

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 988 690**

51 Int. Cl.:

**G01N 21/17** (2006.01)  
**G01N 21/3559** (2014.01)  
**G01N 21/3581** (2014.01)  
**G01N 21/3586** (2014.01)  
**G01N 21/41** (2006.01)  
**G01N 21/86** (2006.01)  
**G01B 11/06** (2006.01)  
**G01N 21/21** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.11.2014** **PCT/US2014/065677**  
87 Fecha y número de publicación internacional: **21.05.2015** **WO15073807**  
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.11.2014** **E 14861914 (1)**  
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.08.2024** **EP 3069120**

54 Título: **Sistema para determinar al menos una propiedad de una muestra de lámina dieléctrica mediante el uso de radiación de terahercios**

30 Prioridad:

**15.11.2013 US 201361904787 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**21.11.2024**

73 Titular/es:

**LUNA INNOVATIONS INCORPORATED (100.0%)**  
**301 1st Street SW, Suite 200**  
**Roanoke, VA 24011, US**

72 Inventor/es:

**ZIMDARS, DAVID;**  
**WHITE, JEFFREY S.;**  
**WILLIAMSON, STEVEN y**  
**DULING, IRL**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

ES 2 988 690 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 determinar al menos una propiedad de una muestra de lámina dieléctrica mediante el uso de radiación de terahercios

## Antecedentes

## 1. Campo técnico

Esta solicitud se refiere a sistemas para determinar las propiedades del material de un dieléctrico de lámina y más particularmente a sistemas para determinar las propiedades del material de un dieléctrico de lámina mediante el uso de radiación de terahercios el sistema que comprende: al menos un transmisor de terahercios configurado para emitir un pulso de radiación de terahercios al muestra de lámina dieléctrica; un receptor de terahercios configurado para recibir al menos una porción del pulso de radiación de terahercios de la muestra de lámina dieléctrica, en donde el receptor de terahercios se configura para emitir una forma de onda medida en base a la radiación de terahercios recibida por el receptor de terahercios; una unidad de control en comunicación con el receptor de terahercios y configurada para recibir la forma de onda medida desde el receptor de terahercios.

## 2. Información de Antecedentes

Los dieléctricos de lámina, tales como el papel pueden tener una o más propiedades de material que pueden necesitar determinarse durante la fabricación de los mismos. Por ejemplo, el papel es un material tipo lámina delgada compuesto típicamente de fibras comprimidas. El material se produce al prensar fibras húmedas juntas en una lámina de un grosor generalmente uniforme y luego secar el material. Las fibras generalmente son pulpa de celulosa hecha de madera, telas u otra materia vegetal. Pueden incorporarse aditivos tales como tiza, arcilla y dióxido de titanio. Los aditivos de "dimensionamiento" pueden incorporarse para modificar la absorbencia superficial de la tinta o el agua, por ejemplo, para evitar el "sangrado".

Los papeles se caracterizan por varios parámetros físicos. El grosor del papel se denomina "calibre". Un intervalo aproximado de grosores es de 70 micras (2,76 mils) a 180 micras (7,1 mils). Un micrón es 0,001 milímetros. Un mil es 0,001 pulgadas. El cartón y la cartulina pueden ser más gruesos. El papel también se caracteriza por su "peso base" que es una densidad relacionada con la masa por unidad de área, típicamente gramos / metro cuadrado. Un intervalo típico de papel de impresión es de 60 g a 120 g. El papel más pesado se considera cartulina. La masa por unidad de área también puede expresarse como el peso de una resma de 500 láminas de un tamaño estándar de papel. La densidad del papel (peso base/calibre) varía de aproximadamente 250 kg/m<sup>3</sup> a 1,500 kg/m<sup>3</sup>. El papel de impresión típico es de 800 kg/m<sup>3</sup>.

Las máquinas de fabricación de papel industriales producen una lámina continua de papel, conocida como la trama de papel, que comienza con pulpa húmeda y termina con el rodillo de papel terminado en seco. La primera etapa es depositar la suspensión de pulpa en la sección de formación. La sección de formación estableció la orientación de la acumulación de las fibras, llamada "formación". La sección de prensa exprime la trama de papel a través de rodillos más grandes para eliminar gran parte del agua. La sección de secado hace pasar la trama de papel a través de una serpentina de rodillos calentados. El contenido de agua se reduce a un intervalo de 2 % a 10 % (típicamente aproximadamente 6 %) en dependencia del tipo de papel. El porcentaje de contenido de agua se define como el peso de solo el agua adsorbida dividido por el peso total del agua y el papel. La sección del calandrado suaviza el papel seco al presionar la lámina con pesados rodillos de acero pulido.

Las máquinas de fabricación de papel se instrumentan típicamente con uno o más medidores, también denominados sensores, para medir una o más de las características típicas tales como el calibre, el peso base, la formación y el contenido de agua. Estos calibradores pueden colocarse después de la sección de calendario para medir las propiedades terminadas del papel; o antes en las secciones de formación, prensado y/o secado. Estas propiedades se usan tanto para caracterizar el papel como para proporcionar retroalimentación para ajustar la máquina de fabricación de papel para producir papel con las características deseadas.

La retroalimentación más rápida se logra cuando los medidores se montan en línea para medir directamente la trama de papel a medida que se mueve a través de la máquina. Idealmente, los calibradores de medición en línea no deben perturbar ni entrar en contacto con la trama de papel. Este requisito restringe la tecnología usada en los calibradores a la que no consume o altera la muestra durante el proceso de medición. Históricamente, el peso base se midió mediante calibradores de fuente radiológica, tales como calibradores beta, que miden la atenuación del flujo de radiación a través del papel. La formación puede medirse por sistemas de visión, tales como cámaras. El contenido de agua históricamente se midió por espectroscopia de infrarrojo cercano ("NIR"); o medido por microondas en una cavidad resonante. El calibre fue (y es) difícil de medir, aunque los calibres que emplean medidores, desplazamiento láser o análisis de aberración cromática tienen cierto éxito. Los calibradores en línea pueden usarse para el análisis de laboratorio fuera de línea de muestras de papel.

El ancho de la trama de las máquinas de fabricación de papel puede ser de varios metros de ancho. Sin embargo, la

mayoría de los medidores en línea miden más fácilmente solo un único punto o área pequeña de la trama de papel a la vez. Para realizar mediciones a lo largo de todo el ancho, los calibradores en línea se montan típicamente en una pasarela de control de movimiento suspendida por encima (y/o por debajo) del ancho de la trama. El pórtico de movimiento se programa para mover los calibradores lateralmente a través del ancho de la trama (llamada "dirección transversal" o CD) mientras que la trama de papel se mueve por debajo del pórtico a una velocidad constante (llamada "dirección de la máquina" o MD). A menudo se monta más de un calibre (sensor) en el mismo carro que atraviesa el pórtico. La estructura portante tiene típicamente un codificador de posición para determinar la ubicación del carro de medición sobre la trama de papel. Los calibradores en la pasarela entonces trazan esencialmente un patrón en zigzag sobre el papel.

Muchos tipos de sensores, más notablemente los manómetros, requieren que los componentes del manómetro, tales como el emisor y el detector, se monten por encima y por debajo de la trama. En este caso se usa una segundo pórtico y el movimiento del segundo carro de medición se sincroniza con el carro de pórtico primario. Ciertos tipos de calibradores deben moverse "fuera de la trama" ocasionalmente para su calibración o normalización, midiendo solo aire. Muchos medidores se aumentan por sensores de temperatura, presión de aire y humedad de aire que pueden usarse para corregir los parámetros medidos para el cambio en la calibración del medidor ya que estas condiciones ambientales pueden variar.

Históricamente, para medir múltiples parámetros de características de papel en la trama, el sistema de medición en línea requiere múltiples medidores, al menos uno de cada tipo correspondiente a cada parámetro. Por ejemplo, la medición del peso base y la medición del contenido de agua pueden requerir tanto un calibrador beta como un calibrador NIR

El documento EP 1 640 709 A1 describe un dispositivo de medición de forma de onda óptica y un procedimiento de medición. De conformidad con la enseñanza del documento EP 1 640 709 A1 se realiza una comparación entre la forma de onda del campo eléctrico de la luz de medición que no pasa a través de la muestra y la forma de onda del campo eléctrico de la medición que ha pasado a través de la muestra. El documento EP 1 640 709 A1 describe usar una primera forma de onda de luz medida y una segunda forma de onda de la luz medida que no pasó a través de la muestra.

#### Breve sumario

Un sistema para determinar al menos una propiedad de una muestra de lámina dieléctrica mediante el uso de radiación de terahercios incluye al menos un transmisor de terahercios configurado para emitir un pulso de radiación de terahercios a la muestra de lámina dieléctrica, un receptor de terahercios configurado para recibir al menos una porción del pulso de radiación de terahercios de la muestra de lámina dieléctrica, en donde el receptor de terahercios se configura para emitir una forma de onda medida en base a la radiación de terahercios recibida por el receptor de terahercios, y una unidad de control en comunicación con el receptor de terahercios y configurada para recibir la forma de onda medida del receptor de terahercios. La forma de onda medida puede ser una forma de onda del dominio del tiempo o una forma de onda del dominio de la frecuencia.

La unidad de control está configurada para elegir al menos una región de interés de la forma de onda medida, comparar la al menos una región de interés de la forma de onda medida con una forma de onda de modelo, variar al menos un parámetro de una forma de onda de modelo para minimizar la diferencia entre la forma de onda de modelo y la forma de onda medida, y determinar el al menos un parámetro de la forma de onda de modelo de manera que la forma de onda de modelo se ajuste mejor a la forma de onda medida. Al menos un parámetro de la forma de onda del modelo incluye el grosor de un modelo de lámina dieléctrica y el índice de refracción complejo de un modelo de lámina dieléctrica. El índice de refracción complejo del modelo dieléctrico de la lámina puede parametrizarse por el contenido de agua y/o el peso base.

La unidad de control puede configurarse además para determinar el grosor de la muestra de lámina dieléctrica por el grosor de la forma de onda del modelo para que coincida mejor con la forma de onda medida. Además, la unidad de control puede configurarse además para determinar el contenido de agua o el peso base de la muestra de lámina dieléctrica al variar el índice de refracción complejo para predecir un índice de refracción complejo de la muestra de lámina dieléctrica.

Otros objetos, características y ventajas de la invención serán fácilmente evidentes para los expertos en la técnica después de una revisión de la siguiente descripción, con referencia a las figuras y reivindicaciones que se añaden y forman parte de esta descripción.

#### Breve descripción de las figuras

La Figura 1A ilustra un diagrama de bloques de un sistema para determinar al menos una propiedad de una muestra de lámina dieléctrica mediante el uso de radiación de terahercios reflejada;

La Figura 1B ilustra un diagrama de bloques de un sistema para determinar al menos una propiedad de una muestra de lámina dieléctrica mediante el uso de radiación de terahercios transmitida;

La Figura 2 ilustra un diagrama de bloques de una unidad de control para un sistema para determinar al menos una propiedad de una muestra de lámina dieléctrica mediante el uso de radiación de terahercios;

La Figura 3 ilustra una vista detallada de una muestra que recibe radiación de terahercios; y

La Figura 4 ilustra una forma de onda generada a partir de la muestra de la Figura 3.

#### Descripción detallada de las figuras y las modalidades preferidas actualmente

Con referencia a la Figura 1A, se muestra un sistema 10a para determinar al menos una propiedad de una muestra de lámina dieléctrica 12a mediante el uso de radiación de terahercios. Como sus componentes principales, el sistema 10a incluye una fuente de control óptica 20a, al menos un transmisor de terahercios 22a, un receptor de terahercios 24a y un medio 26a y 28a para proporcionar señales ópticas emitidas por la fuente de control óptica 20a tanto al transmisor 22a como a un receptor 24a.

Los medios 26a y 28a para proporcionar la señal óptica son de manera que el receptor 24a se sincroniza con el transmisor 22a mediante señales ópticas emitidas por la fuente de control óptica 20a. En esta modalidad, los medios 26a y 28a son fibras ópticas de modo único. Sin embargo, los medios 26a y 28a pueden ser fibras multimodo o incluso una transmisión de espacio libre de las señales ópticas desde la fuente de control óptico 20a al transmisor 22a y/o al receptor 24a. El transmisor de terahercios 22a sirve como fuente de un impulso electromagnético que luego se propaga a través de un transporte óptico, tal como una serie de lentes, espejos, y ventanas que transmiten y/o reflejan desde una muestra bajo prueba para que se registre por el receptor de terahercios 24a. En ciertos casos, el transporte óptico puede configurarse para transportar tanto los pulsos de terahercios reflejados de la muestra como los pulsos de la muestra transmitida a dos receptores independientes o a un único receptor simultáneamente o en secuencia.

Generalmente, la fuente de control óptica 20a puede tomar una variedad de formas diferentes. En una de tales modalidades, la fuente de control óptica 20a incluye una fuente de láser 30a configurada para generar pulsos ópticos. Generalmente, la fuente de láser 30a produce pulsos de salida de femtosegundos. Acoplado ópticamente a la fuente de láser 30a está un compensador 32a. Los pulsos ópticos emitidos por la fuente láser 30a se proporcionan al compensador 32a que añade dispersión de signo opuesto a los pulsos ópticos para corregir el estiramiento de los pulsos ópticos a medida que viajan a través de los medios 26a y 28a cuando los medios 26a y 28a son fibras ópticas. En una transmisión de espacio libre de los pulsos ópticos al transmisor 22a y al receptor 24a, el compensador 32a es generalmente innecesario y puede omitirse. El compensador 32a y la fuente de láser 30a pueden acoplarse ópticamente entre sí por una fibra óptica o pueden acoplarse ópticamente entre sí de manera libre.

Una vez que se proporciona la cantidad adecuada de dispersión de signo opuesto a los pulsos ópticos por el compensador 32a, los pulsos ópticos se proporcionan a un divisor 34a. El divisor 34a divide los pulsos ópticos y los proporciona a una primera fibra óptica 26a y una segunda fibra óptica 28a. En esta modalidad, la primera fibra óptica 26a es una fibra de modo único en donde los pulsos divididos por el divisor 34a se proporcionan a la fibra óptica 26a. De manera similar, la segunda fibra óptica 28a también es una fibra óptica que recibe pulsos divididos desde el divisor 34a.

La fibra óptica 24a se acopla al transmisor 22a. De manera similar, la fibra óptica 26a se acopla ópticamente al receptor 24a. Cuando el receptor 22a recibe estos pulsos ópticos de la fibra óptica 26a, el receptor 22a emitirá al menos un pulso de radiación de terahercios 36a a una muestra de lámina dieléctrica 18a. Cuando el receptor 24a recibe pulsos ópticos de la fibra óptica 28a, el receptor 24a recibirá al menos una porción del pulso de radiación de terahercios 38a emitido desde el transmisor 22a y reflejado de la muestra de lámina dieléctrica 18a. Debido a esto, el tiempo es importante de manera que el receptor 24a se sincroniza con el transmisor 22a mediante los pulsos ópticos que viajan por la fibra óptica 26a y la fibra óptica 28a.

El transmisor 22a puede generar los pulsos de terahercios a través de la acción de un interruptor semiconductor fotoconductor polarizado, cristal electroóptico, o algún otro medio (por ejemplo, mezcla de cuatro ondas, síntesis de Fourier). Un interruptor semiconductor fotoconductor o un transmisor de cristal electroóptico se acciona típicamente por una fuente de láser óptica o de infrarrojo cercano (o subpicosegundo). Un dispositivo de emisión de interruptor semiconductor fotoconductor crea una corriente real en una región con sesgo de voltaje del semiconductor que fluye a medida que el pulso láser se absorbe y crea portadores en la banda de conducción del semiconductor. El material semiconductor del interruptor semiconductor fotoconductor se elige generalmente para tener una vida útil del portador (sub-)picosegundo. De esta manera, la corriente se eleva y se desvanece en una respuesta de impulso que sigue la envoltura del pulso láser. Los dispositivos transmisores de interruptor semiconductor fotoconductor típicamente tienen una antena plana metálica fabricada sobre el semiconductor; la antena sirve tanto para mejorar la emisión del pulso de terahercios como para proporcionar una polarización a la región de absorción. La antena es resonante de terahercios típicamente dipolos, pajarita, o similar, con la "alimentación" siendo un pequeño espacio entre las dos mitades donde la luz láser se absorbe en el semiconductor que conecta ambos lados de la antena. En ciertos casos, no se usan las antenas tradicionales y el pulso se emite solo a partir de la aceleración de los portadores en el semiconductor polarizado ("dipolo de Hercio"). Los materiales semiconductores típicos de interruptores semiconductores fotoconductores incluyen arsenuro de galio cultivado a baja temperatura (LT-GaAs) y

silicio dañado por radiación sobre zafiro adecuado para fuentes láser de  $<850$  nm; y arsenuro de indio galio cultivado a baja temperatura (LT-InGaAs) adecuado para fuentes láser de  $<1.060$  nm y/o  $<1.550$  nm. Los pulsos de láser ultrarrápidos pueden tener una frecuencia mayor que la energía de la banda prohibida. Los semiconductores pueden estar dopados para modificar su tiempo de vida y/o brecha de banda. Los dispositivos transmisores de cristal electroóptico se accionan de manera similar por pulsos láser ultrarrápidos; sin embargo, la emisión se debe típicamente a la rectificación óptica no lineal del pulso láser en el cristal. Los cristales típicos son telururo de zinc, fosfuro de galio, DAST y otros.

Adicionalmente, el sistema 10a puede incluir además una estructura de referencia externa 40. La estructura de referencia externa 40 puede ser completamente reflectante, tal como un espejo. En esta situación, la radiación 38A se refleja por cada capa de la muestra de lámina dieléctrica 18A, pero también por la estructura de referencia externa 40. Además, el sistema 10a puede incluir también sensores adicionales 44a. Estos sensores adicionales 44a pueden incluir un sensor de infrarrojo cercano, un sensor de corriente parásita, un sensor magnético, un sensor de espectroscopia visible, calibradores, un sensor de espectroscopia de resonancia magnética nuclear, o un sensor de espectroscopia de Raman.

Una vez que la radiación 38a se recibe por el receptor 24a, el receptor 24a genera una señal eléctrica que puede interpretarse, escalarse y/o digitalizarse por una unidad de control 42a. La unidad de control 42a se acopla generalmente de manera eléctrica al receptor 24a para recibir las señales eléctricas desde el receptor 24a.

Con referencia a la Figura 2, en su forma más simple, la unidad de control 42 puede incluir un procesador 46 en comunicación con un dispositivo de memoria 48. El procesador 46 puede ser un único procesador o puede ser múltiple procesadores que trabajan en conjunto para realizar tareas. El dispositivo de memoria 48 puede ser cualquiera de una serie de diferentes dispositivos capaces de almacenar información digital. Por ejemplo, el dispositivo de memoria 48 puede ser un dispositivo magnético, tal como un disco duro, y un dispositivo óptico, tal como un lector de disco óptico, o un dispositivo de estado sólido, tal como una memoria flash. El dispositivo de memoria 48 puede almacenar las formas de onda transmitidas desde el receptor 24. El dispositivo de memoria 48 también puede incluir instrucciones para configurar el procesador 46 para analizar adecuadamente cualquier forma de onda recibida como se describirá más adelante en esta solicitud.

La unidad de control 42 también puede incluir un dispositivo de entrada 50 en comunicación con el procesador 46 para recibir la entrada. El dispositivo de entrada 50 puede ser un teclado, un ratón, o incluso un dispositivo de almacenamiento externo. La unidad de control 42 también puede incluir un dispositivo de salida 52 en comunicación con el procesador 46. El dispositivo de salida 52 puede ser un dispositivo de almacenamiento externo o también podría ser un dispositivo de visualización.

Además, la unidad de control 42 tiene un puerto 54 en comunicación con el procesador 46. El puerto 54 puede ser cualquiera de una serie de puertos electrónicos diferentes, tales como un puerto Ethernet, un puerto USB universal o cualquier puerto capaz de transmitir y recibir información electrónica. El puerto 54 puede estar en comunicación con el transmisor 22, el receptor 24, o incluso el sensor adicional 44.

Con referencia de nuevo a la Figura 1A, en esta modalidad, la radiación 36a se refleja de la muestra de lámina dieléctrica 18a y se envía como esta como radiación 38a al receptor 24a. Sin embargo, debe entenderse que los sistemas y procedimientos descritos en esta solicitud son igualmente aplicables a la radiación transmitida. Además, con referencia a la Figura 1B, se describe un sistema 10b que es similar al sistema 10a de la Figura 1A. Los números de referencia similares se han usado para denotar componentes similares, con la única diferencia de que los números de referencia tienen la letra "b" después de ellos en la Figura 1B en lugar de una "a" después de ellos en la Figura 1A. El sistema 10b muestra el transmisor 22b enviando radiación 36b a través de la muestra 18b. Esta radiación se transmite a través de la muestra 18b y se envía al receptor 24b como radiación 38b. Adicionalmente, debe entenderse que un sistema puede incorporar el uso tanto de la radiación transmitida como de la reflejada en un único sistema.

Generalmente, la radiación 36a y 36b emitida por los transmisores 22a y 22b es radiación de terahercios que tiene un impulso electromagnético casi de un solo ciclo con componentes de Fourier en el dominio de tiempo típicamente en el intervalo de 0,050 terahercios a 3 terahercios. Usualmente, el transmisor 22a emite los pulsos de terahercios en una corriente secuencial con una frecuencia de repetición entre 50 MHz y 3 GHz, aunque son posibles tasas de repetición más bajas y más altas. Generalmente, la radiación de terahercios utilizada será radiación de terahercios en el dominio del tiempo. Sin embargo, pueden usarse estos otros tipos de fuentes de ancho de banda que incluyen fuentes de ancho de banda de onda continua y discreta.

Las muestras 18a y 18b son idénticas, por lo tanto, solo se describirá la muestra 18a; sin embargo, la misma descripción se aplica a la muestra 18b. La muestra 18a tiene una primera capa 12a, una segunda capa 14a, y una tercera capa 16a. También es importante señalar que la muestra 18a puede tener cualquiera de una serie de capas diferentes o puede fabricarse simplemente a partir de una única capa. Una función del sistema 10a es muestrear el campo eléctrico variable en el tiempo como una función del tiempo que incide en el receptor 24a a medida que se genera por el transmisor 22a, se propaga a través del transporte óptico, y pasa a través de y/o se refleja de la

muestra 18a bajo prueba. La grabación muestreada variable en el tiempo del campo eléctrico en el receptor 24a se denomina generalmente "forma de onda". La obtención de muestras de la forma de onda se logra más fácilmente al dividir ópticamente la fuente de láser ultrarrápido en dos trayectorias. La primera trayectoria 26a va al transmisor 22a y la segunda trayectoria 28a va al receptor 24a. El tiempo de vuelo entre las dos trayectorias se cambia sistemáticamente por una línea de retardo óptica variable, la línea de retardo puede insertarse en la primera trayectoria 26a, la segunda trayectoria 28a, o ambas). La cantidad de retraso variable se denomina "ventana de forma de onda". El receptor 24a es de manera que solo mide el campo eléctrico del pulso de terahercios de manera sincrónica con el pulso de excitación de láser ultrarrápido. La medición de la forma de onda es esencialmente equivalente a una integración de puerta variable en el tiempo del campo eléctrico. El retardo óptico variable en el tiempo puede lograrse mediante el movimiento óptico-mecánico lineal o rotatorio de espejos y/o prismas; estiramiento de fibras; variación de la tasa de repetición del láser y longitudes de camino óptico esencialmente desiguales; o asíncronamente mediante el uso de dos láseres cuya tasa de repetición es casi la misma pero cuya fase puede medirse y/o controlarse.

Al igual que el transmisor 22a, el receptor 24a puede ser un semiconductor de interruptor fotoconductores o cristales electroópticos. Para un receptor de interruptor semiconductor fotoconductor 24a, el dispositivo a menudo es microfabricado con una antena similar a la del transmisor 22a. Sin embargo, en lugar de ejercer presión sobre la antena del transmisor, se conecta un amplificador de voltaje o corriente a la antena; y la corriente o voltaje de salida es proporcional a la magnitud (y signo) del campo eléctrico del pulso de terahercio coincidente en el tiempo con el pulso láser ultrarrápido de muestreo del receptor. Un material de interruptor semiconductor fotoconductor receptor idealmente tendrá una vida útil del portador de (sub)picosegundo. Además de una vida útil (sub)picosegundo; el material semiconductor tiene idealmente una resistividad muy alta de manera que la corriente oscura es muy baja, como un receptor de interruptor semiconductor fotoconductor, y el receptor de cristal electroóptico también se muestrea por el pulso láser ultrarrápido. Sin embargo, en lugar de que la corriente o el voltaje se detecten directamente en el cristal electroóptico, el cristal sirve para cambiar el estado de polarización del pulso láser ultrarrápido que viaja de manera coincidente a través del cristal electroóptico con el pulso de terahercio. El pulso láser ultrarrápido se analiza mediante un polarizador seguido de un (o varios) fotodetector(es). El polarizador puede configurarse para anular la transmisión de láser ultrarrápido en ausencia de un pulso de terahercio; sin embargo, con mayor frecuencia el polarizador se configura para equilibrar la señal de dos fotodetectores que miden las polarizaciones ortogonales; y la diferencia de señal entre los fotodetectores es proporcional al campo terahercio muestreado.

Más rigurosamente, la propagación del pulso de terahercios a través del transporte óptico experimental desde el transmisor 22a hasta el receptor 24a puede modelarse mediante Óptica de Fourier mediante la descomposición en una superposición de ondas planas polarizadas con vectores de onda espaciales  $k$  y componentes de frecuencia  $\omega$ . Cada uno de los componentes secuenciales del transporte óptico contribuye a la Función de Transferencia al alterar cada componente de Fourier original y servir como nuevo punto de emisión para una o más ondas planas en ciertos puntos a lo largo de la trayectoria de la onda (el principio de Huygen-Fresnel apropiado para ondas planas, ondas esféricas, wavelets, etc.). Cada componente se suma en el receptor 24a (interfiriendo en el área activa del receptor) y luego se transfiere de regreso en el espacio (para calcular el solapamiento dependiente de la frecuencia del área activa) y en el tiempo (para calcular el campo eléctrico variable en el tiempo esperado registrado como una forma de onda en el receptor 24a).

Típicamente, la emisión del transmisor 22a es muy cercana a la Gaussiana, y se cumple la aproximación paraxial. Debe tenerse en cuenta que, debido al amplio intervalo de la frecuencia del pulso de terahercios, los efectos de difracción a frecuencias más bajas pueden ser mucho más sustanciales que a altas frecuencias. La propagación a través de las aberturas puede actuar como un filtro de paso alto para los pulsos de terahercios. Igualmente, los pulsos de terahercios enfocados en el receptor 24a pueden alinearse para que coincidan con el modo decentemente a bajas frecuencias por lo pobremente a altas frecuencias, lo que actúa como un filtro de paso bajo. Usualmente, el transporte óptico de terahercios es configurado para obtener una imagen confocal del transmisor 22a en el receptor 24a con aumento unitario; y el diámetro de la óptica se elige lo suficientemente grande como para no dar como resultado ninguna pérdida sustancial de energía en la frecuencia más baja de interés (a menudo se aproxima por  $\pi$  por el radio del haz gaussiano). Siempre que durante el proceso de medición los efectos de filtrado espacial dependientes de la frecuencia no cambien, una forma de onda de reflexión y/o transmisión de referencia puede usarse para normalizar (en el dominio de la frecuencia) o deconvolucionar (en el dominio del tiempo) la forma de onda medida de la muestra sin la necesidad de modelar o corregir la mayoría de los posibles efectos espaciales sobre la amplitud o fase del haz de terahercios que se transmite o refleja a través de cada capa de la muestra. En algunos casos, si el haz de terahercios experimenta un cambio de fase debido al enfoque en la región donde se localiza la muestra de lámina (desplazamiento de fase de Guoy) puede ser necesario tener en cuenta este cambio de fase en el modelo de propagación.

Mientras que la descripción del procedimiento de medición a continuación a menudo se refiere a una lámina delgada de una sola capa medida como "papel" como un ejemplo heurístico, debe entenderse que el mismo análisis puede aplicarse para determinar los mismos parámetros físicos de cualquier muestra de lámina dieléctrica 18a. Como se indicó anteriormente, el material tipo lámina puede tener una o más capas, y estar compuesto por una o más sustancias por capa.

Con referencia a la Figura 3, la Figura 3 ilustra la muestra 18a y la estructura de referencia externa 40. Aquí, la radiación 36a proporcionada por el transmisor 22a se dirige hacia la muestra 18a. La muestra 18a refleja porciones de la radiación 36a. Además, parte de la radiación 36a pasa a través de la muestra 18a y luego se refleja por la estructura de referencia externa 40. La radiación reflejada 38a se proporciona al receptor 24a.

Con referencia a la Figura 4, el receptor 24A proporciona una forma de onda 50 a la unidad de control 42. La forma de onda 50 puede dividirse generalmente en tres regiones separadas 52, 54 y 56. Cada región 52, 54, y 56 puede representar diferentes porciones de radiación reflejada de la muestra 18A. Por ejemplo, la primera región 52 puede representar porciones de radiación reflejada de la superficie superior de la muestra 18A, la segunda región 54 puede representar porciones de radiación reflejada de la superficie inferior de la muestra 18A, y la tercera región 56 puede representar porciones de la radiación reflejada de un reflector trasero 40. Además, debe entenderse que cada región 52, 54, y 56 puede solapar incluir radiación de otras regiones. Por ejemplo, la región 54 puede incluir algo de radiación de la superficie de la muestra 18A, mientras que la región 56 puede incluir algo de radiación reflejada de la superficie inferior de la muestra 18A.

Como se indicó anteriormente, la unidad de control 44A está en comunicación con el receptor de terahercios 24a y se configura para recibir la forma de onda medida 50 desde el receptor de terahercios 24a. La unidad de control 42 se configura para elegir al menos una región 52, 54, y/o 56 de interés de la forma de onda medida 56. La unidad de control 42 luego compara la al menos una región de interés 52, 54, y/o 56 de la forma de onda medida 50 con una forma de onda del modelo. Posteriormente, la unidad de control 42 varía entonces al menos un parámetro de una forma de onda del modelo para minimizar la diferencia entre la forma de onda del modelo y la forma de onda medida 50, y determina el al menos un parámetro de la forma de onda del modelo de manera que la forma de onda del modelo se ajuste mejor a la forma de onda medida 50. La unidad de control 42 puede determinar una mejor coincidencia de la forma de onda medida al minimizar la suma de los cuadrados de la diferencia entre la forma de onda del modelo y la forma de onda medida 50.

El al menos un parámetro de la forma de onda del modelo incluye al menos uno de los siguientes: grosor de un modelo de lámina dieléctrica, índice de refracción complejo de un modelo de lámina dieléctrica y/o una longitud de cualquier capa de la muestra de lámina dieléctrica 18a y dimensiones y constantes ópticas de cualquier elemento óptico. La unidad de control 42 también puede configurarse para determinar el grosor de la muestra de lámina dieléctrica 18a por el grosor de la forma de onda del modelo para que coincida mejor con la forma de onda medida 50. La forma de onda del modelo se deriva de una forma de onda de referencia registrada cuando la muestra de lámina dieléctrica 18a no está presente.

El índice de refracción complejo del modelo dieléctrico de la lámina es un índice de refracción complejo de la forma de onda del modelo que se parametriza por el contenido de agua y/o el peso base. Como tal, el control 42 puede configurarse para determinar el contenido de agua o el peso base de la muestra de lámina dieléctrica al variar el índice de refracción complejo para predecir un índice de refracción complejo de la muestra de lámina dieléctrica y utilizar el índice de refracción complejo previsto para crear la forma de onda del modelo con parámetros adicionales. Los parámetros de adición pueden incluir una longitud de cualquier capa de la muestra de lámina dieléctrica 18a y dimensiones y constantes ópticas de cualquier elemento óptico.

La unidad de control 42 puede configurarse además para transformar la forma de onda del modelo mediante un modelo matemático en base a la física óptica de la propagación de la radiación de terahercios a través de al menos un elemento óptico conocido que se encuentra entre el al menos un transmisor de terahercios 22a y el receptor de terahercios 24a.

El receptor de terahercios 24a puede configurarse para medir la polarización del pulso de radiación de terahercios y/o el ángulo del haz del pulso de radiación de terahercios. A partir de ahí, la unidad de control 42 puede configurarse adicionalmente para determinar al menos un parámetro medido de la forma de onda medida al utilizar adicionalmente el polarizado del pulso de radiación de terahercios y/o el ángulo del haz del pulso de radiación de terahercios.

Además, la unidad de control 42 también puede configurarse para determinar al menos un parámetro medido de la forma de onda medida al utilizar adicionalmente una distancia de la muestra de lámina dieléctrica desde una lente de enfoque de terahercios y/o al utilizar adicionalmente una distancia de la muestra de lámina dieléctrica desde una lente de enfoque de terahercios y/o al utilizar adicionalmente una determinación de una relación empírica entre el índice de refracción complejo con el cambio de material.

El transmisor 22a tiene ópticas tales como espejos y lentes para dirigir los pulsos de terahercios desde el transmisor 22a, sobre y/o a través de la muestra 18a, y ópticas tales como espejos y lentes para recoger los pulsos de terahercios transmitidos y/o reflejados desde la muestra 18a a uno o más receptores 24a desde los cuales se miden las formas de onda 50 simultáneamente o en secuencia. El haz de pulso de terahercios 36a dirigido hacia la muestra 18a puede colimarse o enfocarse. Los haces colimados muestrean un área más grande, mientras que los haces enfocados muestrean un área más pequeña. Cuando se enfoca, la muestra 18a se encuentra generalmente en el foco del haz; generalmente dentro del intervalo de Rayleigh en comparación con el papel delgado, de manera que

en efecto el haz aún puede tratarse como cuasi-colimado a medida que pasa a través del papel delgado. Tanto para las configuraciones colimadas como enfocadas, las lentes (o parábolas descentradas u otros elementos de enfoque) se configurarán en una disposición "confocal" donde la emisión del transmisor 22a se proyecta sobre el receptor 24a con una magnificación 1:1. Esto coincide con el modo del transmisor 22a con el modo de detección del receptor 24a ideal y típicamente produce la mejor eficiencia de detección y típicamente da como resultado la respuesta de frecuencia más plana a medida que se minimiza el grado en el que el área activa del receptor 24a puede actuar como un filtro espacial dependiente de la frecuencia. El haz terahercio 36a puede dirigirse con incidencia normal o con algún ángulo de incidencia distinto de cero. Un sensor donde el receptor 24a se configura para recoger el haz terahercios reflejado 38a con incidencia normal se denomina típicamente una configuración "colineal" o "monostática". Un sensor donde el receptor 24a se configura para recoger el haz terahercios reflejado 38a en un ángulo no cero se denomina típicamente una configuración de "lanzamiento-recepción" o "biestática". Cuando se configura en reflexión, una disposición confocal de apertura numérica alta con el papel en el enfoque mejorará la tolerancia angular de la detección del haz reflejado si el papel parpadea en ángulo, en comparación con un haz colimado (una reflexión especular que ya no está centrada en la antena receptora 24a puede detectarse menos eficientemente, y la antena puede actuar como un filtro espacial dependiente de la frecuencia). Una configuración colineal es menos sensible al aleteo vertical del papel que desvía espacialmente el haz reflejado; mientras que una reflexión de captura por inclinación puede desviarse mal hacia el receptor 24a con aleteo vertical.

Un sensor colineal puede construirse a partir de módulos transmisores 22a y receptores 24A independientes mediante el uso de un combinador de haz de reflexión y transmisión parcial; o a través del uso de un combinador de haz de polarización. Los combinadores de haz introducen pérdida; y un sistema más eficiente o conveniente puede construirse a partir de un dispositivo transmisor combinado 22a y receptor 24A con la misma área activa efectiva (el combinador de haz ya no es necesario). Los sensores de lanzamiento y recepción requieren módulos transmisores independiente 22a y receptores 24A.

La forma de onda 50 debe ajustarse para abarcar toda la energía de pulso reflejada y/o transmitida desde y/o a través de la muestra 18a. Tenga en cuenta que la energía medida dentro de la ventana 50 es proporcional a la integración del cuadrado del campo eléctrico medido que comprende la forma de onda cruda. La ventana de forma de onda 50 debe ser lo suficientemente ancha de manera que si el papel cambia de grosor y/o aletea toda la energía del pulso de terahercios restante en la ventana 50.

Cuando el haz de pulso de terahercios 36a se dirige hacia la superficie de la muestra 18a, una porción del haz de pulso 38a se refleja desde cada interfaz plana (para una única capa de una lámina de papel homogénea, esta es la interfaz superior de aire-papel y la interfaz inferior de papel-aire); y una porción del haz de pulso se transmite más allá de cada interfaz, como se muestra en la Figura 4.

La polarización del haz terahercios puede controlarse en el transmisor 22a y/o analizarse en el receptor 24a. Esto puede hacerse al girar el eje del transmisor linealmente polarizado 22a y/o la antena del receptor 24a; y/o al colocar un polarizador después del transmisor 22a y un analizador antes del receptor 24a. La polarización se mide típicamente con respecto al plano de espejo del papel; donde la polarización paralela al plano de espejo se denomina "S" y la polarización en el plano de propagación (en ángulos rectos con respecto al plano de espejo) se denomina "P". Tenga en cuenta que para un ángulo de incidencia cero el sentido de la polarización es degenerado. Sin embargo, el papel puede tener una pequeña cantidad de birrefringencia o dispersión dependiente de la polarización de manera que el campo medido con un receptor cruzado polarizado 24a puede ser distinto de cero.

La cantidad de campo eléctrico 38a reflejado desde cada interfaz (como existe inmediatamente en esa interfaz) es una función de los coeficientes y ecuaciones de Fresnel del campo eléctrico. Los coeficientes de Fresnel son una función del ángulo incidente, el estado de polarización (con respecto a S y P en relación con la muestra 18a) y la constante dieléctrica compleja de frecuencia de la muestra 18a. El efecto dependiente de la frecuencia de la constante dieléctrica afecta tanto la amplitud (componente real) como la fase (componente imaginario); donde la amplitud se relaciona con el coeficiente de extinción dependiente de la frecuencia y la fase se relaciona con el índice de refracción dependiente de la frecuencia.

Cuando el haz se propaga a través de la interfaz (aire- muestra 18a o muestra 18a -aire), se refracta. A medida que pasa a través de la muestra 18a, cada uno de los componentes de frecuencia de Fourier cambiará en amplitud e intensidad a lo largo de la longitud de trayectoria integrada a través de la muestra 18a hasta que la forma de onda golpee la siguiente interfaz; donde luego se reflejará y transmitirá a través de las ecuaciones de los coeficientes de Fresnel nuevamente.

Tenga en cuenta que cada uno de los componentes de frecuencia de Fourier puede reflejar múltiples veces desde la muestra de aire 18a e interfaces de muestra 18a antes de salir de la muestra 18a, que se denominará "papel" inmediatamente más abajo. Los campos de cada uno de los componentes reflejados interferirán en principio. Los componentes de frecuencia de Fourier (complejos) de la forma de onda de TD-Terahercios recolectados en geometría de reflexión se ordenarán como 1-[R aire/papel]; 2-[T aire/papel->T grosor del papel t-> R papel/aire->T grosor del papel t-> T aire/papel]; 3-[T aire/papel->T grosor del papel t-> R papel/aire->T grosor del papel t-> R papel/aire->T grosor del papel t-> T aire/papel]; etc. Tenga en cuenta que la

reflexión 1 no tiene pases internos a través del papel; la reflexión 2 tiene 2 pases internos a través del papel; la reflexión 3 tiene 4 pases internas a través del papel; etc. En esta notación, "T" significa "transmite a través de" y "R" significa "refleja de." Igualmente, la secuencia de pulsos a través del papel es 1-[ T aire/papel->T grosor del papel t-> T papel/aire->]; 2-[ T aire/papel->T grosor del papel t-> R papel/aire->T grosor del papel t-> R papel/aire->T grosor del papel t->T papel/aire->]; etc. Tenga en cuenta que el pulso de transmisión 1 tiene 1 paso interno a través del papel; el pulso de transmisión 2 tiene 3 pasos internas a través del papel; etc.

La forma de onda reflejada o transmitida esperada puede modelarse mediante la transformación de Fourier de un pulso de referencia desde el transmisor 22a y la propagación de los componentes complejos a través de cada una de las secuencias de reflexiones y transmisiones al receptor 24a como se describió por la secuencia en el párrafo anterior. Los parámetros variables son el grosor de la muestra 18a, y la constante dieléctrica dependiente de la frecuencia (que incluye la pérdida de amplitud del coeficiente de extinción y el cambio de fase del índice de refracción), el ángulo de incidencia, y la polarización del transmisor 22a y el receptor 24a. Cada uno de los componentes de Fourier del dominio de frecuencia complejos calculados en este proceso puede añadirse y luego transformarse de nuevo al dominio del tiempo para predecir el campo eléctrico variable en el tiempo medido por el receptor 24a ya sea en transmisión, reflexión, o ambos.

Tenga en cuenta que en el dominio del tiempo una reflexión de un índice alto a uno bajo tendrá el signo opuesto con respecto a una reflexión de un índice bajo a uno alto. Esto puede ser útil para identificar las fuentes de un pulso en una secuencia si se conoce la diferencia del índice de refracción (que lo es en la interfaz aire-material). La reflexión de baja a alta se suele dar una señal positiva, aunque esto es arbitrario.

La geometría de la trayectoria óptica terahercios del sensor (ángulo de incidencia; polarización del transmisor 22a y el receptor 24a) puede considerarse constantes conocidas (particularmente si el papel no está alejando esencialmente). La forma de onda modelada (suma de todos los componentes de Fourier) puede ajustarse a las formas de onda de transmisión y/o reflexión reales (individual o simultáneamente) mediante una rutina de ajuste no lineal que minimiza el residuo (en el dominio del tiempo o la frecuencia) al variar el grosor y los parámetros de un modelo para el coeficiente de extinción dependiente de la frecuencia y el índice dependiente de la frecuencia del papel. Modelar la constante dieléctrica compleja reduce el número de parámetros libres y restringe el ajuste a una función determinada empíricamente. El coeficiente de extinción y el índice de refracción dependientes de la frecuencia pueden modelarse generalmente por una función que varía lentamente de la frecuencia. Por ejemplo, en ausencia de resonancias, el coeficiente de extinción tiende a ser menor a bajas frecuencias, y a menudo puede modelarse mediante una función cuadrática (u otro polinómico) de frecuencia. En algunos casos, puede ser necesario ajustar los datos de múltiples formas de onda de transmisión y reflexión de varias polarizaciones del transmisor 22a, polarizaciones del receptor 24a y ángulo de incidencia.

Este modelo puede extenderse para determinar los parámetros característicos para un material tipo lámina con múltiples capas (por ejemplo, un papel con un recubrimiento). El cálculo de la secuencia de pulsos en la transmisión y la reflexión se construye de manera similar a lo anterior, con cada capa que añade una interfaz de reflexión Fresnel adicional y un modelo adicional de constante dieléctrica compleja dependiente de la frecuencia (coeficiente de extinción dependiente de la frecuencia y índice de refracción dependiente de la frecuencia) y un grosor de capa. De nuevo, el modelo puede ajustarse a formas de onda de transmisión y/o reflexión medidas (que pueden variar por ángulo de incidencia y polarización del transmisor 22a y del receptor 24a) para determinar todos los parámetros correspondientes a cada capa.

La descripción del modelo de interacción del pulso de terahercios con la muestra 18a anterior supone que la transmisión a través de la capa sigue la ley de Beer; es decir, el campo eléctrico disminuye exponencialmente a medida que atraviesa el grosor dieléctrico uniforme. En la práctica, la transmisión a través de una capa puede experimentar una pérdida adicional debido a la dispersión interna del campo, y esta pérdida puede tener que modelarse para obtener ajustes precisos de los parámetros del material. Esta pérdida de dispersión puede o no seguir la ley de Beer.

La descripción de la interacción del pulso de terahercios con el modelo 18a anterior supone que la reflexión de las capas se describe por los coeficientes de Fresnel y una reflexión especular de un dieléctrico uniforme ópticamente liso (se debe tener en cuenta que la superficie puede ser mucho más rugosa a frecuencias terahercios que a frecuencias visibles para considerarse ópticamente lisa). En la práctica, la interfaz de reflexión puede ser rugosa y dispersar una porción del campo, y esta pérdida puede tener que modelarse para obtener ajustes precisos de los parámetros del material.

El modelado de la forma de onda para ajustarse a los parámetros físicos del plástico a partir de las formas de onda transmitidas y reflejadas puede simplificarse mediante ciertas aproximaciones. El receptor 24a puede configurarse para capturar el (cada uno de) los haces reflectantes y registrar la forma de onda simultáneamente. Si la dispersión es insignificante, entonces la suma de la potencia transmitida y reflejada (no del campo) puede ser igual a la potencia de entrada menos la potencia perdida al coeficiente de extinción dependiente de la frecuencia. Si la pérdida dependiente de la frecuencia es insignificante, y el índice de refracción dependiente de la frecuencia es constante, entonces la forma de onda del pulso transmitido solo se reduce en amplitud al propagarse a través del material (no

cambia de forma).

Además, si el grosor de una capa de la muestra 18a es grande en comparación con la longitud de onda más larga en el pulso de terahercios, entonces la forma de onda en el dominio del tiempo de un pulso reflejado tendrá cada pulso en secuencia bien separado de manera que se pueda ignorar la interferencia entre los pulsos. En este caso, el grosor del material para cualquier secuencia particular es proporcional a la velocidad del grupo/2 veces el tiempo medido de vuelo entre los pulsos de reflexión desde las interfaces superior e inferior de la capa. Siempre que la composición y la densidad del material permanezcan constantes, el grosor del material puede derivarse de este tiempo de vuelo (y debido a que la densidad es constante, también puede hacerse el peso base). El tiempo de vuelo entre los pulsos en la forma de onda puede determinarse mediante la deconvolución y el ajuste del modelo a un pulso de referencia.

En muchos casos de medición (especialmente papel) el material tipo lámina puede ser delgado en comparación con la longitud de onda más larga de interés en el pulso reflejado. En este caso, los picos de pulsos reflejados cambiarán en amplitud y tiempo con respecto al tiempo ideal de vuelo para el grosor. Esto también se conoce como efecto de Fabry Perot. El tiempo de vuelo no puede determinarse mediante una simple búsqueda de picos o ajuste a una forma de pulso tal como un Gaussiano o Lorentziano; más bien el campo de los picos modelados puede sumarse de manera que pueda tenerse en cuenta la interferencia.

En la transmisión, siempre que la composición del material sea uniforme y la densidad no cambie (y los efectos de absorción y dispersión sean insignificantes), el grosor es proporcional a [tiempo de vuelo del pulso cuando la lámina está presente menos tiempo de vuelo solo en aire] multiplicado por [velocidad de grupo del material menos velocidad de grupo en el aire]. El tiempo de transmisión del pulso no se distorsiona significativamente por un efecto de etalon variable de lámina delgada. El tiempo de vuelo de referencia cuando la muestra no está presente puede no desviarse. Esto puede requerir que la distancia entre el transmisor 22a y el receptor 24a esté estabilizada o que el tiempo de vuelo esté corregido por un instrumento no sensible a la presencia del papel (por ejemplo un calibrador de distancia magnético o de corriente parásita). Si la deriva es muy lenta, el sensor puede moverse periódicamente "fuera de la trama" para recoger una nueva forma de onda de referencia (y tiempo de vuelo).

Las configuraciones de reflexión a menudo son más convenientes que las mediciones de transmisión donde el receptor 24a se coloca en el lado opuesto de la lámina desde el transmisor 22a. Por ejemplo, un sistema de pórtico puede requerir dos etapas de movimiento sincronizadas. Una medición en reflexión para la cual el tiempo o la amplitud de primer orden no se distorsiona por el efecto de etalon de lámina delgada puede hacerse al colocar un plano de reflexión (como un espejo o riel metálico) detrás de la lámina de manera que el pulso fuerte se refleja de regreso a través de la lámina (que pasa a través de ella una segunda vez) al receptor 24a. En este caso, el grosor es proporcional a [tiempo de vuelo del pulso cuando la lámina está presente menos tiempo de vuelo solo en aire] / 2 veces [velocidad de grupo del material menos velocidad de grupo en el aire]. El tiempo de vuelo de referencia cuando la muestra no está presente puede no desviarse. La distancia entre el par transmisor 22a/receptor 24a y el plano de reflexión puede estabilizarse o corregirse en el tiempo de vuelo por un instrumento no sensible a la presencia del papel (por ejemplo, un calibrador de distancia magnético o de corriente parásita). Si la deriva es muy lenta, el sensor puede moverse periódicamente "fuera de la trama" para recoger una nueva forma de onda de referencia (y tiempo de vuelo).

La configuración del medidor de reflexión puede mejorarse aún más al colocar una ventana ligeramente reflectante por encima de la lámina (así como el espejo de reflexión por debajo de la lámina). La ventana puede fabricarse de un plástico transparente terahercios (HDPE) o vidrio (sílice fundido), por ejemplo. Esto se conoce como la "Estructura de Referencia Externa" o ERS. El tiempo de vuelo de referencia cuando la muestra no está presente puede no desviarse. La distancia entre la superficie interna de la ventana y el plano de reflexión puede estabilizarse o corregirse el tiempo de vuelo mediante un instrumento no sensible a la presencia del papel (por ejemplo, un calibrador de distancia magnético o de corriente parásita). Si la deriva es muy lenta, el sensor puede moverse periódicamente "fuera de la trama" para recoger una nueva forma de onda de referencia (y tiempo de vuelo).

Tenga en cuenta que no siempre es posible alejarse de la trama. Cuando se usa una estructura de referencia externa 40, el siguiente tiempo de vuelos puede medirse a partir de la secuencia de pulsos (con una lámina de una sola capa): (1) dentro de la ventana a la parte superior de la muestra; (2) de la parte superior de la muestra a la parte inferior de la muestra; y (3) del fondo de la muestra al plano de reflexión. Las distancias de (1) + (3) pueden calcularse mediante el uso de la velocidad de la luz en el aire. El grosor calibre de la lámina es igual a la distancia conocida (estabilizada y/o medida periódicamente) entre la ventana de la estructura de referencia externa 40 y el plano de reflexión menos [distancias (1) + (3)]. Este es un grosor calibre verdadero ya que es independiente del índice de refracción de la lámina. La velocidad del grupo de la lámina puede calcularse al dividir el grosor del calibre por el tiempo de vuelo (2). Al usar una estructura de referencia externa 40, el sistema terahercios puede medir tanto el grosor calibre verdadero, el peso base como la densidad de la lámina (suponiendo que la composición permanezca igual y la variación de densidad se deba a algo como el espacio incorporado, tal como la espuma).

En muchos casos, sin embargo, la lámina absorbe lo suficiente de manera que los pulsos transmitidos a través de la lámina se distorsionan (normalmente se alargan y se pierde la amplitud debido a la pérdida de frecuencias más

altas). En este caso, no pueden hacerse aproximaciones de extinción y/o índice de refracción dependientes de la frecuencia constante, y los parámetros del modelo de grosor y constante dieléctrica compleja pueden ajustarse simultáneamente mediante el uso del esquema del modelo completo descrito anteriormente (que incluye posiblemente la pérdida por dispersión). Esto puede hacerse en reflexión pura, en transmisión, con un plano de reflexión, o estructura de referencia externa 40.

Un parámetro físico importante del papel (y de otras láminas) que debe medirse en línea o fuera de línea es el porcentaje de agua incorporada en la masa total del papel. El agua (a través de la exposición a la humedad o líquido de la pulpa antes del secado) puede incorporarse en el espacio intersticial entre las fibras de papel; y/o unirse a las fibras. Esto modificará la constante dieléctrica compleja del papel (tanto el índice de refracción dependiente de la frecuencia como el coeficiente de extinción dependiente de la frecuencia) como una función del peso base de agua. Además, la dispersión dependiente de la frecuencia puede cambiar como una función del peso base de agua. El grosor del papel puede cambiar como una función del peso base de agua. El índice de refracción dependiente de la frecuencia (relacionado con la velocidad del grupo) a través del papel húmedo puede modelarse mejor independientemente del índice de refracción para el papel húmedo usado para calcular los coeficientes de Fresnel.

Las mediciones de amplitud simple (o amplitud cuadrada) de los pulsos ajustados pueden no ser directamente proporcionales a la concentración de agua como podría esperarse por la Ley de Beer debido a la complejidad de la física de la incorporación del agua. Más notablemente, el efecto del agua intersticial y el agua unida adsorbida tanto del índice de refracción como del coeficiente de extinción frente al peso base de agua puede no seguir la Ley de Beer como una función de la concentración. La medición de las amplitudes del pulso de reflexión, en particular los pulsos transmitidos, se modificará no solo por la extinción interna debida al agua sino también por una amplitud aumentada o disminuida debido a los pulsos de reflexión anteriores que cambian debido a que los coeficientes de Fresnel son una función del peso base del agua.

El grosor, y de los coeficientes dependientes de la frecuencia en el modelo de propagación pueden medirse empíricamente al ajustar una o más de las formas de onda de configuración de reflexión o transmisión de manera independiente o simultánea como una función del peso base de agua conocido. Esta configuración de medición puede verse ayudada por el uso de un ERS. La familia de curvas derivadas empíricamente puede entonces usarse para ajustar el peso base de agua (porcentaje) de una muestra de papel con una concentración de agua desconocida.

Tenga en cuenta que el efecto del coeficiente de Fresnel cambia como una función del ángulo y la polarización. Las formas de onda pueden recogerse en múltiples ángulos y combinaciones de polarización. Una configuración particularmente útil puede ser una configuración de ángulo de Brewster. En el ángulo de Brewster, los coeficientes de Fresnel son 0 y el pulso polarizado "P" se transmite sin pérdida dependiente de la frecuencia, excepto por el coeficiente de extinción dependiente de la frecuencia. Las mediciones mediante el uso del ángulo de Brewster pueden hacerse en transmisión verdadera o con una configuración de sensor de ERS/reflexión inclinado en el ángulo correcto con respecto al papel. Las mediciones del ángulo de Brewster pueden ser particularmente útiles cuando la concentración de agua y la pérdida adicional son pequeñas en comparación con el fondo de las reflexiones de Fresnel del papel.

Como se discutió anteriormente, el coeficiente de extinción dependiente de la frecuencia (y/o índice de refracción) puede modelarse empíricamente por una función simple con unos pocos parámetros tales como un polinomio. Como la mayoría de los dieléctricos, el agua se absorbe más fuertemente a frecuencias terahercios más altas en comparación con frecuencias terahercios más bajas. La pendiente o curva de la dependencia de la frecuencia es mucho más pronunciada para el agua que para el papel. El ajuste de la forma de onda completa (todos los componentes de reflexión y transmisión) puede determinar los parámetros (polinómicos) de la dependencia de la frecuencia. Estos parámetros dependientes de la frecuencia pueden tener una relación comparativamente simple (proporcional) con el peso base de agua. En ciertos casos, se podría usar un análisis de Fourier más simple de los pulsos transmitidos y la medición del calibre para calcular los parámetros dependientes de la frecuencia empíricos de manera más eficiente que el ajuste al modelo completo de propagación.

Lo siguiente es un cálculo de la amplitud de tres reflexiones primarias suponiendo una frecuencia constante de índice de refracción independiente, coeficiente de extinción dependiente de la frecuencia constante y ley de Beer. Esta es una aproximación significativa, y no se debe considerar que represente todos los casos experimentales de absorción de agua, donde la modelización más completa de la propagación de pulsos descrita anteriormente puede ser más apropiada.

Se realiza una medición de reflexión THz monostática (colineal) con el pulso incidente que viaja de izquierda a derecha a través de una lámina de material 18a, que refleja desde una estructura de referencia externa que refleja al 100 % 40, de regreso a través de la lámina 18a, y hacia el receptor 24a. Esto da como resultado 3 reflexiones primarias.

Las superficies de la lámina 18a y la estructura de referencia externa 40 se alinean normales al haz incidente de manera que las reflexiones de la interfaz viajan directamente de regreso al receptor 24a. Las ópticas terahercio se

configuran de manera que cada una de las reflexiones de interfaz se ajustan por el modo con el receptor 24a independientemente de la distancia a lo largo del eje de propagación y se registra el 100 % del campo eléctrico de cada interfaz. Si no, puede hacerse algún procedimiento para corregir la pérdida de eficiencia como una función de la posición a lo largo del eje de propagación.

La potencia de cada pulso reflejado puede encontrarse al integrar el cuadrado del campo eléctrico durante una duración fija y luego dividir por esa duración. Esto requiere que los pulsos estén suficientemente separados en el tiempo de manera que los campos de cada pulso no interfieran. Alternativamente, cada uno de los pulsos reflejados puede deconvolucionarse con una referencia metálica, y la potencia máxima es proporcional a la amplitud al cuadrado.

No existe una contabilidad de ningún cambio dependiente de la frecuencia en el índice de refracción complejo (cambio en el índice o coeficiente de extinción con la frecuencia) o de los efectos de Fabry-Perot. El coeficiente de reflexión de la interfaz  $R_e$  es el mismo al cambiar de aire-material y material-aire.

Sin embargo, para este procedimiento asumimos que tras la adsorción de agua tanto la transmisión interna como los coeficientes de reflexión no son necesariamente iguales al estado seco puro.

Es decir,  $T_i \neq T_{i+w}$ ,  $Y R_e \neq R_{e+w}$ . Las dimensiones calibre del material no cambian esencialmente tras la absorción de agua.

#### Definiciones

|                 |                                                                                                           |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I_0$           | potencia (no campo) del pulso incidente                                                                   |
| $T_i$           | transmisión interna de energía de material tipo lámina ( $0 \leq T_i \leq 1$ )                            |
| $L_i$           | longitud de la lámina (medida por calibre THz, por ejemplo)                                               |
| $R_e = 1 - T_e$ | reflexión de potencia de la interfaz aire/lámina                                                          |
| $T_e = 1 - R_e$ | transmisión de energía a través de la interfaz de aire/lámina                                             |
| $I_1$           | potencia de pulso reflejada desde la primera interfaz de aire-material                                    |
| $I_2$           | poder de pulso reflejado a través de la segunda interfaz material-aire y de regreso a través del material |
| $I_3$           | potencia de pulso reflejada desde el espejo, que ha atravesado dos veces el material                      |
| $\alpha_i$      | coeficiente de extinción del material                                                                     |
| $\alpha_w(C_w)$ | coeficiente de extinción dependiente de la concentración del agua                                         |
| $C_w(\alpha_w)$ | concentración de agua vs. coeficiente de extinción de agua                                                |
| $T_{i+w}$       | transmisión interna de energía de la lámina más agua                                                      |

Usando la estructura de referencia externa 40 y el procedimiento adecuado para determinar la potencia reflejada desde cada interfaz, mida las siguientes potencias de pulso reflejadas:

$$(1) \quad I_1 = I_0 (1 - T_e)$$

$$(2) \quad I_2 = I_0 (1 - T_e) T_e^2 T_i^2$$

$$(3) \quad I_3 = I_0 T_e^4 T_i^2$$

Luego podemos resolver primero para  $T_e$

$$(4) \quad T_e = -I_3 / I_2 + \text{SQRT}((I_3 / I_2)^2 + 4 I_3 / I_2)$$

Conociendo  $T_e$  podemos resolver para  $T_i$

$$(5) \quad T_i = \text{SQRT}((I_3 / I_2)(1 - T_e) / T_e^4)$$

En términos del coeficiente de extinción  $\alpha_i$  para el material puro, mediante el uso de la ley de Beer,

$$(6) \quad T_i = \exp(-\alpha_i L_i)$$

$$(7) \quad \alpha_i = -\ln(T_i) / L_i$$

## REIVINDICACIONES

1. Un sistema (10A, 10B) para determinar al menos un parámetro de una muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B) mediante el uso de radiación de terahercios, el sistema (10A, 10B) que comprende:
  - al menos un transmisor de terahercios (22A, 22B) configurado para emitir un pulso de radiación de terahercios a la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B);
  - un receptor de terahercios (24A, 24B) configurado para recibir al menos una porción del pulso de radiación de terahercios de la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B), en donde el receptor de terahercios (24A, 24B) se configura para emitir una forma de onda medida en base a la radiación de terahercios recibida por el receptor de terahercios (24A, 24B);
  - una unidad de control (42, 42A, 42B) en comunicación con el receptor de terahercios (24A, 24B) y configurada para recibir la forma de onda medida del receptor de terahercios (24A, 24B);
  - la unidad de control (42, 42A, 42B) se configura para:
    - elegir al menos una región de interés de la forma de onda medida,
    - comparar la al menos una región de interés de la forma de onda medida con una forma de onda del modelo, en donde la forma de onda del modelo se deriva de una forma de onda de referencia registrada cuando la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B) no está presente,
    - variar al menos un parámetro de una forma de onda del modelo para minimizar la diferencia entre la forma de onda del modelo y la forma de onda medida, y
    - determinar el al menos un parámetro de la forma de onda del modelo de manera que la forma de onda del modelo se ajuste mejor a la forma de onda medida,
    - en donde el al menos un parámetro de la forma de onda del modelo incluye al menos uno de los siguientes: grosor de un modelo de lámina dieléctrica e índice de refracción complejo de un modelo de lámina dieléctrica.
2. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, en donde la unidad de control (42, 42A, 42B) está configurada para determinar el grosor de la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B) mediante un grosor conocido de un modelo de lámina dieléctrica de la forma de onda del modelo para que coincida mejor con la forma de onda medida.
3. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, en donde el índice de refracción complejo del modelo de lámina dieléctrica (18A, 18B) es un índice de refracción complejo de la forma de onda del modelo parametrizado por el contenido de agua y/o el peso base.
4. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 3, en donde la unidad de control (42, 42A, 42B) se configura para:
  - determinar el contenido de agua o el peso base de la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B) al variar el índice de refracción complejo para predecir un índice de refracción complejo de la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B); y
  - utilizar el índice de refracción complejo previsto para crear la forma de onda del modelo con parámetros adicionales; en donde preferentemente los parámetros de adición incluyen una longitud de cualquier capa de la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B) y las dimensiones y constantes ópticas de cualquier elemento óptico.
5. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, en donde la porción del pulso de radiación de terahercios recibida por el receptor de terahercios (24A, 24B) de la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B) se refleja por la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B) al receptor de terahercios (24A, 24B).
6. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 5, que comprende, además, un espejo configurado para reflejar la radiación de terahercios emitida por el transmisor de terahercios (22A, 22B) al receptor de terahercios (24A, 24B).
7. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, en donde la forma de onda es una forma de onda en el dominio del tiempo o una forma de onda en el dominio de la frecuencia.
8. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, en donde la unidad de control (42, 42A, 42B) se configura para transformar la forma de onda del modelo mediante un modelo matemático en base a la física óptica de la propagación de la radiación de terahercios a través de al menos un elemento óptico conocido que se encuentra entre el al menos un transmisor de terahercios (22A, 22B) y el receptor de terahercios (24A, 24B).
9. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, en donde la unidad de control (42, 42A, 42B) determina un mejor ajuste de la forma de onda medida al minimizar la suma de los cuadrados de la diferencia entre la forma de onda del modelo y la forma de onda medida.
10. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, que comprende, además, al menos un sensor adicional (44, 44A)

para detectar propiedades de la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B), en donde preferentemente el al menos un sensor adicional (44, 44A) incluye al menos uno de un sensor de infrarrojo cercano, un sensor de corriente parásita, un sensor magnético, un sensor de espectroscopia visible, calibradores, un sensor de espectroscopia de resonancia magnética nuclear, o un sensor de espectroscopia de Raman.

11. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, en donde:

el receptor de terahercios (24A, 24B) se configura para medir una polarización del pulso de radiación de terahercios; y  
la unidad de control (42, 42A, 42B) se configura para determinar al menos un parámetro medido de la forma de onda medida al utilizar adicionalmente la polarización del pulso de radiación de terahercios.

12. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, en donde:

el receptor de terahercios (24A, 24B) se configura para medir un ángulo del haz del pulso de radiación de terahercios; y  
la unidad de control (42, 42A, 42B) se configura para determinar al menos un parámetro medido de la forma de onda medida al utilizar adicionalmente el ángulo del haz de pulso de la radiación de terahercios.

13. El sistema (10A, 10B) de la reivindicación 1, en donde la unidad de control (42, 42A, 42B) se configura para determinar al menos un parámetro medido de la forma de onda medida al utilizar adicionalmente una distancia de la muestra de lámina dieléctrica (18A, 18B) desde una lente de enfoque de terahercios.

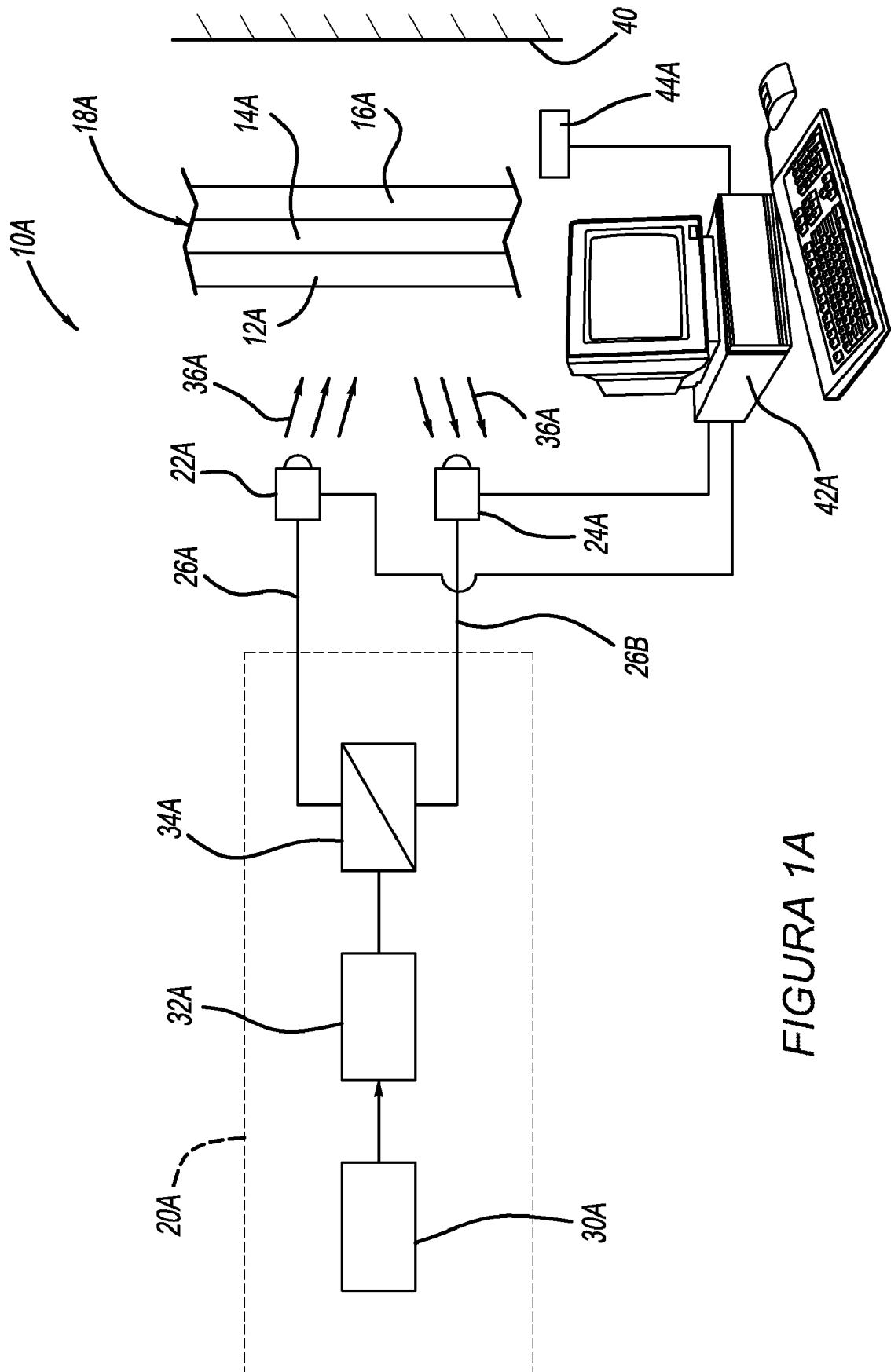
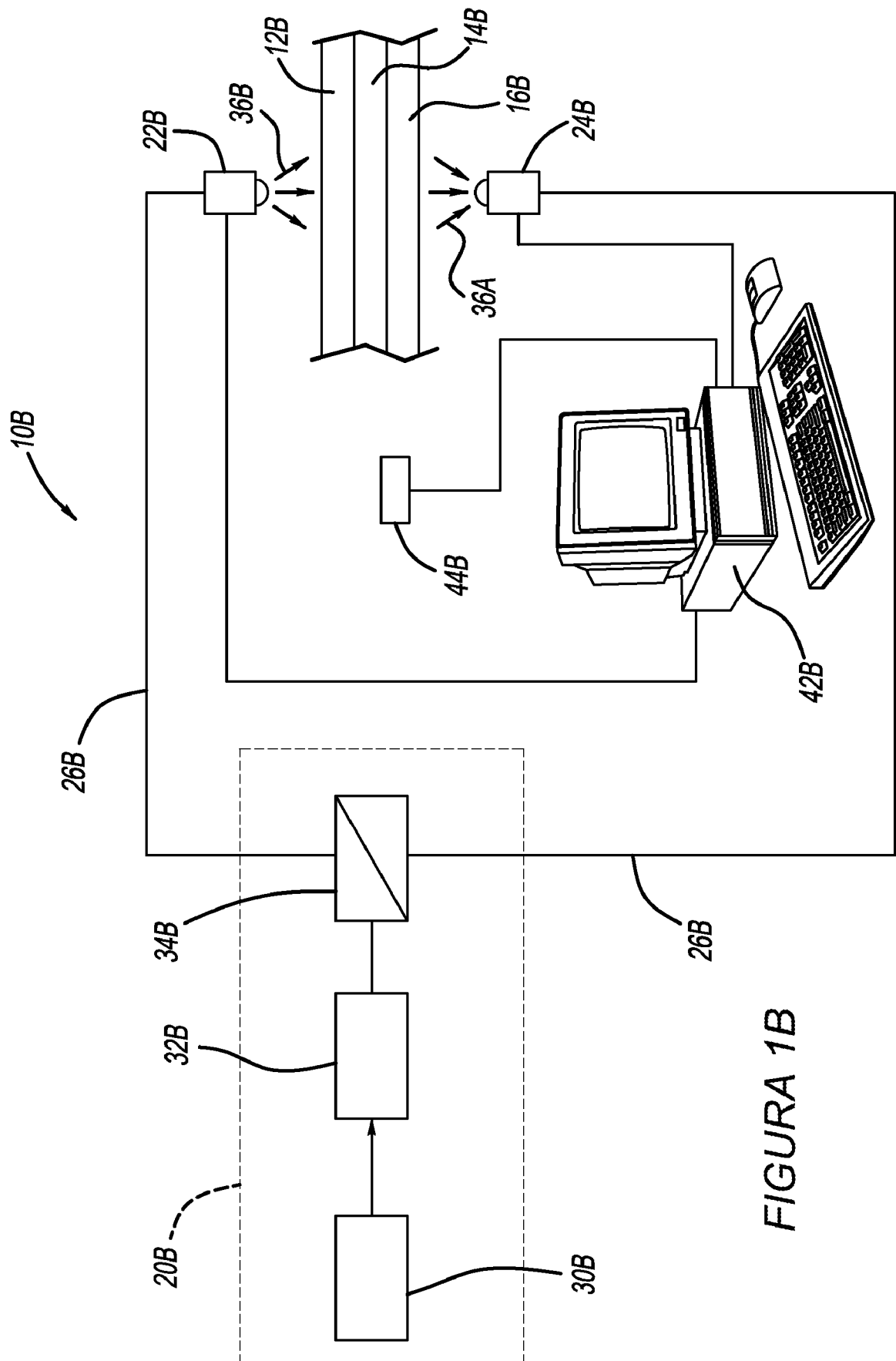


FIGURA 1A



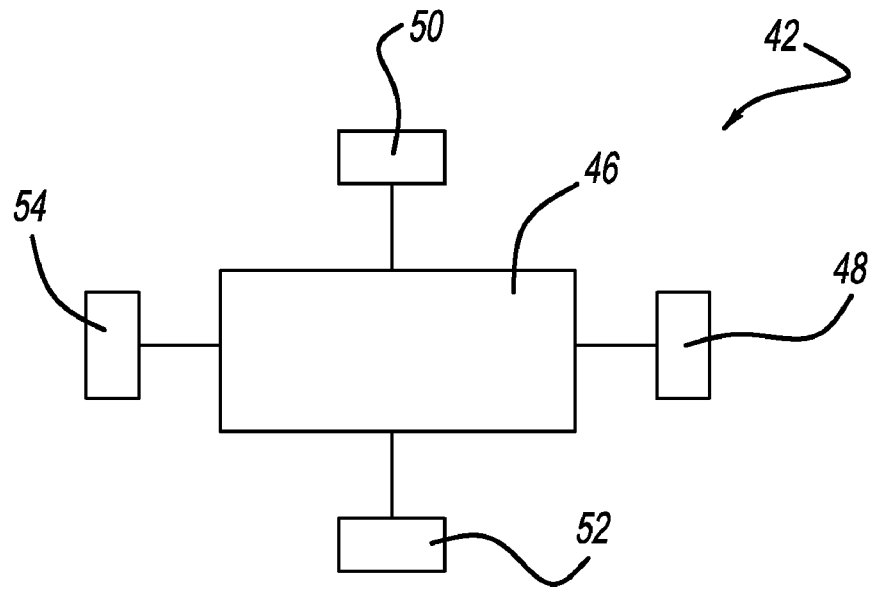


FIGURA 2

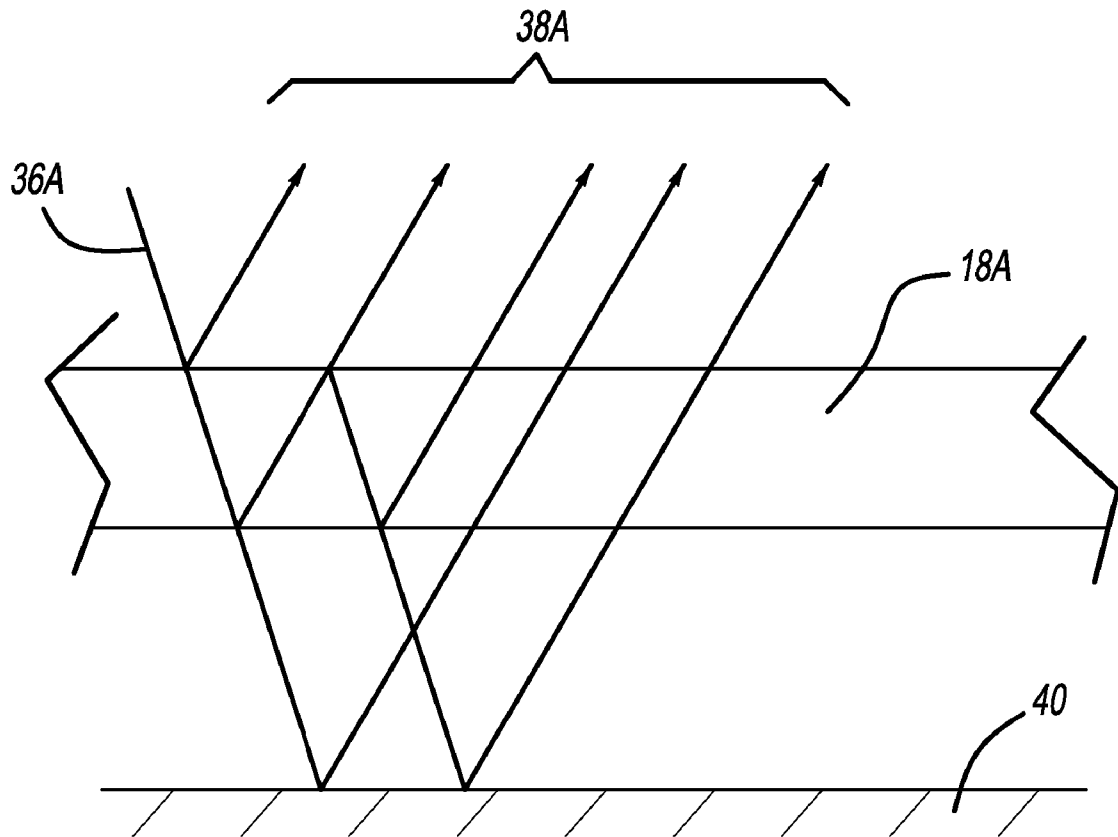


FIGURA 3

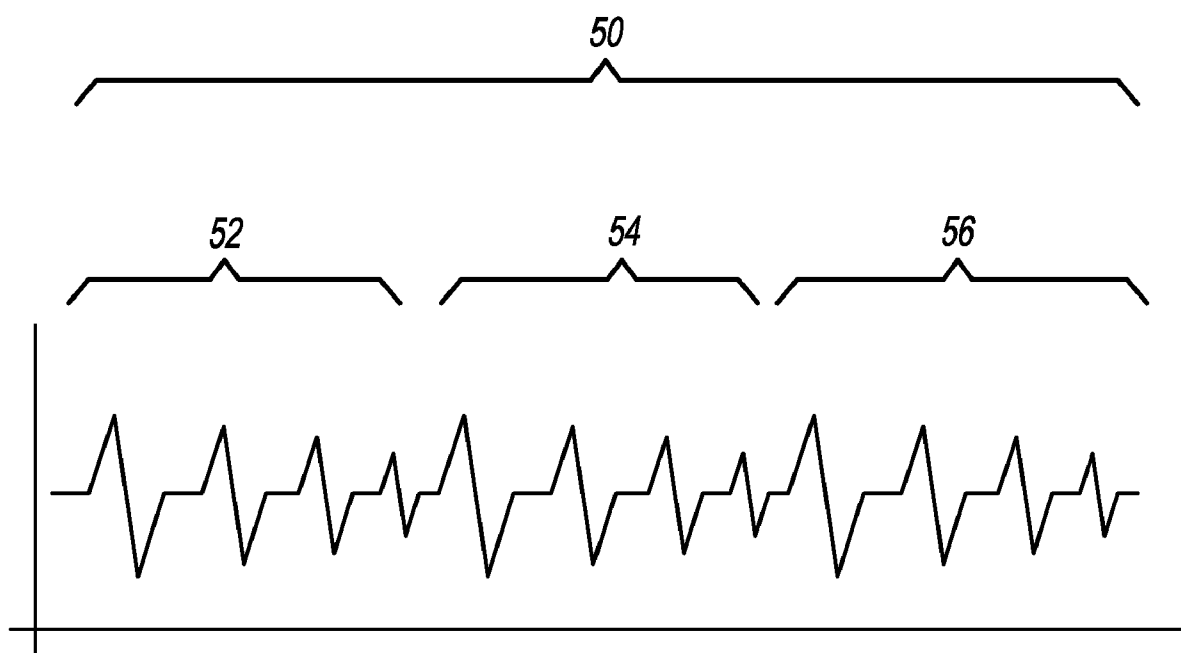


*FIGURA 4*