de tiempo de forma de onda. Esta anchura de este intervalo puede variar a lo largo de un amplio rango dependiendo de la instrumentación que se use. Debido a que los pulsos de radiación de THz son muy breves en el tiempo, estos contendrán una banda extremadamente amplia de frecuencias (de 10 GHz hasta 50 THz).

Una vez que un pulso de TD-THz ha interactuado con una muestra, un número de mediciones útiles se pueden extraer de unos datos adquiridos en el dominio del tiempo. Las mediciones posibles incluyen, pero no se limitan a, masa de muestra, espesor, densidad, índice de refracción, variaciones superficiales y de densidad, y espectroscopía (por ejemplo, contenido de humedad, identificación de polimorfos).

La figura 2 ilustra un transmisor de terahercios 10 y un receptor de terahercios 12. TD-THz, los cambios en los pulsos de THz después de que estos hayan interactuado con un material se registran en una forma de onda en el dominio del tiempo. Por ejemplo, a medida que el pulso se transmite a través de una muestra 14, la llegada del pulso en el receptor se atenuará y se retardará en comparación con la transmisión del mismo pulso a través de una trayectoria de aire (la figura 2). La cantidad del retardo de pulso se determina mediante el valor de índice de refracción de grupo del material y la cantidad de masa en el haz de muestra. La atenuación del pulso también depende del índice de refracción (pérdida por reflexión de Fresnel) del material, la dispersión de radiación con la muestra y la atenuación de las frecuencias del pulso por el material.

En el diagrama esquemático superior, un pulso de THz se desplaza a través del aire con un tiempo de vuelo mínimo y sin pérdida alguna en la amplitud. La adición de materiales sólidos esencialmente transparentes (por ejemplo, plástico, papel y paño), en la trayectoria de haz de THz (parte inferior izquierda) dará como resultado un tiempo de vuelo más largo para el pulso. El tiempo de vuelo aumentado será proporcional a la masa y el índice de refracción del material. En el diagrama esquemático inferior derecho, un medio de dispersión o absorbente (tal como espuma o paño cargado de agua) reducirá la amplitud de pulso además de generar un retardo de pulso de tiempo de vuelo.

Se pueden realizar muchas mediciones con las reflexiones de los pulsos de TD-THz a partir de la muestra (la figura 3). Esta figura ilustra un subconjunto de posibles interacciones y, por lo tanto, de propiedades de muestra que se pueden medir. La necesidad consistente para todas las mediciones es la determinación de la precisión del valor de tiempo de tránsito para el pulso o pulsos de TD-THz.

Una medición a modo de ejemplo sería la medición de espesor de muestra. Esta medición se podría realizar en las geometrías ópticas o bien de transmisión o bien de reflexión. Durante la transmisión, el retardo del pulso de THz por la muestra 14 se puede usar para medir el espesor (la figura 4). En la figura 4, La línea 16 no representa muestra alguna. La línea 18 representa una muestra delgada. La línea 20 representa una muestra gruesa. Este método requiere determinar la posición temporal de los picos a partir de dos formas de onda en el dominio del tiempo que se adquirieron en dos instantes diferentes (es decir, muestra en y fuera del haz). Este método puede dar como resultado errores de desplazamiento o de ajuste de escala si la posición de uno cualquiera de los picos se desplaza debido a condiciones instrumentales o ambientales.

Como alternativa, los pulsos de THz reflejarán algo de energía en cualquier interfase (por ejemplo, reflexión de Fresnel). Haciendo referencia a la figura 5, se ilustra una cámara de muestra de múltiples pasadas 21. Las reflexiones usando los espejos 22 y 24 a partir de la superficie frontal y posterior de una muestra se pueden observar tal como se muestra en la figura 6. El retardo de tiempo entre estos dos picos de reflexión se determina mediante la masa y el índice de refracción del material. Por lo tanto, es posible medir la masa, el espesor y/o la densidad de la muestra de una muestra a partir de una única forma de onda en el dominio del tiempo. Las mediciones que se realizan de esta forma mostrarán unos errores de pendiente de temporización o de desplazamiento reducidos.

La realización de múltiples pasadas de los pulsos de THz a través de la muestra aumentaría el retardo de tiempo observado sin cambiar la imprecisión de la medición de tiempo de pulso (siempre que se mantenga una relación de señal a ruido suficiente). Este concepto se ilustra en la figura 4. Este método aumentaría la precisión global de medición de espesor de muestra.

Un aspecto interesante de las formas de onda de reflexión es la polaridad de los pulsos de forma de onda. TD-THz mide el campo eléctrico directo, por lo tanto, la polaridad del pulso indica, de hecho, la polaridad del campo eléctrico. En las mediciones de transmisión, la presencia de una muestra no afecta a la polaridad de los pulsos. No obstante, para las mediciones de reflexión, el pulso invertirá su polaridad cuando se refleje a partir de una interfase de índice de refracción bajo a alto o de metal. Esta es la razón por la cual se invierte la polaridad del primer pulso en la forma de onda de reflexión de la figura 6 (de aire a muestra). La intensidad de reflexión depende, de entre otros factores, de la diferencia en el índice de refracción entre los dos materiales. Esta información se puede usar para determinar la variación incremental de cambio de índice de refracción, incluyendo el signo de la variación incremental, de los dos materiales a través de la interfase.

Hirsch O. y col.: "Techniques for cancellation of interfering multiple reflections in terahertz time domain measurements", *Microelectronics Journal* 39 (2008) 841-848 describe unos algoritmos que permiten una reducción significativa de los efectos de múltiples pulsos, que se originan a partir de las reflexiones de pulsos dentro de los emisores de terahercios (THz). Los algoritmos se basan en modelos para la propagación de los pulsos en el interior del emisor. Los parámetros del modelo se pueden estimar a partir de un experimento de calibración usando una señal de referencia en ausencia de una muestra. Entonces, los parámetros ya estimados para un dispositivo de emisión particular, se pueden usar para moderar los efectos de múltiples pulsos en todas las mediciones que se realizan con el mismo emisor. La aplicación de este método se muestra en la investigación de una muestra en forma de disco y en la investigación de una capa de pintura.

Breve descripción de los dibujos

la figura 1 ilustra una forma de onda de terahercios en el dominio del tiempo (TD-THz, *Time domain Terahertz*);

la figura 2 ilustra una interacción de pulsos de THz con materiales;

la figura 3 ilustra una interacción de reflexión a modo de ejemplo de pulsos de TD-THz;

la figura 4 ilustra una medición de transmisión del aire y diversas muestras de espesor;

la figura 5 ilustra una cámara de muestra de múltiples pasadas;

la figura 6 ilustra una forma de onda de TD-THz de reflexión a partir de una muestra;

la figura 7 ilustra un ejemplo simulado de un pulso de TD-THz que se refleja a partir de diversos espesores de material;

la figura 8 ilustra una representación gráfica del algoritmo de punto medio de borde aplicado a diversos espesores de muestra;

la figura 9 ilustra una representación gráfica de la amplitud de forma de onda reflejada de pico a pico frente al espesor de la muestra;

la figura 10 ilustra un borde de pulso para una determinación de punto medio;

la figura 11 ilustra un ajuste lineal de un punto medio de borde seleccionado;

la figura 12 ilustra un diagrama de flujo para una determinación de punto medio;

la figura 13 ilustra dos casos convencionales para el hallazgo de múltiples picos;

la figura 14 ilustra dos casos 'bipolares' no convencionales para el hallazgo de múltiples picos;

la figura 15 ilustra un caso en el que el primer pico se indica como bipolar y el segundo como un tipo convencional;

la figura 16 ilustra una forma de onda de modelo;

la figura 17 ilustra una forma de onda de muestra, en la que los primeros dos picos son la cuña delgada de plástico, y los segundos dos picos son un interferómetro de Fabry Pérot de referencia de silicio;

la figura 18 ilustra una vista ampliada de un pico de forma de onda de modelo;

la figura 19 ilustra una vista ampliada de unos picos de forma de onda de muestra;

la figura 20 ilustra un punto de partida del ajuste de ensayo de forma de onda de modelo a una forma de onda de muestra usando 256 puntos;

la figura 21 ilustra un resultado final después de la optimización del método;

la figura 22 ilustra un resultado de medición de espesor de cuña delgada de plástico;

5 la figura 23 ilustra datos de muestra para un método de desconvolución;

la figura 24 ilustra una transformada de Fourier de los datos en la figura 23;

10 la figura 25 ilustra un resultado en el dominio de la frecuencia de dividir la muestra por la referencia;

la figura 26 ilustra un filtro de Tikhonov al resultado de la figura 25 da lugar a una reponderación de los datos hacia las frecuencias con mayor relación de señal a ruido;

15 la figura 27 ilustra una transformada de Fourier inversa de los datos en la figura 26, que es la desconvolución completada de los datos en la figura 23;

la figura 28 ilustra un ajuste de modelo que se aplica a un resultado de desconvolución;

20 la figura 29 ilustra un resultado de convolucionar la figura 27 con una función Gaussiana;

la figura 30 ilustra un ajuste de modelo de la figura 29;

la figura 31 ilustra un ajuste de modelo de la figura 30 que incluye reflexiones;

25 la figura 32 ilustra un sensor con un interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno;

la figura 33 ilustra una forma de onda de reflexión a partir de un sensor de interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno y una muestra de única capa;

30 la figura 34 ilustra una estructura de ICE/reflector posterior, en la que la figura más a la izquierda es una estructura vacía, mientras que la figura más a la derecha es la estructura con una muestra;

la figura 35 ilustra una forma de onda de TD-THz para muestra en una estructura de interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno/reflector posterior;

35 la figura 36 ilustra un interferómetro de Fabry Pérot de múltiples pasadas de muestra;

la figura 37 ilustra una cámara de interferómetro de Fabry Pérot de muestra de múltiples pasadas con una trayectoria de aire de referencia simultánea; y

40 la figura 38 es un diagrama de bloques de un ordenador de propósito general que materializa los principios de la presente invención.

Descripción detallada de la invención

45 Con el fin de realizar un número de diferentes mediciones de propiedades de muestra, es necesario que se determine con precisión el tiempo de tránsito del pulso o pulsos de TD-THz. Esto se puede lograr con múltiples métodos. Se presentan tres algoritmos para un valor de tiempo de pulso rápido y de alta precisión, usando pulsos de TD-THz como datos a modo de ejemplo: un método de punto medio de borde, un método de ajuste de modelo y un

50 método de desconvolución con ajuste. En lo sucesivo se describen directrices para determinar el mejor algoritmo.

La selección de algoritmo depende de múltiples factores; la figura 7 ayuda a ilustrar este punto. La forma de onda 26 simula un retardo de 10 ps entre las reflexiones frontales y posteriores, equivalente a 3 mm de material de $n = 1,5$. La forma de onda 28 es de 2 ps (0,6 mm), la forma de onda 30 es de 0,02 ps (60 micrómetros), y la forma de onda

55 32 es de 0,005 ps (15 micrómetros). El algoritmo de punto medio de borde es en general un método computacional más rápido, pero por lo general este no funciona tan bien en muestras muy delgadas (la figura 8). El método de amplitud de pico a pico también es rápido, pero solo funciona en muestras muy delgadas (la figura 9). Los algoritmos de ajuste de modelo y de desconvolución por lo general funcionan con todas las muestras, y proporcionan una precisión más alta (la tabla 1), pero son más lentos de computar.

60 En el método de punto medio de borde, el punto medio de los bordes de un pulso se determina y se desplaza de tal modo que estos se encuentran a 0 V. Un número de puntos en torno al punto medio de 0 V se seleccionan para análisis (la figura 10). Entonces, se realiza un ajuste lineal de los datos para los puntos en torno a este punto medio (la figura 10). La ecuación de ajuste lineal resultante se soluciona para su ordenada en el origen y ese valor es el

65 tiempo asignado a ese pico. Este método es computacionalmente simple y proporciona una alta precisión de la

posición temporal de los picos, del orden de 1/75 de la separación de puntos de medición de forma de onda, una mejora significativa en la precisión de temporización.

5 Un ajuste lineal de los puntos seleccionados proporciona el método más simple computacionalmente y, por lo tanto, el más rápido para determinar con precisión el punto medio de borde. No obstante, también son posibles ajustes de orden superior y pueden proporcionar mejoras adicionales en la precisión temporal. Un polinomio de 3^{er} orden había mostrado una precisión de ajuste mejorada. Son posibles otros ajustes no lineales o de orden superior.

10 Un diagrama de flujo que detalla el método 34 para una determinación de punto medio se muestra en la figura 12. En la figura 13 se resaltan formas de picos a modo de ejemplo, en las que se hallan los dos casos convencionales para múltiples picos. Si la relación de V_{\min}/V_{\max} es demasiado grande, se supone que el pico es un caso bipolar tal como se da en lo sucesivo. Si la relación de $V_{\min}/V_{\min 2}$ (o $V_{\max}/V_{\max 2}$) es demasiado grande, el pico se marca como irregular (tipo 3).

15 La figura 14 proporciona los dos casos 'bipolares' no convencionales para el hallazgo de múltiples picos. Los resultados anteriores confirman que se es capaz de resolver y cuantificar múltiples picos y bordes por pico, usando el algoritmo de detección de punto medio de borde.

20 Haciendo referencia a la figura 12, el método 34 adquiere en primer lugar una forma de onda tal como se muestra en la etapa 36. En la etapa 38, se realiza una determinación de si una tensión máxima es mayor que el valor absoluto del mínimo de la forma de onda. Si la etapa 38 es verdadera, entonces se realiza una determinación en la etapa 40 de si el mínimo tuvo lugar antes del máximo. A continuación de lo anterior, en la etapa 42, se halla un mínimo al retroceder desde el máximo. Entonces, el método 34 continúa hasta la etapa 48 que se describirá con mayor detalle en los párrafos que siguen.

25 Si la etapa 38 es falsa, se realiza una determinación en la etapa 44 de si el máximo tuvo lugar antes del mínimo. Si la etapa 44 es falsa, el método continúa hasta la etapa 48 que se describirá con mayor detalle más adelante. De lo contrario, el método continúa hasta la etapa 46 en la que el máximo se determina al retroceder desde el mínimo.

30 En la etapa 48, un ajuste lineal se logra mediante el uso de una regresión lineal de un subconjunto de puntos de datos entre un valor mínimo y un valor máximo de la forma de onda. Por último, en la etapa 50, un tiempo de pulso se determina mediante el momento en el que la línea de regresión lineal se encuentra en un punto medio de las tensiones máxima y mínima.

35 Este método de ajuste de modelo usa el método de punto medio de borde como un punto de partida para ajustar una forma de onda de modelo. La forma de onda de modelo es un único pulso de THz (la figura 16, la figura 18), tan recogidas como es posible usando las mismas condiciones que la forma de onda de muestra (la figura 17, la figura 19). El punto medio de borde se usa para generar un punto de partida para el ajuste de modelo, que entonces usa un método de optimización simplex para evaluar una serie de formas de onda de ensayo con una temporización y una amplitud variables y converger sobre los parámetros de la mejor solución.

40 Para la realización inicial de pruebas, se usan dos copias de la forma de onda de modelo para ajustar la parte frontal y la parte trasera de una cuña delgada de plástico de 0,5 mm (0,02 pulgadas) de espesor. En la figura 20, la forma de onda 52 es una forma de onda de muestra, y la forma de onda 54 es una forma de onda de ensayo, en la que el punto de partida del ajuste de ensayo de forma de onda de modelo a una forma de onda de muestra usando 256 puntos. La figura 21 ilustra el resultado final después de la optimización del método, en el que la forma de onda 56 es una forma de onda de muestra, y la forma de onda 58 es una forma de onda de ensayo. La optimización varía la temporización de las dos copias y el ajuste de escala global de la forma de onda. La temporización ΔT se varía al cambiar la fase de la transformada de Fourier,

50

$$\varphi(\nu) = 2\pi(\Delta\tau)\nu$$

debido a que este método en el dominio de la frecuencia da unos resultados precisos sin interpolación. La forma de onda de ensayo se genera a partir de la forma de onda de modelo mediante

55

$$W_{\text{ensayo}} = C * \text{FFT}^{-1} \left(\text{FFT}(W_{\text{ref}}) e^{i\varphi(\nu)} (1 - e^{i\delta(\nu)}) \right)$$

60 en la que W_{ensayo} y W_{ref} son las formas de onda de ensayo y de referencia en el dominio del tiempo, C es un factor de ajuste de escala, $\varphi(\nu)$ es el desfase del pico de modelo al primer pico de muestra, y $\delta(\nu)$ es el desfase del primer pico de muestra al segundo pico de muestra. La optimización intenta reducir al mínimo el valor cuadrático medio de la diferencia entre las formas de onda de ensayo y de muestra

$$Err = \sqrt{\left\langle \left(W_{muestra}(\tau) - W_{ensayo}(\tau) \right)^2 \right\rangle}$$

Los resultados iniciales son que este método es, de forma consistente, ligeramente mejor que el método de paso por cero, incluso cuando la forma de onda de modelo no es óptima:

5

Tabla 1 - Resultados de ajuste de picos, 100 formas de onda que se recogen usando la unidad exploradora. Cada forma de onda es, en sí misma, de 99 promedios. El tiempo se mide en un ordenador personal lento.

Método	Desviación típica (media de 8 a 8,15 ps)	Tiempo requerido
Método de paso por cero	1,62 fs	0,046 s
Ajuste de picos, 256 puntos	0,91 fs	0,21 s
Ajuste de picos, 512 puntos	0,90 fs	0,33 s
Ajuste de picos, toda la forma de onda	0,91 fs	2,80 s

Para el método de desconvolución, las mediciones de THz se pueden considerar como la convolución de la respuesta de instrumento inherente (debido a las propiedades fotoconductoras del material, la forma de pulso de láser, las geometrías de antena de transmisor y de receptor, etc.) con la superficie o superficies de la muestra. Si la respuesta de instrumento se puede determinar por separado, por ejemplo mediante el uso de una superficie de referencia, la medición de THz se puede desconvolucionar para extraer solo los datos de superficie de muestra. La desconvolución se ha notificado en el pasado para la reconstrucción en 3D de THz. En el presente caso, el elemento singular es la aplicación de desconvolución a las mediciones de espesor. La desconvolución antes del ajuste de modelo mejora la exactitud de los resultados. La convolución de dos funciones es equivalente a la multiplicación de sus transformadas de Fourier:

10

15

$$y(t) = x(t) * h(t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau$$

$$y(t) = \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(x(t))\mathcal{F}(h(t)))$$

20

Para las señales de THz, la forma de onda de terahercios adquirida $y(t)$ es la convolución de la forma de onda de referencia o la respuesta de instrumento $h(t)$, con las reflexiones de Fresnel a partir del objeto real $x(t)$. El objeto puede tener múltiples capas de diferente índice de refracción, absorbencia y espesor. $\mathcal{F}(x)$ y $\mathcal{F}^{-1}(t)$ representan las transformadas de Fourier directa e inversa, respectivamente.

25

La desconvolución es la operación inversa de reconstruir un objeto desconocido dada la forma de onda de THz adquirida y una forma de onda de referencia de THz. El método más simple de desconvolución usa una división en el dominio de Fourier:

30

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1}\left(\frac{\mathcal{F}(y(t))}{\mathcal{F}(h(t))}\right)$$

35

Esta división produce unos resultados muy ruidosos debido a que la medición de THz se sobremuestra para evitar la distorsión por repliegue del espectro. La medición sobremuestreada tiene una SNR nula o mínima a lo largo de parte de la gama de frecuencias, y en esta gama de frecuencias el resultado de la división es amplificar el ruido. La solución es filtrar la medición. Un método es un filtro de paso de banda simple. No obstante, es necesario que este se ajuste para el ancho de banda de cada configuración de sistema de THz, y puede crear artefactos de respuesta a impulsos. Un filtro alternativo $R(\omega)$ es el filtro de Tikhonov, un filtro simple y gradual para eliminar las parte de baja SNR del espectro:

40

$$R(\omega) \equiv \frac{1}{1 + \frac{\tau}{|\mathcal{F}(h(t))|^2}}$$

45

Este método se propone en el contexto de la desconvolución de formación de imágenes. La realización del filtrado y la desconvolución reduce de forma simultánea el número de transformadas que se requieren:

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(y(t))}{\mathcal{F}(h(t))} R(\omega) \right)$$

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(y(t)) \left| \mathcal{F}(h(t)) \right|^2}{\mathcal{F}(h(t)) \left| \mathcal{F}(h(t)) \right|^2 + \tau} \right)$$

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(y(t)) \mathcal{F}^*(h(t))}{\left| \mathcal{F}(h(t)) \right|^2 + \tau} \right)$$

5

La figura 23 muestra una medición de THz de muestra y una medición de referencia. La línea 58 es una medición de THz reflejada a partir de un panel pintado. La línea 60 es la respuesta de instrumento, que se mide por separado. La figura 24 muestra las transformadas de Fourier de las mediciones. La figura 25 y la figura 26 muestran el resultado de la división en el dominio de Fourier. En la figura 25, la señal ya se ha sometido a paso de banda para limitar la misma a 2,2 THz. No obstante, la creciente variabilidad de la señal a frecuencias más altas (por ejemplo, en torno a 0,5 THz frente a aproximadamente 2 THz) es un resultado de la variación de SNR en el pulso de THz de banda ancha. En la figura 26, se muestran los resultados de aplicar el filtro de Tikhonov al resultado de la figura 25, lo que da lugar a una reponderación de los datos hacia las frecuencias con mayor SNR. La línea 62 es el resultado de dividir el pulso de referencia por sí mismo y de aplicar el mismo filtrado.

La figura 27 muestra la desconvolución completada. Los picos son más estrechos y simétricos, lo que los hace más discernibles que las formas de onda originales. La línea 64 es la transformada de Fourier inversa de los datos en la figura 26, que es la desconvolución completada de los datos en la figura 23. La línea 66 es la desconvolución del pulso de referencia, que se puede ajustar al pulso de muestra para una exactitud aumentada. Al método de desconvolución le sigue un ajuste de modelo. Tal como se ha descrito en lo que antecede, la temporización y la amplitud de la función de ajuste se varía usando una técnica de búsqueda multidimensional simplex.

En la figura 28, un ajuste de modelo que se aplica al resultado de desconvolución. La línea 68 es el resultado de ajustar 3 copias del pulso de referencia al pulso de muestra. La línea 70 es el error residual.

Un perfeccionamiento adicional es convolucionar el resultado desconvolucionado con una función lisa y compacta tal como una función Gaussiana, tal como se muestra en la figura 29 y la figura 30. La figura 29 es el resultado de convolucionar la figura 27 con una función Gaussiana. La función Gaussiana tiene relativamente un soporte compacto y reduce al mínimo el rizado, a pesar de que la FWHM de los picos se aumenta ligeramente. La figura 30 es el ajuste de modelo de la figura 29.

Un perfeccionamiento adicional es el uso de unos valores de índice de refracción conocidos o supuestos para los materiales de capa para calcular las reflexiones internas dentro de la muestra tal como se muestra en la figura 31. Los puntos redondos indican la amplitud y la temporización de las reflexiones principales, y las estrellas indican múltiples rebotes del pulso de terahercios entre capas de pintura. La línea de puntos indica una vez más el error residual.

Una ventaja principal del método de desconvolución/ajuste es la ampliación a muestras más delgadas, el comportamiento lineal esperado del ajuste de la variación incremental del tiempo de tránsito entre reflexiones a partir de las superficies frontal y posterior de muestras al espesor de la muestra (la figura 22).

Tal como se analiza, las características primarias de medición de los pulsos de formas de onda de terahercios en el dominio del tiempo son la posición en el tiempo y la amplitud del pulso. Se entiende bien que las condiciones instrumentales o ambientales (por ejemplo, ruido, deriva) afectan a la medición, en este caso disminuyendo la precisión de la medición de amplitud o de posición temporal de los picos. Una referencia interna de sistema podría tanto confirmar un funcionamiento apropiado del sistema como, si es necesario, proporcionar datos para correcciones (por ejemplo, ajuste de escala de amplitud o calibración de tiempos) a los resultados de forma de onda de muestra.

Tal como se ha hecho notar previamente, cualquier interfase de índice de refracción generará una reflexión de un pulso de THz. Tal como se muestra en la figura 32, en el presente caso la invención y la implementación propuestas es instalar un interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno 72 en el cabezal del sensor que proporcionaría unas señales de reflexión para que se usen para la calibración del sistema y de mediciones. Obsérvese que, para un sensor con este interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno y una muestra de tipo película de única capa que se muestran, se encuentran presentes cuatro interfases (la superficie frontal y posterior de interferómetro de

Fabry Pérot y la superficie frontal y posterior de muestra). Por lo tanto, se esperan cuatro picos de reflexión (designados por los números de referencia 74, 76, 78 y 80 en la figura 33. Una forma de onda de TD-THz de una configuración experimental de este tipo se muestra en la figura 22. Se observan los 4 picos de reflexión esperados.

- 5 Obsérvese también que este concepto no se limita a 4 interfases, sino que se podría ampliar a cualquier número de interfases, por ejemplo, muestras de múltiples capas o muestras apiladas.

10 El interferómetro de Fabry Pérot de calibración se fabricaría idealmente a partir de un material estable con un coeficiente de dilatación térmica bajo, un índice de refracción bajo a frecuencias de THz y una absorción extremadamente baja. El polietileno de alta densidad (HDPE) es un material objetivo razonable. También son opciones el silicio de baja resistividad o la sílice fundida.

15 El fin de este interferómetro de Fabry Pérot de calibración sería proveer una medición simultánea de la temporización y la amplitud del interferómetro de Fabry Pérot y la muestra para cada adquisición de forma de onda individual. Los cambios en las condiciones de instrumentación o ambientales se reflejarían como cambios en los picos de interferómetro de Fabry Pérot de calibración. El interferómetro de Fabry Pérot se elegiría para proporcionar una señal estable, por lo tanto, se podrían usar cambios en las mediciones de interferómetro de Fabry Pérot para ajustar las mediciones de muestra. Los ajustes a modo de ejemplo incluirían el ajuste de escala de la medición de variación incremental de tiempo de muestra o usando la información de amplitud de señal de calibración para mejorar el algoritmo de ajuste de modelo. Es importante hacer notar una vez más que esta información de calibración/referencia estaría contenida dentro de cada forma de onda de reflexión de TD-THz individual. El intervalo de tiempo de forma de onda TD-THz tendría que ser lo bastante largo para asegurar que las reflexiones tanto de muestra como de interferómetro de Fabry Pérot de calibración tienen lugar dentro de este intervalo. Los métodos y algoritmos de posición temporal de pulso previamente analizados serían críticos para proporcionar una precisión suficiente para permitir que este patrón de calibración sea útil. Además, la amplitud de los pulsos reflejados se podría usar para ayudar a modelar los pulsos reflejados de forma de onda de muestra, en especial para los métodos de amplitud de pico a pico y de ajuste de modelo.

20 El espesor del interferómetro de Fabry Pérot se variaría para proporcionar la mejor precisión de calibración. Idealmente, el interferómetro de Fabry Pérot solo reflejaría una pequeña porción del pulso de THz, dejando que la mayor parte de la energía de pulso pase a la muestra. Si el interferómetro de Fabry Pérot fuera relativamente grueso, entonces resultarían dos picos de reflexión limpiamente separados (tal como se observa en la figura 6 y la figura 22). Entonces, una medida de la variación incremental de tiempo entre los dos picos de interferómetro de Fabry Pérot de calibración sería el método preferido de análisis temporal. Si el interferómetro de Fabry Pérot fuera lo bastante delgado, este reflejaría menos energía de THz, lo cual se prefiere. No obstante, en este caso las interfases individuales no se resolverían en el tiempo y se requeriría el ajuste de modelo usando el método de ajuste de amplitud que se ha analizado anteriormente. Qué método y algoritmo proporciona una mejor precisión de medición de muestra dependería de la muestra y de las condiciones experimentales (por ejemplo, tasa de medición).

30 Tal como se muestra en la figura 34, de acuerdo con la invención, el uso de un reflector posterior 84 con el interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno (ICE, *Internal Calibration Etalon*) 82 permite una precisión de medición mejorada de otras propiedades de muestra. Un ejemplo es el espesor absoluto de la muestra. El método típico para calcular el espesor de una muestra requiere el valor de la variación incremental de los tiempos de tránsito de pulso para las reflexiones de pulsos de TD-THz a partir de las superficies frontal y posterior de la muestra y el conocimiento del índice de refracción de la muestra. Con el uso de un ICE y un reflector posterior, se pueden realizar unas mediciones de espesor de precisión más alta sin conocimiento del índice de refracción del material de muestra.

35 Para este método, es necesario que se mida y se registre la variación incremental de valor de tiempo de tránsito de pulso para la estructura vacía. Este valor se usa en el cálculo del espesor absoluto de la muestra.

40 Una vez que la muestra se ha insertado en la estructura, se observan al menos cuatro pulsos (la figura 35). Usando los métodos de alta precisión que se han analizado en lo que antecede, es necesario hallar los tiempos de tránsito ($T_{pk\#}$) para todos los pulsos.

45 Con estos valores de alta precisión, el espesor absoluto de la muestra se puede calcular de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Espesor} = (T_{\text{Ref}} - T_{\text{Pk1}} - T_{\text{Pk3}} + T_{\text{Pk2}}) \times C$$

50 Todos los tiempos de TP_k son relativos al tiempo TP_{k0} . El valor de T_{Ref} se mide con la estructura vacía de ICE/reflecto posterior. c es el valor conocido para la velocidad de la luz. El cálculo proporciona un resultado de alta precisión para el espesor de la muestra con independencia de la composición del material de muestra.

55 Tal como se ilustra en la figura 4, realizando múltiples pasadas del pulso de THz a través de la muestra en una medición de transmisión aumentaría el retardo de tiempo de vuelo observado entre una exploración de referencia de aire y de muestra sin aumentar la imprecisión de la medición de la temporización. Esto es deseable.

No obstante, un aspecto poco deseable de las mediciones de transmisión son los cambios en la exploración de referencia de aire (por ejemplo, deriva) o en la separación del transmisor/receptor de THz (por ejemplo, movimiento mecánico) son en general indistinguibles de los cambios en la muestra. El siguiente sistema y método aborda esta cuestión.

5 Haciendo referencia a la figura 36, se muestran una primera cámara de muestra de múltiples pasadas 86 con una muestra 14 y una segunda cámara de muestra de múltiples pasadas 88 sin una muestra. Cada una de la primera y la segunda cámaras de muestra de múltiples pasadas 86 y 88 incluye unos espejos completamente reflectantes 90 y 92 y unos espejos parcialmente reflectantes 94 y 96. También se muestran unas formas de onda de muestra 98 y 100 resultantes para las cámaras de muestra de múltiples pasadas 86 y 88, respectivamente. Si un lado de las cámaras de muestra de múltiples pasadas 86 y 88 se seleccionara para ser solo parcialmente reflectante, entonces son posibles múltiples adquisiciones del pulso de THz de transmisión dentro de la misma forma de onda en el dominio del tiempo.

15 El espesor de la muestra se determinaría mediante el aumento en la separación entre pulsos de transmisión para la muestra en comparación con el aire. Por lo tanto, el valor de variación incremental de tiempo de pulso para el aire sería un valor requerido. No obstante, este valor sería relativamente fácil de medir debido a que la variación incremental de tiempo se determinaría mediante la separación de interferómetro de Fabry Pérot de múltiples pasadas de muestra. Esta separación se podría establecer a cualquier distancia apropiada para dar una separación clara entre los pulsos de transmisión. Esta mínima separación se mantendría para todos los espesores de muestra, es decir, los dos pulsos no convolucionan e interfieren el uno con el otro tal como se observa para la medición de reflexión de muestra delgada. Este aspecto sería bastante ventajoso para las mediciones de transmisión. Adicionalmente, sigue existiendo la ventaja de que las múltiples pasadas de transmisiones aumenten el retardo de tiempo de vuelo medido (como un múltiplo del número de pasadas a través de la muestra). Es decir, el retardo entre el primer y el tercer pulsos de transmisión sería cuatro veces el de una transmisión de aire/única pasada. Esto se traducirá en una precisión significativamente mejorada de la medición de variación incremental de tiempo.

Otra mejora se puede realizar debido a que el efecto de estabilidad mecánica sobre la medición solo dependería de la separación de interferómetro de Fabry Pérot, en lugar de en la distancia del transmisor al receptor. Será más fácil elegir materiales y métodos de construcción para el interferómetro de Fabry Pérot que producirán una mayor estabilidad térmica y mecánica. Las mejoras en la estabilidad de interferómetro de Fabry Pérot de cámara de muestra se traducirán directamente en una precisión mejorada de la medición.

35 La figura 37 muestra otra realización de la cámara de muestra de múltiples pasadas 86, que muestra un primer pulso de transmisión 102, un segundo pulso de transmisión 104 y un tercer pulso de transmisión 106. Si es posible aumentar el interferómetro de Fabry Pérot de tal modo que tiene lugar una reflexión de interferómetro de Fabry Pérot de pulso establecido sin muestra alguna en el haz de THz, entonces la forma de onda resultante proporcionará de forma simultánea información del interferómetro de Fabry Pérot y el aumento en el tiempo de vuelo para el pulso de transmisión a través de la muestra. La figura 37 también ilustra la forma de onda 108 resultante.

40 Haciendo referencia a la figura 38, se muestra una realización ilustrativa de un sistema informático general y esta se designa como 110. El sistema informático 110 puede incluir un conjunto de instrucciones que se puede ejecutar para dar lugar a que el sistema informático 110 realice cualesquiera uno o más de los métodos o funciones basadas en ordenador que se divulgan en el presente documento. El sistema informático 110 puede funcionar como un dispositivo autónomo o se puede conectar, por ejemplo, usando una red, con otros sistemas informáticos o dispositivos periféricos.

50 En una implementación en red, el sistema informático puede funcionar con el carácter de un servidor o como un ordenador de usuario cliente en un entorno de red de usuario servidor-cliente, o como un sistema informático del mismo nivel en un entorno de red de par a par (o distribuido). El sistema informático 110 también se puede implementar como o incorporarse en diversos dispositivos, tales como un ordenador personal (PC, *personal computer*), un PC de tipo tableta, un descodificador mutimedios (STB, *set-top box*), un asistente personal digital (PDA, *personal digital assistant*), un dispositivo móvil, un ordenador de bolsillo, un ordenador portátil, un ordenador de escritorio, un dispositivo de comunicaciones, un teléfono inalámbrico, un teléfono de línea terrestre, un sistema de control, una cámara, un escáner, una máquina de fax, una impresora, un buscapersonas, un dispositivo de confianza personal, un aparato web, un encaminador, un conmutador o puente de red, o cualquier otra máquina capaz de ejecutar un conjunto de instrucciones (secuenciales o de otro modo) que especifican acciones a emprender por esa máquina. En una realización particular, el sistema informático 110 se puede implementar usando dispositivos electrónicos que proporcionan comunicación de voz, de vídeo o de datos. Además, a pesar de que se ilustra un único sistema informático 80, la expresión "sistema" también se deberá interpretar como que incluye cualquier colección de sistemas o subsistemas que ejecutan, de forma individual o conjunta, un conjunto, o múltiples conjuntos, de instrucciones para realizar una o más funciones informáticas.

65 Tal como se ilustra en la figura 38, el sistema informático 110 puede incluir un procesador 112, por ejemplo, una unidad de procesamiento central (CPU, *central processing unit*), una unidad de procesamiento de gráficos (GPU, *graphics processing unit*), o ambas. Además, el sistema informático 110 puede incluir una memoria principal 114 y

una memoria estática 116 que se pueden comunicar la una con la otra por medio de un bus 118. Tal como se muestra, el sistema informático 110 puede incluir adicionalmente una unidad de visualización de vídeo 120, tal como una pantalla de cristal líquido (LCD, *liquid crystal display*), un diodo orgánico de emisión de luz (OLED, *organic light emitting diode*), un visualizador de panel plano, una pantalla de estado sólido, o un tubo de rayos catódicos (CRT, *cathode ray tube*). Adicionalmente, el sistema informático 110 puede incluir un dispositivo de entrada 122, tal como un teclado, y un dispositivo de control de cursor 124, tal como un ratón. El sistema informático 110 también puede incluir una unidad de disco 126, un dispositivo de generación de señales 128, tal como un altavoz o control remoto, y un dispositivo de interfaz de red 130.

En una realización particular, tal como se muestra en la figura 28, la unidad de disco 126 puede incluir un medio legible por ordenador 132 en el que pueden estar incluidos uno o más conjuntos de instrucciones 134, por ejemplo, soporte lógico. Además, las instrucciones 134 pueden materializar uno o más de los métodos o lógica tal como se describe en el presente documento. En una realización particular, las instrucciones 134 pueden residir completamente, o al menos parcialmente, dentro de la memoria principal 114, la memoria estática 116, y/o dentro del procesador 112 durante la ejecución por el sistema informático 110. La memoria principal 114 y el procesador 82 también pueden incluir medios legibles por ordenador.

En una realización alternativa, se pueden construir implementaciones de soporte físico dedicado, tal como circuitos integrados específicos de la aplicación, disposiciones lógicas programables y otros dispositivos de soporte físico, para implementar uno o más de los métodos que se describen en el presente documento. Las aplicaciones que pueden incluir los aparatos y sistemas de diversas realizaciones pueden incluir en sentido general una diversidad de sistemas electrónicos e informáticos. Una o más realizaciones que se describen en el presente documento pueden implementar funciones usando dos o más dispositivos o módulos de soporte físico interconectado específicos con unas señales relacionadas de control y de datos que se pueden comunicar entre y a través de los módulos, o como porciones de un circuito integrado específico de la aplicación. Por consiguiente, el presente sistema abarca implementaciones de soporte lógico, de soporte lógico inalterable y de soporte físico.

De acuerdo con diversas realizaciones de la presente divulgación, los métodos que se describen en el presente documento pueden ser implementados por programas de soporte lógico ejecutables por un sistema informático. Además, en una realización a modo de ejemplo y no limitada, las implementaciones pueden incluir procesamiento distribuido, procesamiento distribuido de componentes/objetos, y procesamiento en paralelo. Como alternativa, se puede construir un procesamiento de sistema informático virtual para implementar uno o más de los métodos o funcionalidad tal como se describe en el presente documento.

La presente divulgación contempla un medio legible por ordenador que incluye unas instrucciones 134 o recibe y ejecuta unas instrucciones 134 sensibles a una señal propagada, de tal modo que un dispositivo conectado con una red 136 puede comunicar voz, vídeo o datos a través de la red 136. Además, las instrucciones 134 se pueden transmitir o recibir a través de la red 136 por medio del dispositivo de interfaz de red 130.

A pesar de que se muestra que el medio legible por ordenador es un medio único, la expresión "medio legible por ordenador" incluye un medio único o múltiples medios, tal como una base de datos centralizada o distribuida, y/o memorias caché y servidores asociados que almacenan uno o más conjuntos de instrucciones. La expresión "medio legible por ordenador" también incluirá cualquier medio que sea capaz de almacenar, codificar o portar un conjunto de instrucciones para la ejecución por un procesador que dan lugar a que un sistema informático realice cualesquiera uno o más de los métodos u operaciones que se divulgan en el presente documento.

En una realización no limitante y a modo de ejemplo particular, el medio legible por ordenador puede incluir una memoria de estado sólido tal como una tarjeta de memoria u otro paquete que aloja una o más memorias de solo lectura no volátiles. Además, el medio legible por ordenador puede ser una memoria de acceso aleatorio u otra memoria regrabable volátil. Adicionalmente, el medio legible por ordenador puede incluir un medio magneto-óptico u óptico, tal como un disco o cintas u otro dispositivo de almacenamiento para capturar señales de onda portadora tal como una señal que se comunica a través de un medio de transmisión. Un anexo de archivo digital a un correo electrónico u otro archivo o conjunto de archivos autónomos de información se puede considerar un medio de distribución que es equivalente a un medio de almacenamiento tangible. Por consiguiente, se considera que la divulgación incluye cualesquiera uno o más de un medio legible por ordenador o un medio de distribución y otros equivalentes y medios sucesores, en los que se pueden almacenar datos o instrucciones.

A pesar de que la presente memoria descriptiva describe componentes y funciones que se pueden implementar en realizaciones particulares con referencia a normas y protocolos particulares, la invención no se limita a tales normas y protocolos. Por ejemplo, las normas para la transmisión por Internet y por otra red conmutada por paquetes (por ejemplo, TCP/IP, UDP/IP, HTML, HTTP) representan ejemplos del estado de la técnica. Tales normas son reemplazadas de forma periódica por equivalentes más rápidos o más eficientes que tienen esencialmente las mismas funciones. Por consiguiente, normas y protocolos de sustitución que tengan unas funciones que sean las mismas o similares a las que se divulgan en el presente documento se consideran equivalentes de los mismos.

5 Las ilustraciones de las realizaciones que se describen en el presente documento tienen por objeto proporcionar una comprensión general de la estructura de las diversas realizaciones. Las ilustraciones no tienen por objeto servir como una descripción completa de la totalidad de los elementos y características de aparatos y sistemas que utilizan las estructuras o los métodos que se describen en el presente documento. Muchas otras realizaciones pueden ser evidentes a los expertos en la materia tras la revisión de la divulgación. Otras realizaciones se pueden utilizar y deducir a partir de la divulgación, de tal modo que se pueden hacer sustituciones y cambios estructurales y lógicos sin apartarse del alcance de la divulgación. Adicionalmente, las ilustraciones son meramente figurativas y puede que no estén dibujadas a escala. Determinadas proporciones dentro de las ilustraciones pueden estar exageradas, mientras que otras proporciones pueden estar reducidas al mínimo. Por consiguiente, la divulgación y las figuras se han de considerar como ilustrativas en lugar de restrictivas.

10

15 En la Descripción detallada, diversas características se pueden agrupar o describirse en una única realización para el fin de simplificar la divulgación. La presente divulgación no se ha de interpretar como que refleja una intención de que las realizaciones que se reivindican requieran más características de las que se enuncian de forma expresa en cada reivindicación. En su lugar, tal como reflejan las siguientes reivindicaciones, la materia objeto de la invención puede estar dirigida a menos de la totalidad de las características de cualquiera de las realizaciones que se divulgan. Por lo tanto, las siguientes reivindicaciones se incorporan en la Descripción detallada, valiéndose cada reivindicación por sí misma como definitoria de una materia objeto que se reivindica por separado.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema para interpretar una forma de onda de terahercios (THz), comprendiendo el sistema un transmisor de THz (10) configurado para emitir un pulso de radiación de THz;
- 5 un receptor de THz (12) configurado para recibir al menos una porción del pulso de radiación de THz; un interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno (82) configurado para recibir el pulso de radiación de THz que proviene del transmisor de THz (10) y para reflejar una pequeña porción del pulso de THz hacia el receptor de THz (12) y para dejar que la mayor parte de la energía del pulso de THz pase a su través, en el que el interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno (82) comprende una superficie frontal de interferómetro de Fabry Pérot y una
- 10 superficie posterior de interferómetro de Fabry Pérot, siendo la superficie frontal de interferómetro de Fabry Pérot y la superficie posterior de interferómetro de Fabry Pérot unas interfases de índice de refracción configuradas para generar una reflexión del pulso de THz, respectivamente; un reflector posterior (84) que está dispuesto aguas abajo con respecto al interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno (82) con respecto a la dirección de propagación del pulso de THz, en el que el reflector posterior (84) está separado del interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno (82);
- 15 una separación entre el interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno (82) y el reflector posterior (84) para disponer una muestra (14) de tal modo que la muestra (14) no se encuentra en contacto físico directo con el interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno (82) y el reflector posterior (84), y la muestra (14) puede recibir la porción del pulso de radiación de THz que pasa a través del interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno (82);
- 20 en el que el reflector posterior (84) está configurado para recibir la porción del pulso de radiación de THz que pasa a través de la muestra (14) y para reflejar la porción de vuelta a la muestra en la dirección del receptor de THz.
2. El sistema de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un sistema informático (110) configurado para interpretar una o más formas de onda de THz en el dominio del tiempo que son recibidas por el receptor de THz (12), comprendiendo las formas de onda de THz en el dominio del tiempo la porción del pulso de THz que se refleja a partir del interferómetro de Fabry Pérot de calibración interno (82) hacia el receptor de THz (12), la porción del pulso de THz que se refleja a partir del reflector posterior (84), la porción del pulso de THz que se refleja a partir de una primera interfase de índice de refracción de la muestra (14), y la porción del pulso de THz que se refleja a partir de una segunda interfase de índice de refracción de la muestra (14).
- 25 3. El sistema de la reivindicación 2, en el que el sistema informático (110) comprende un procesador (112) configurado para ejecutar o bien un método de análisis de punto medio de borde, o bien un método de análisis de desconvolución, o bien un método de análisis de ajuste de modelo o bien una combinación del método de análisis de desconvolución y un método de análisis de ajuste de modelo para interpretar las formas de onda de THz en el dominio del tiempo.
- 35 4. El sistema de la reivindicación 3, en el que durante el método de análisis de punto medio de borde, el procesador (112) está configurado para:
- 40 hallar un punto de máxima amplitud de tensión de al menos una forma de onda de THz en el dominio del tiempo; hallar el valor absoluto de un punto de mínima amplitud de la al menos una forma de onda de THz en el dominio del tiempo; determinar cuál del punto de máxima amplitud y el punto de mínima amplitud es mayor;
- 45 determinar cuál del punto de máxima amplitud y el punto de mínima amplitud tuvo lugar en primer lugar con respecto al tiempo;
- cuando el punto de máxima amplitud es mayor que el punto de mínima amplitud y el punto de mínima amplitud tuvo lugar en primer lugar con respecto al tiempo, hallar el punto de mínima amplitud de la al menos una forma de onda de THz en el dominio del tiempo al retroceder con respecto al tiempo a lo largo de la al menos una forma de onda de THz en el dominio del tiempo desde el punto de máxima amplitud;
- 50 - cuando el punto de mínima amplitud es mayor que el punto de máxima amplitud y el punto de máxima amplitud tuvo lugar en primer lugar con respecto al tiempo, hallar el punto de máxima amplitud de la al menos una forma de onda de THz en el dominio del tiempo al retroceder con respecto al tiempo a lo largo de la al menos una forma de onda de THz en el dominio del tiempo desde el punto de mínima amplitud;
- 55 utilizar una regresión lineal de un subconjunto de puntos de datos entre el punto de mínima amplitud y el punto de máxima amplitud para calcular una línea de mejor ajuste entre el punto de mínima amplitud y el punto de máxima amplitud; y
- 60 determinar un tiempo de pulso de la al menos una forma de onda de THz en el dominio del tiempo cuando la línea de regresión lineal se encuentra en el punto medio del punto de mínima amplitud y el punto de máxima amplitud.
5. El sistema de la reivindicación 3, en el que durante el análisis de desconvolución, el procesador (112) está configurado para desconvolucionar y filtrar al menos una forma de onda de THz en el dominio del tiempo usando una forma de onda de referencia para crear una forma de onda de THz en el dominio del tiempo desconvolucionada.
- 65

6. El sistema de la reivindicación 5, en el que el procesador (112) está configurado para crear una forma de onda de THz en el dominio del tiempo desconvolucionada mediante el uso de una forma de onda de referencia que comprende una forma de onda que se refleja a partir de una superficie de referencia que tiene interferencia única.
- 5 7. El sistema de la reivindicación 3, en el que el método de ajuste de modelo utiliza un método de optimización simplex.

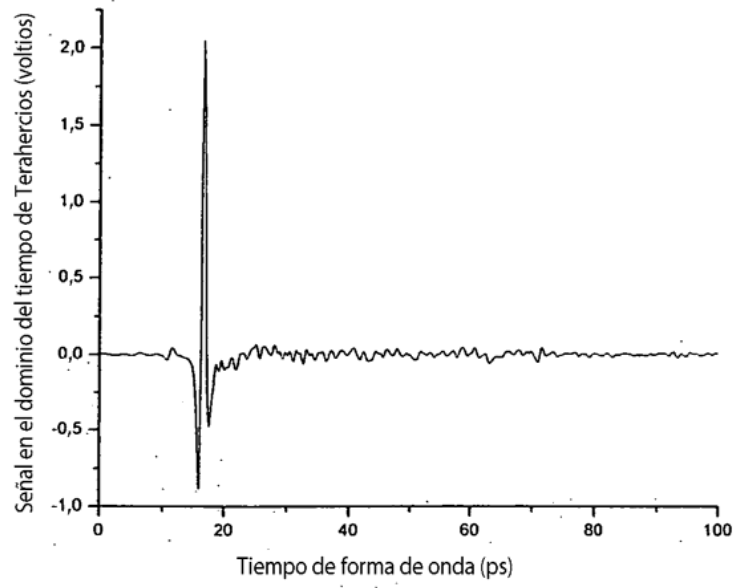


FIG. 1

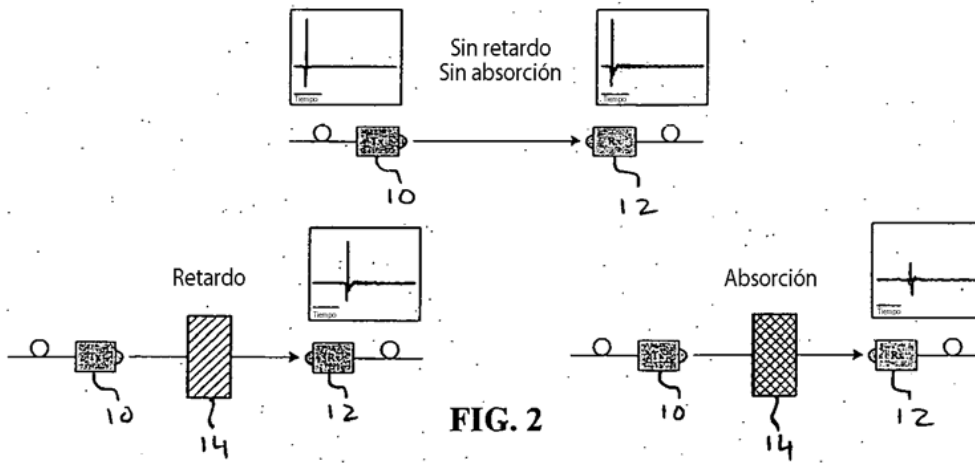


FIG. 2

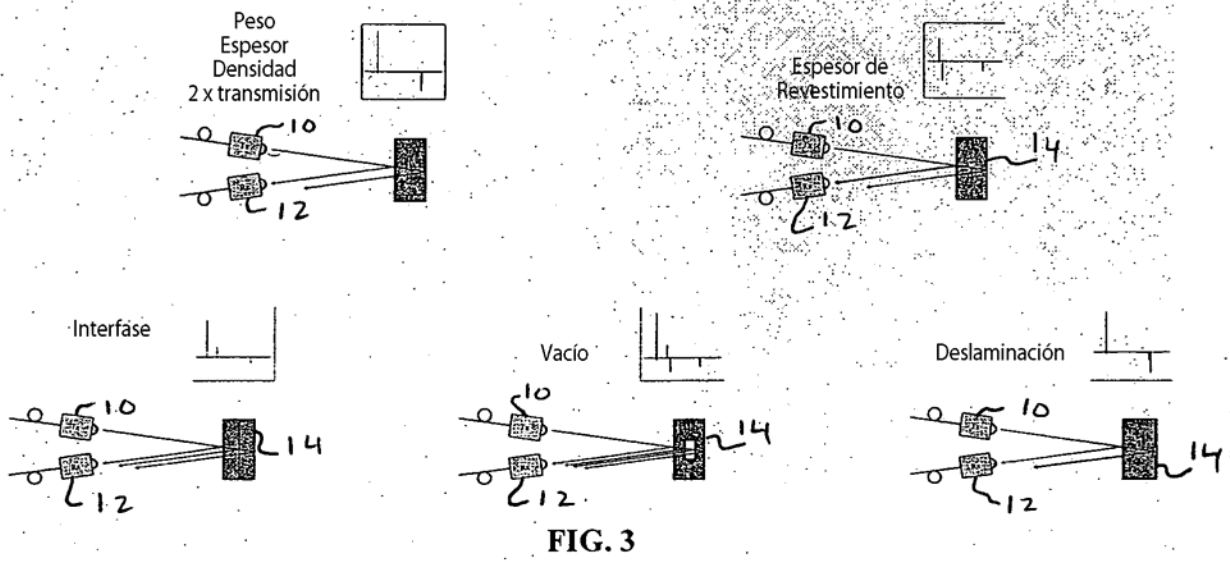


FIG. 3

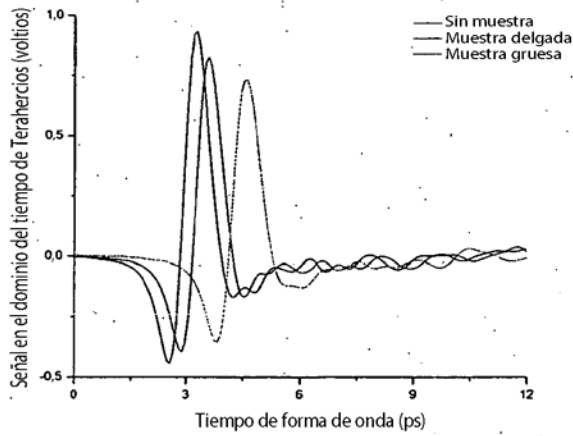


FIG. 4

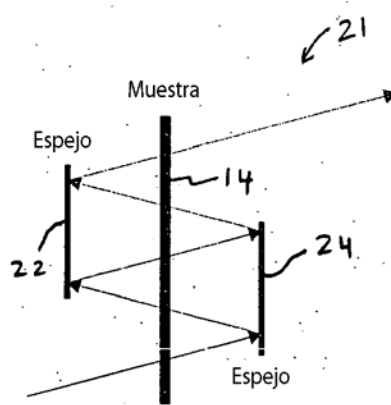


FIG. 5

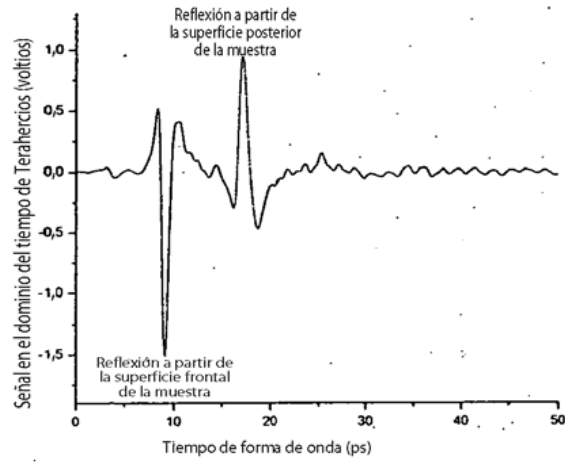


FIG. 6

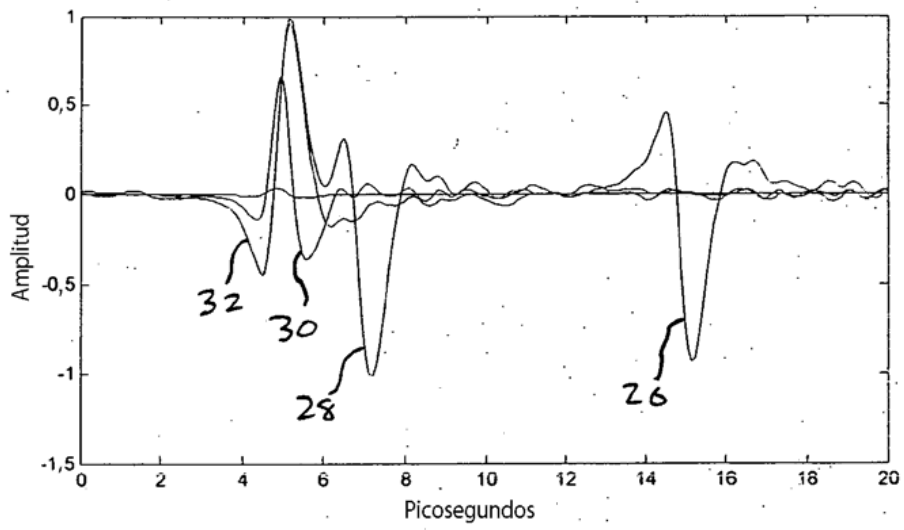


FIG. 7

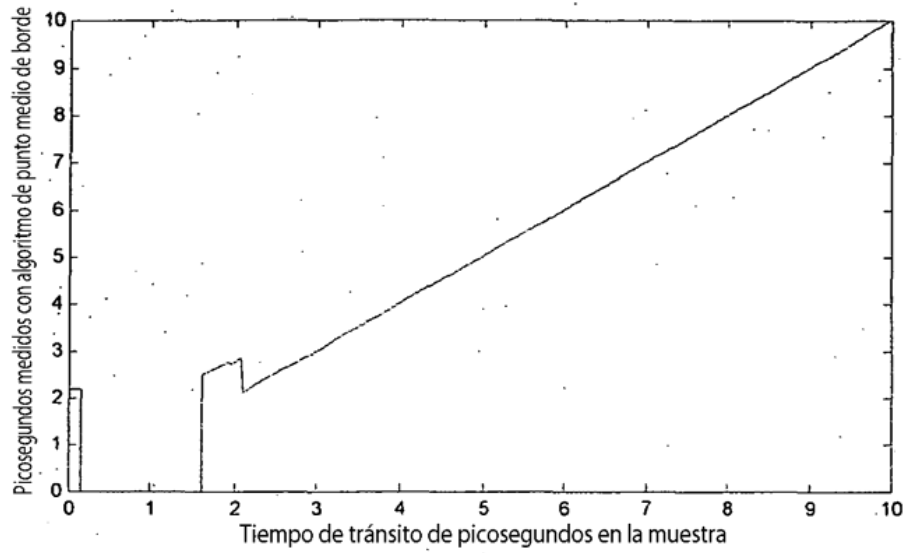


FIG. 8

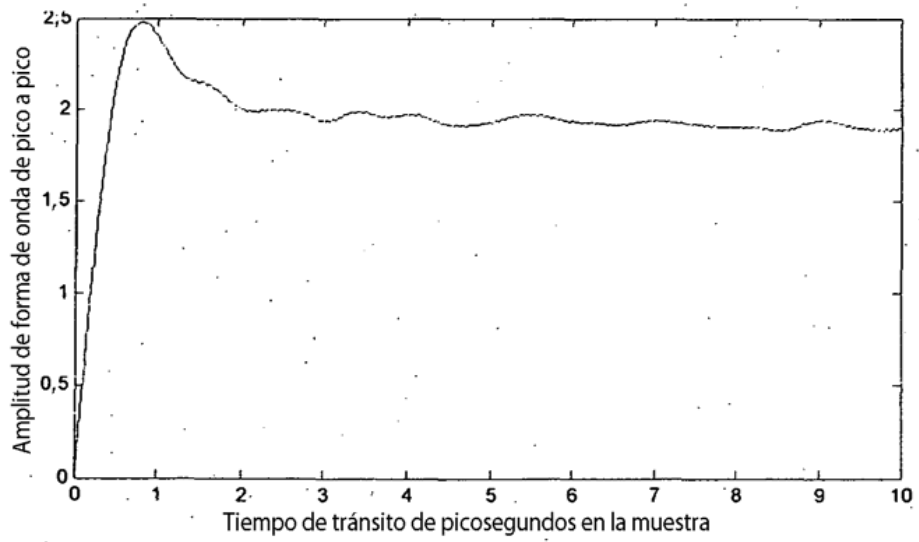


FIG. 9

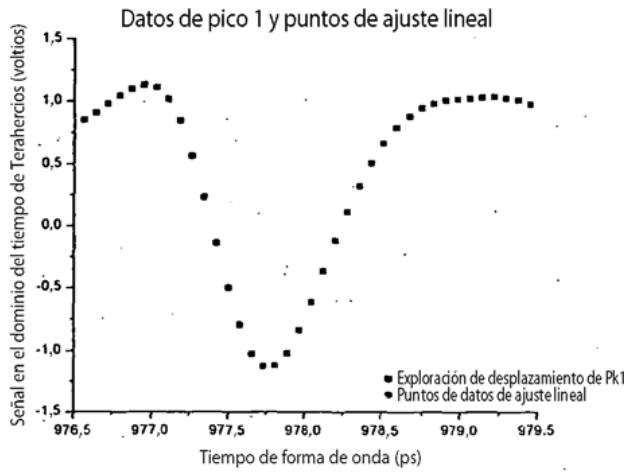


FIG. 10.

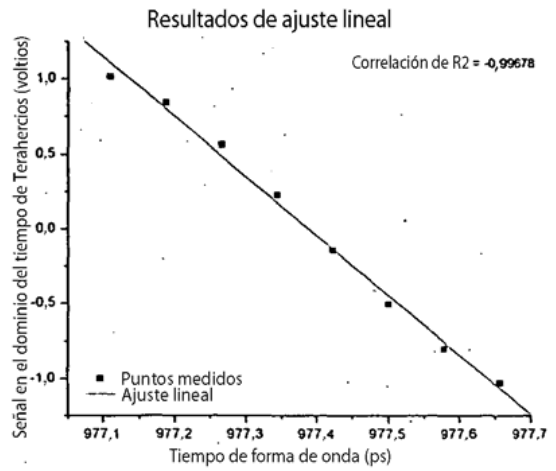


FIG. 11

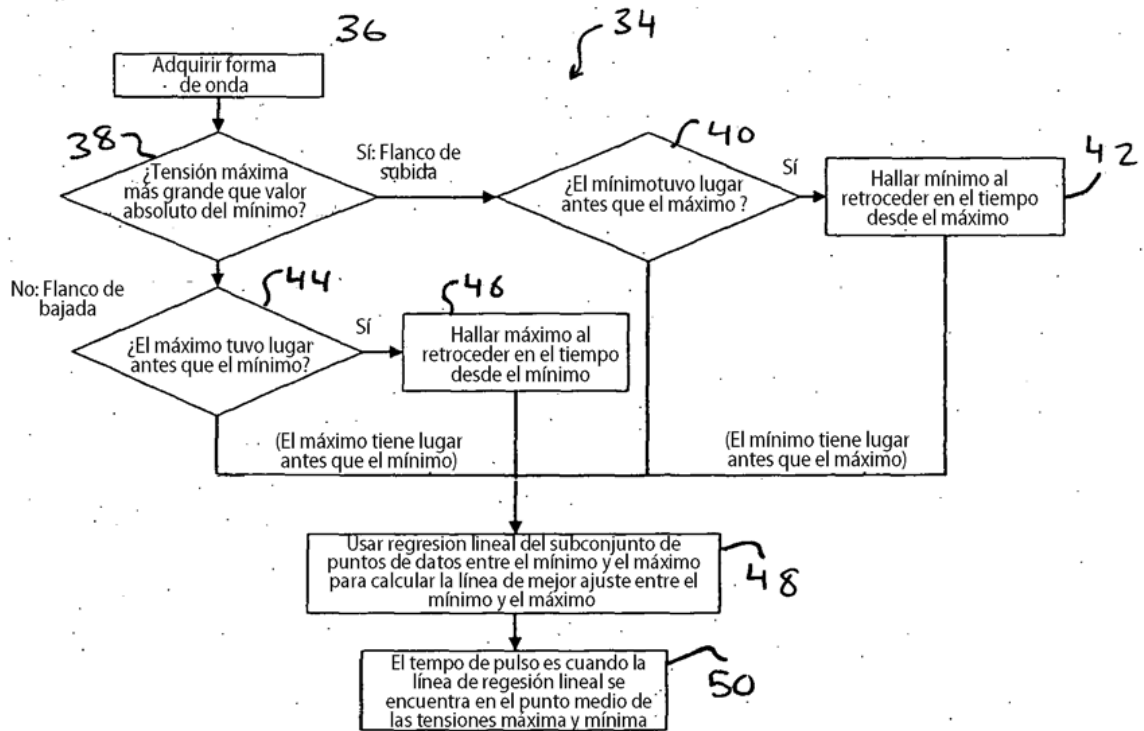


FIG. 12

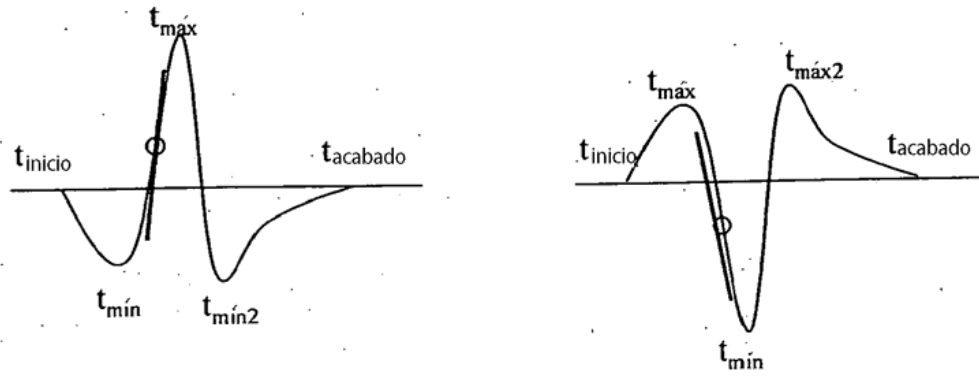


FIG. 13

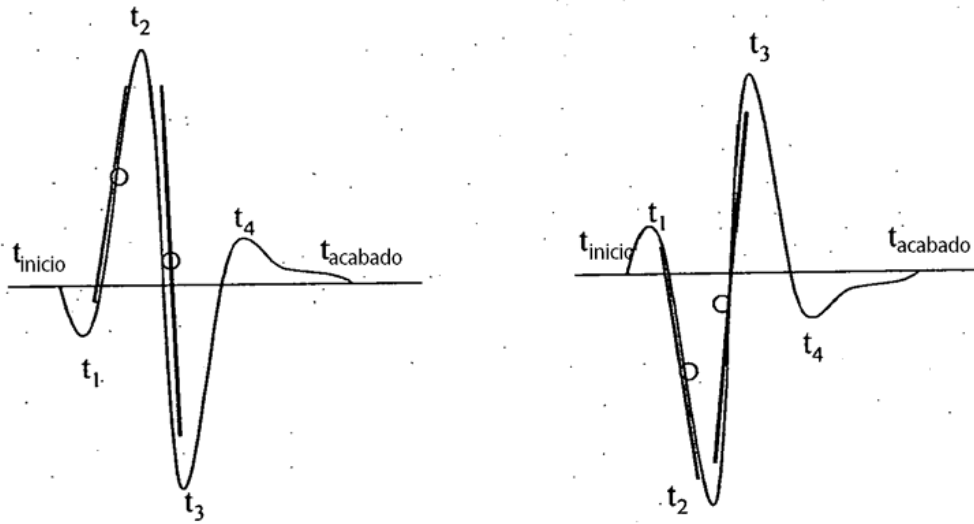


FIG. 14

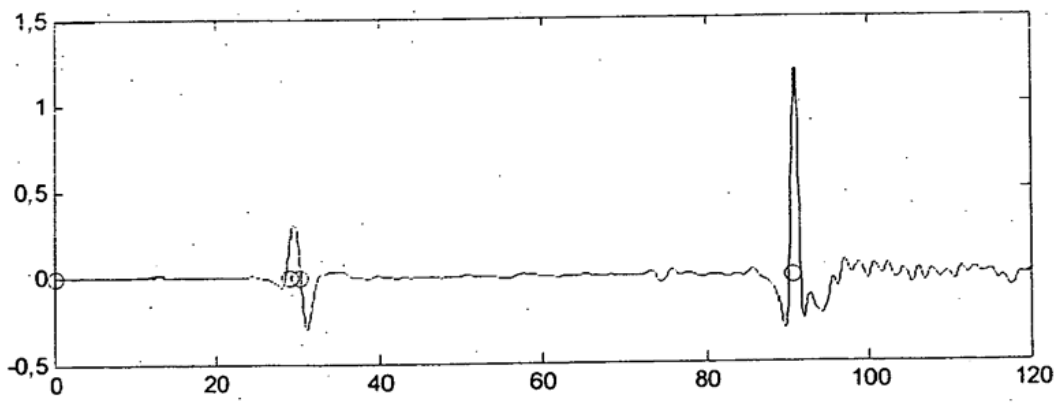


FIG. 15

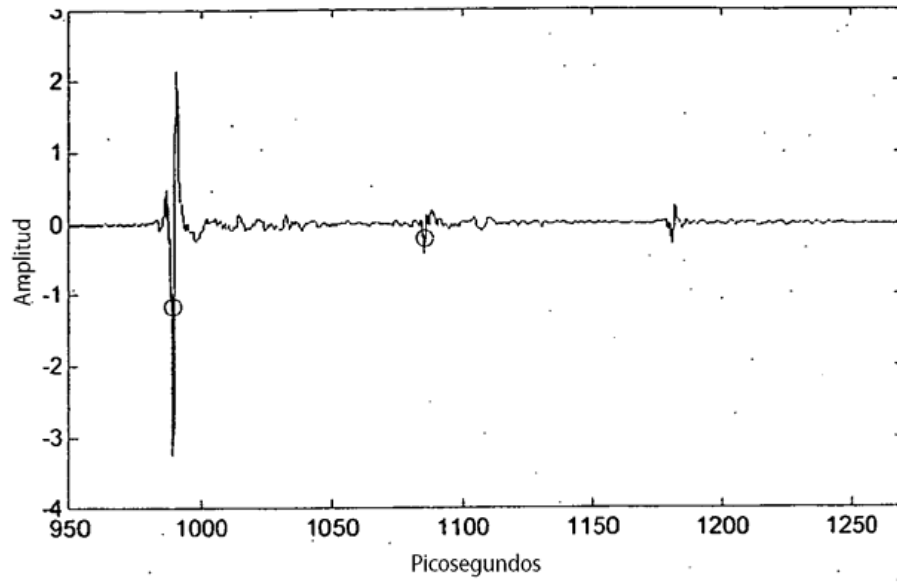


FIG. 16

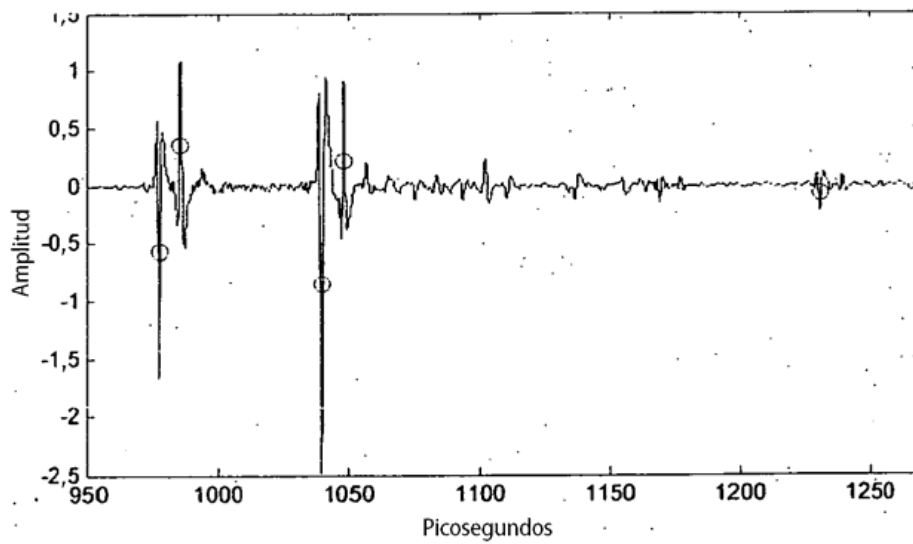


FIG. 17

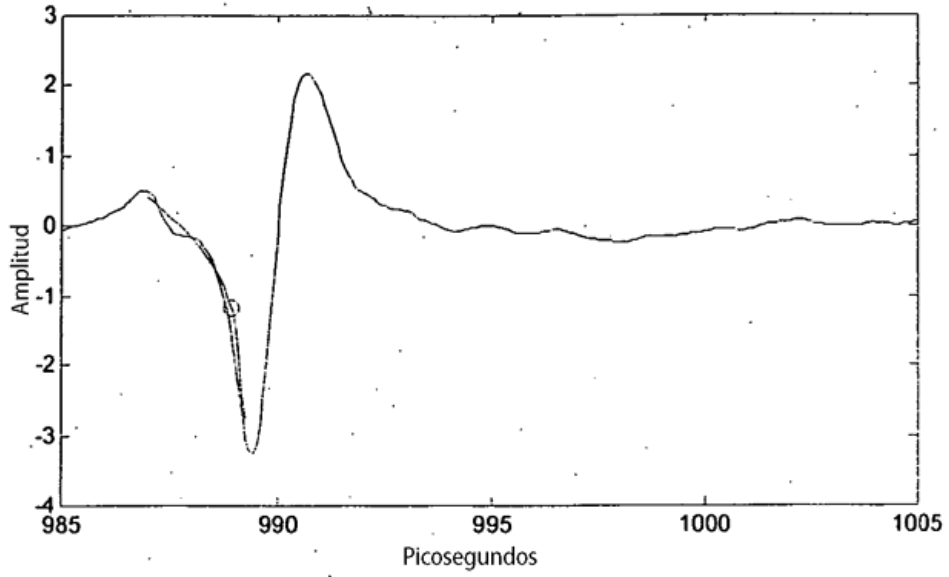


FIG. 18

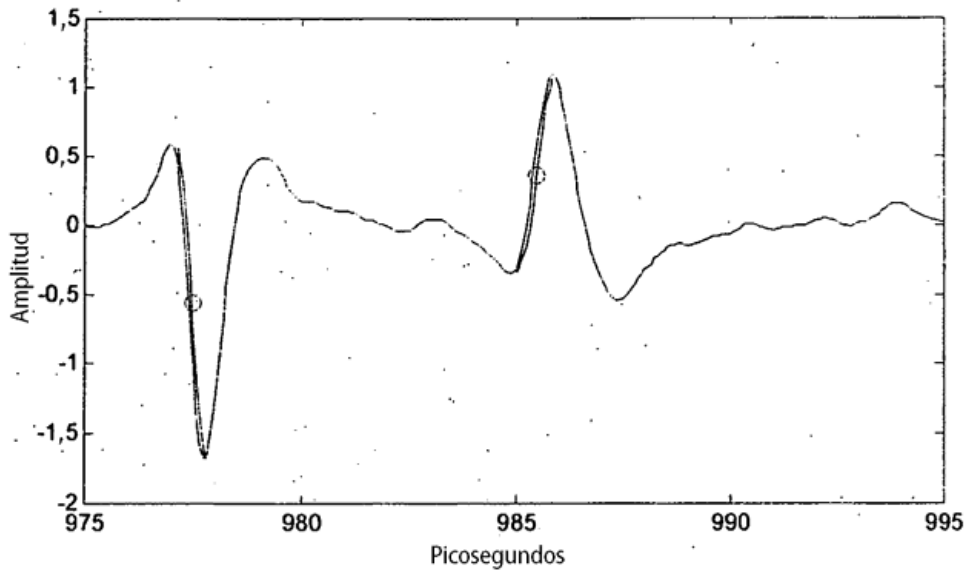


FIG. 19

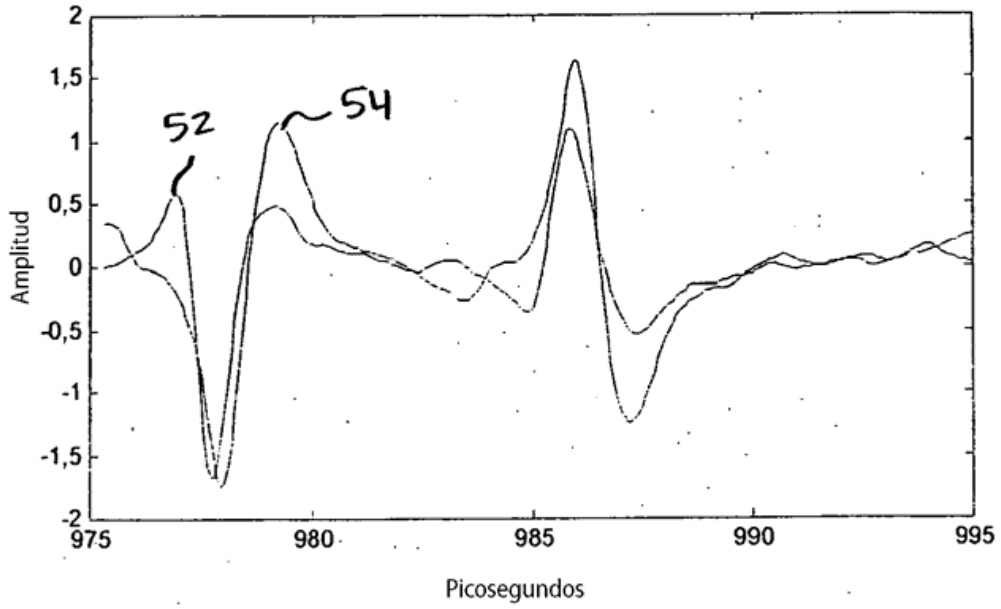


FIG. 20

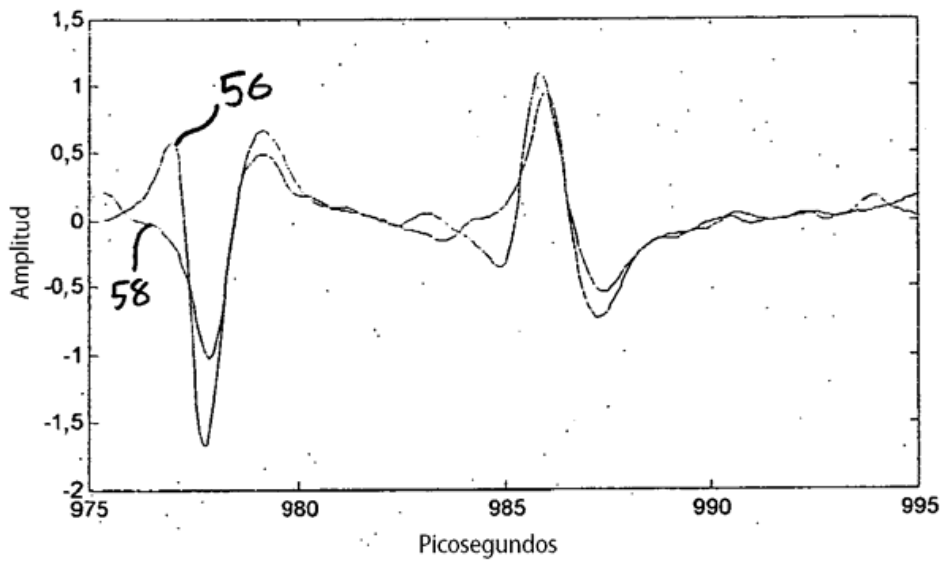


FIG. 21

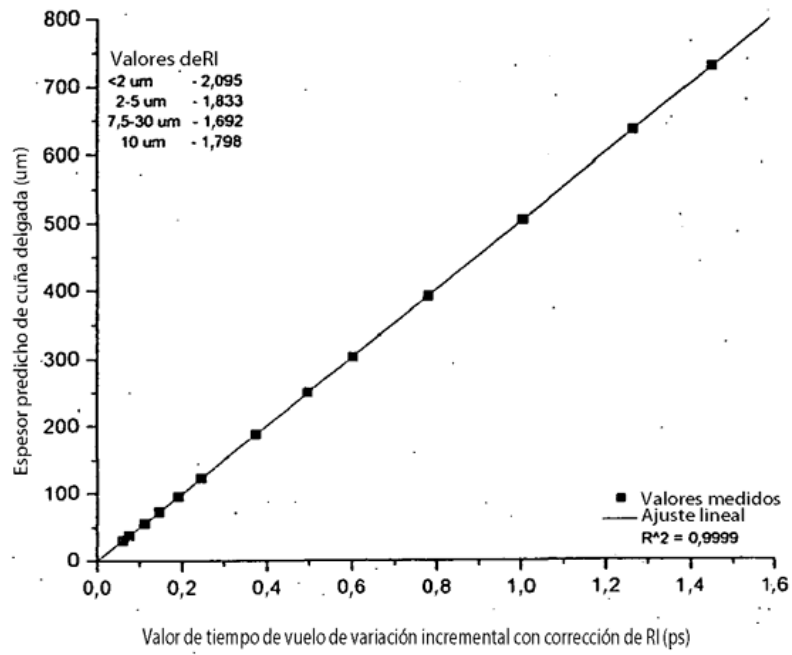


FIG. 22

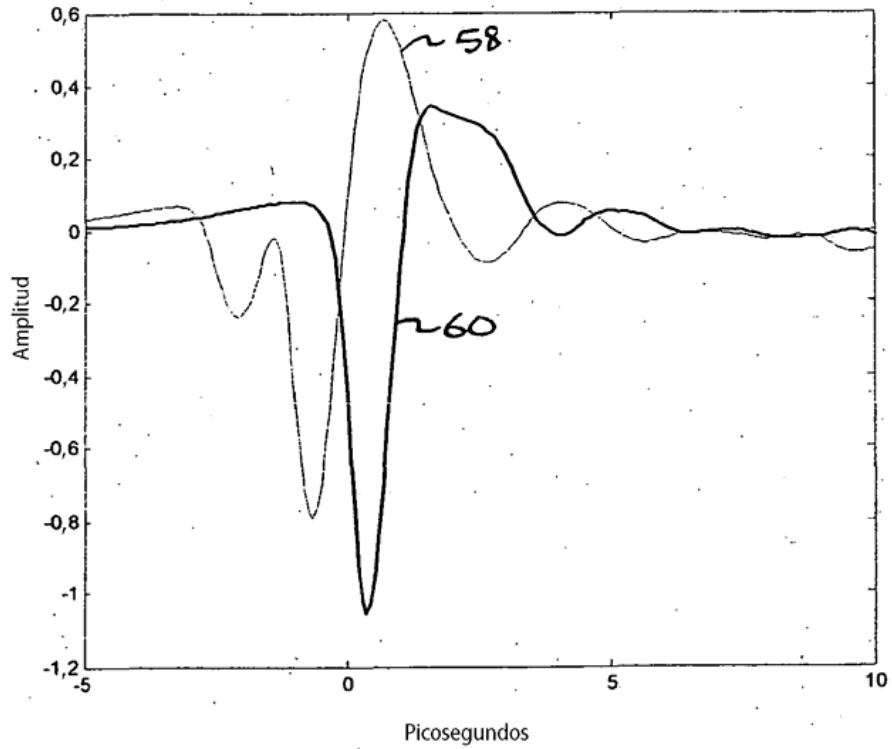


FIG. 23

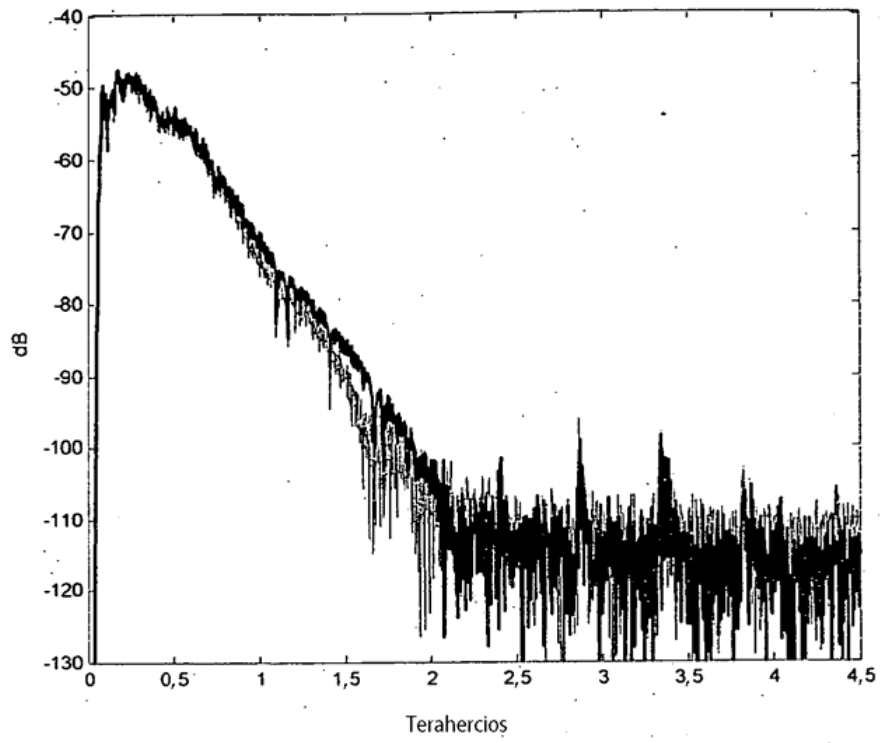


FIG. 24

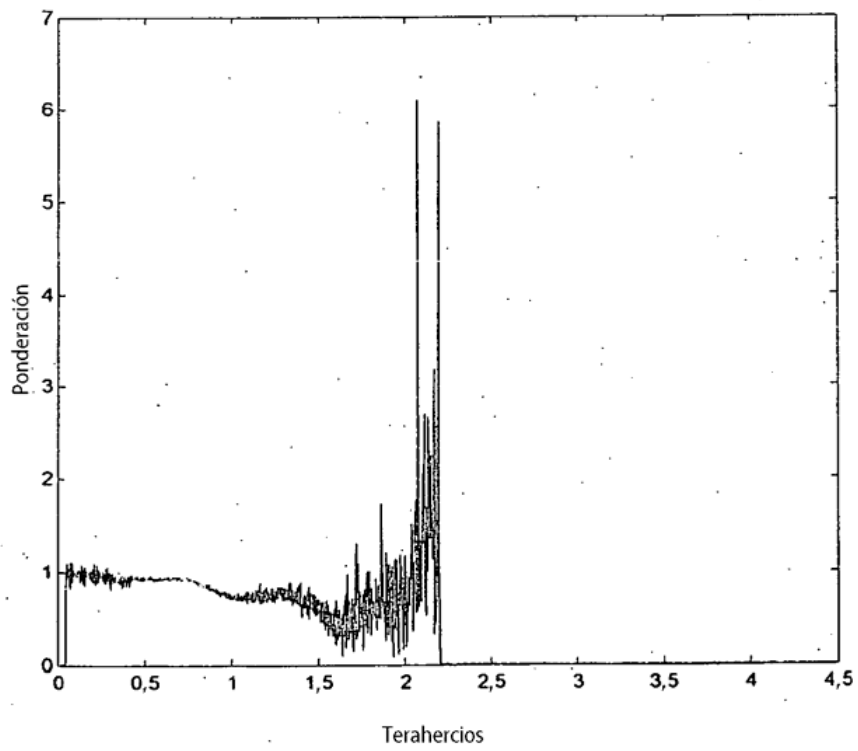


FIG. 25

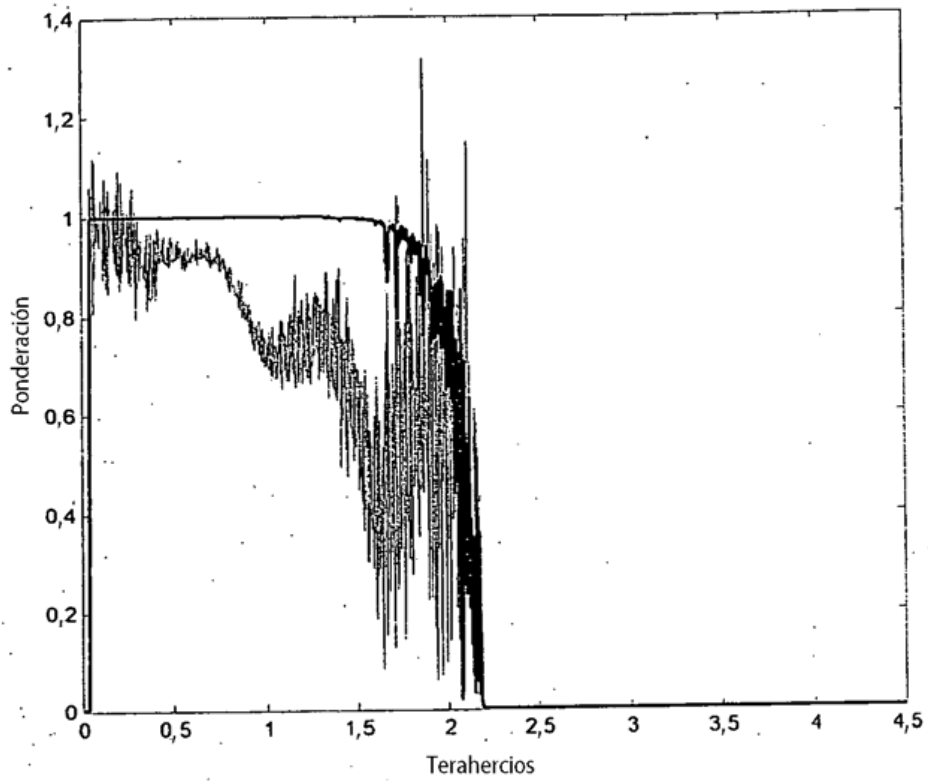


FIG. 26

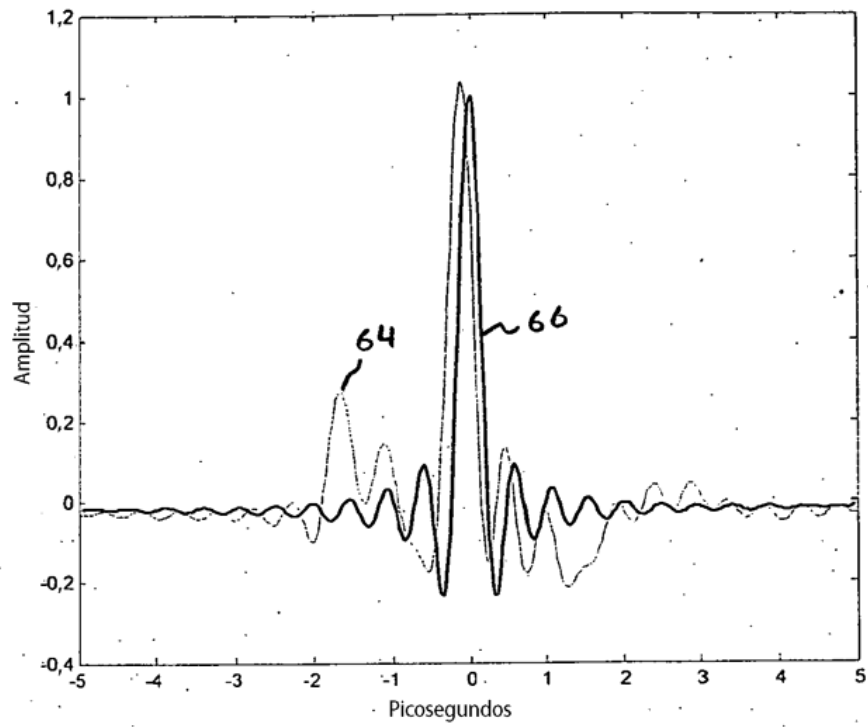


FIG. 27

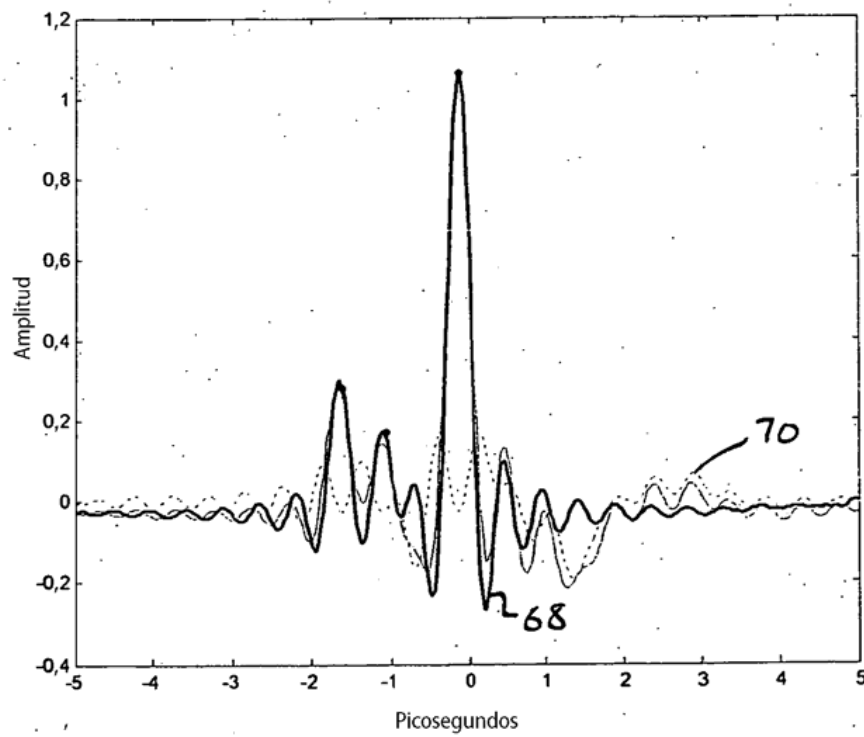


FIG. 28

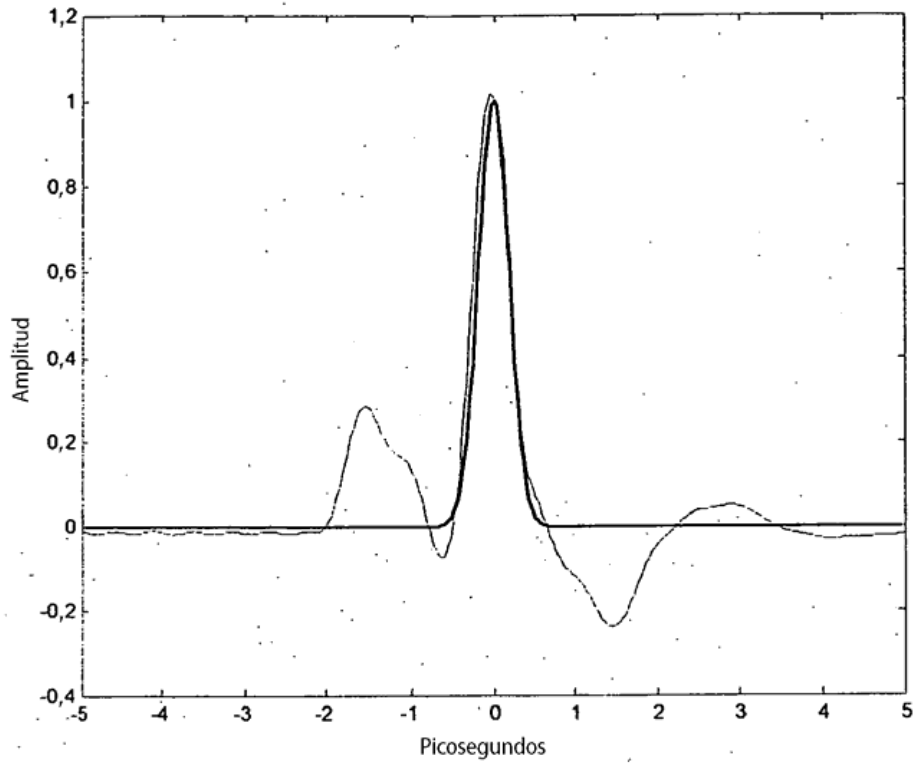


FIG. 29

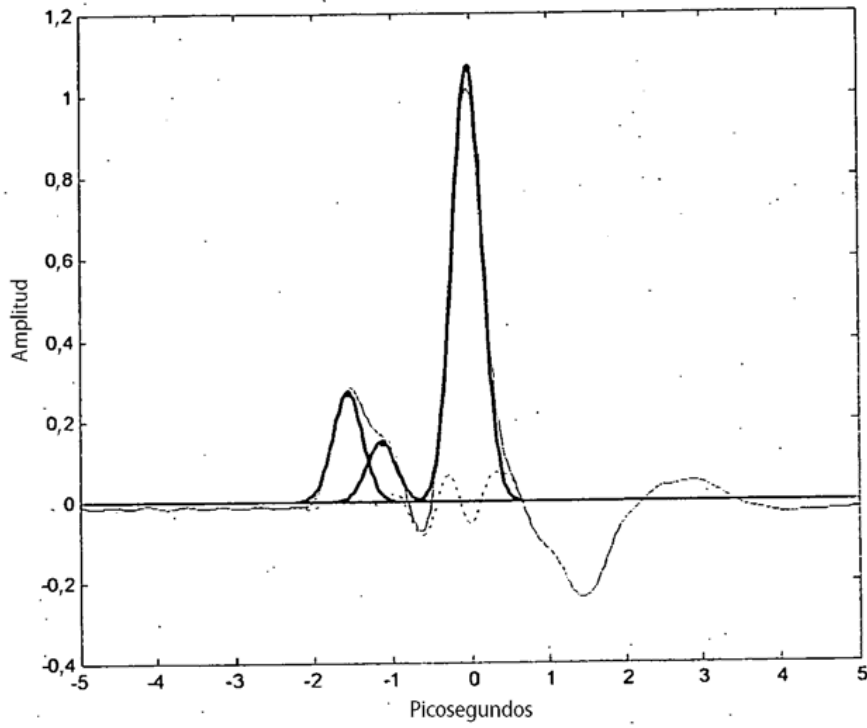


FIG. 30

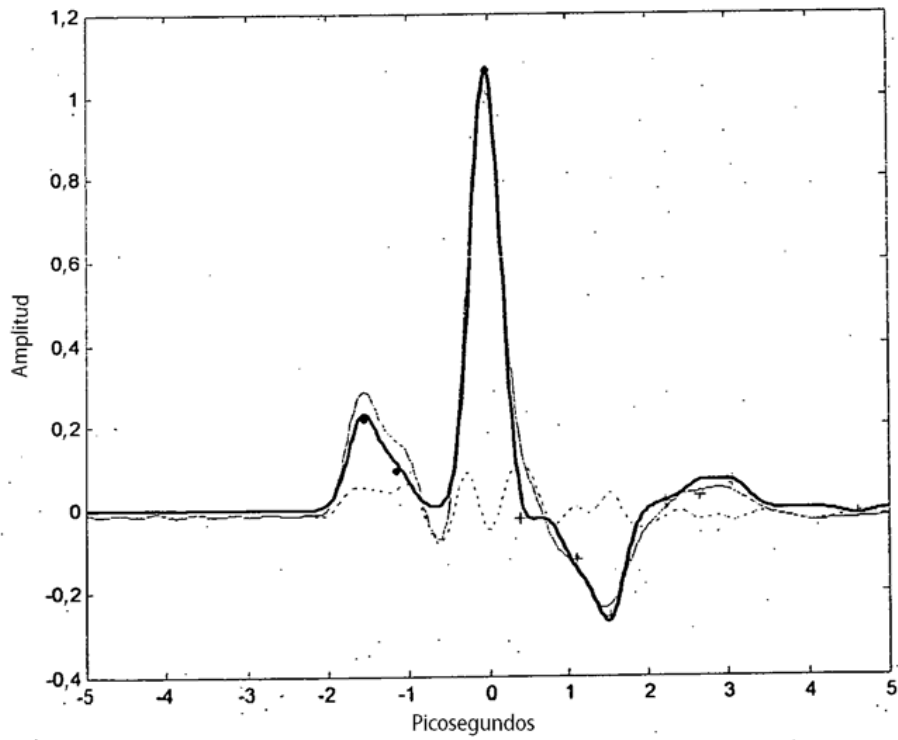


FIG. 31

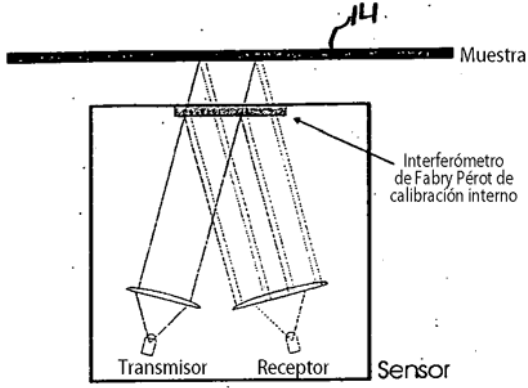


FIG. 32

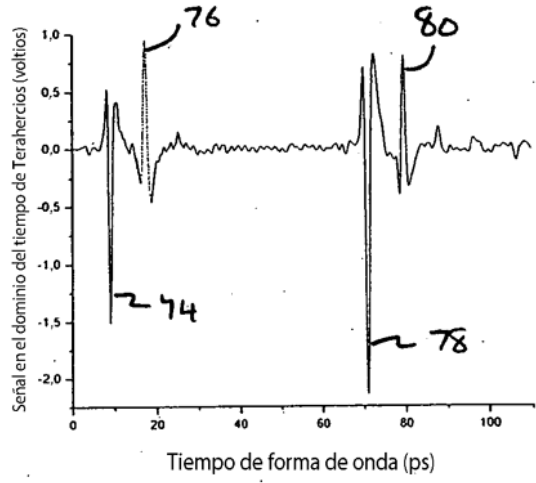


FIG. 33

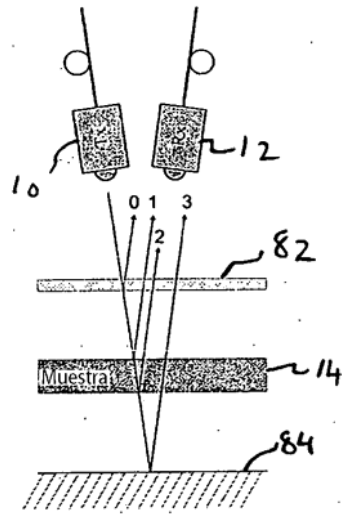
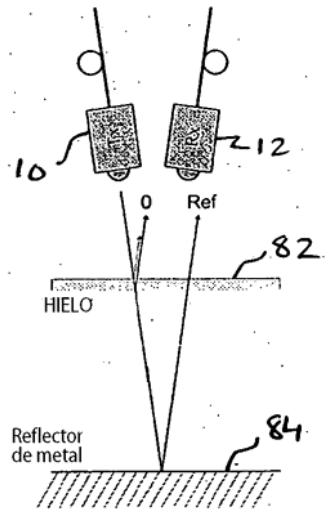


FIG. 34

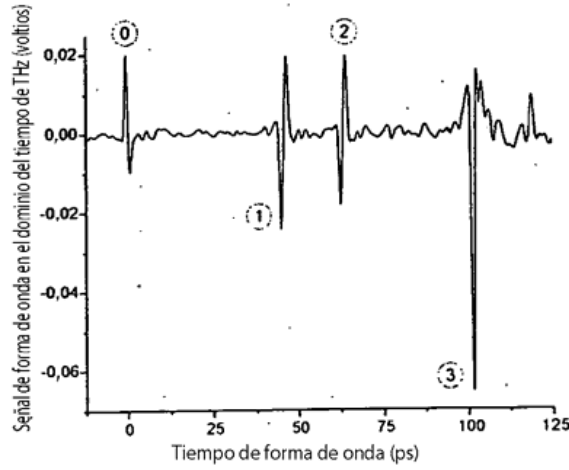


FIG. 35

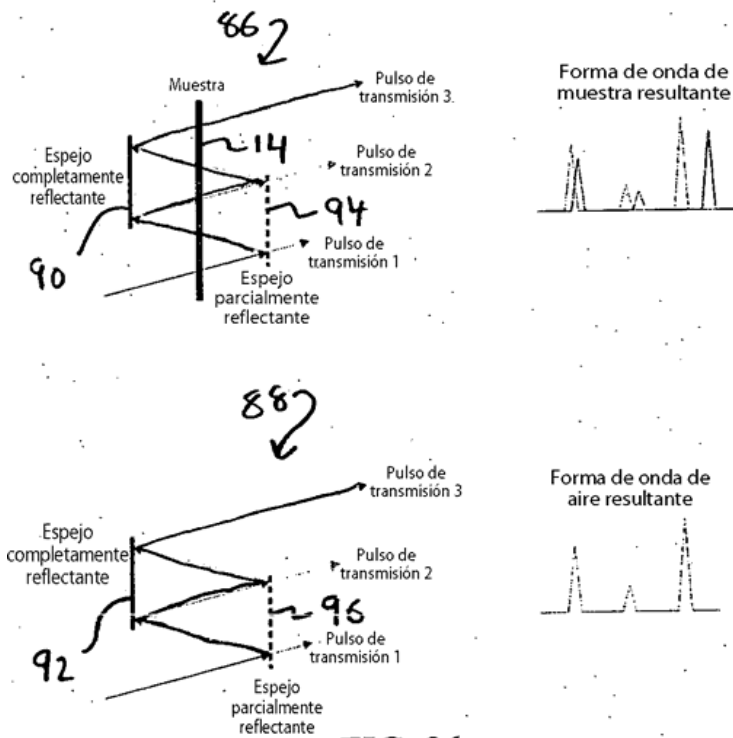


FIG. 36

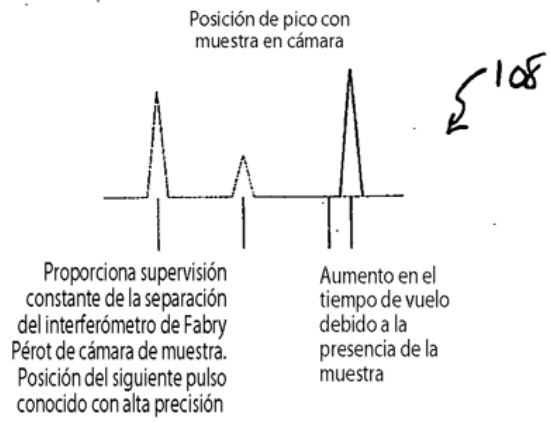
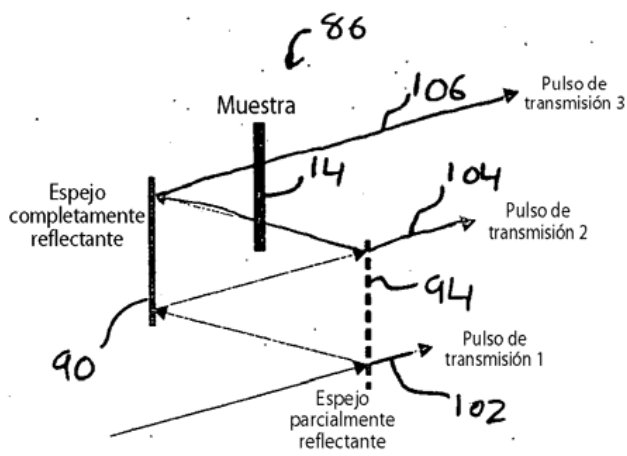


FIG. 37

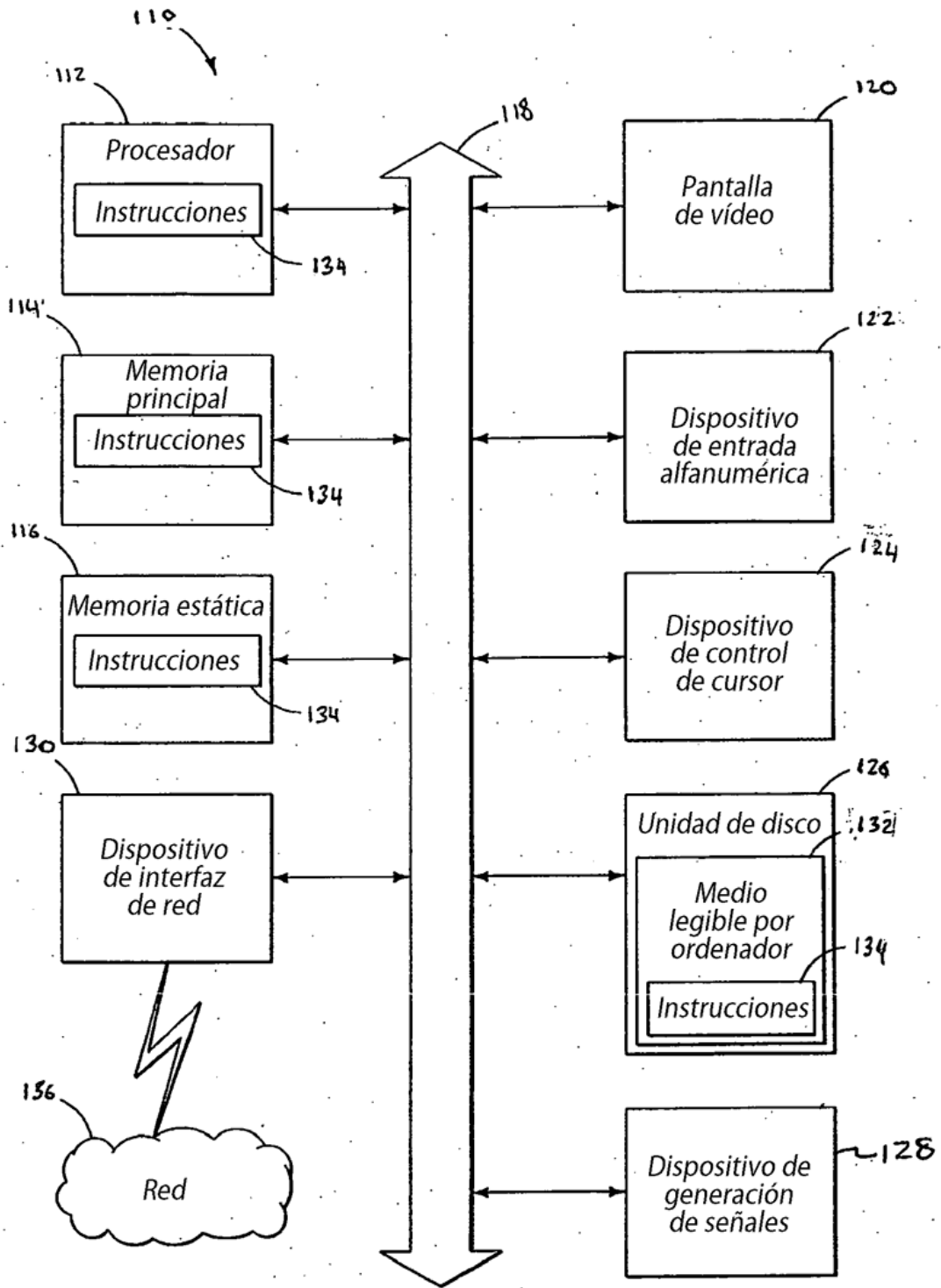


Fig. 38