

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 971 465**

51 Int. Cl.:

B23K 26/03	(2006.01)	B22F 3/105	(2006.01)
A61B 18/20	(2006.01)		
B23K 26/14	(2014.01)		
B23K 26/21	(2014.01)		
B23K 26/362	(2014.01)		
B23K 26/382	(2014.01)		
B23K 9/095	(2006.01)		
B23K 15/00	(2006.01)		
B23K 15/02	(2006.01)		
B23K 15/08	(2006.01)		

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.09.2011 PCT/CA2011/050599**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **29.03.2012 WO12037694**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.09.2011 E 11826290 (6)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.12.2023 EP 2619633**

54 Título: **Procedimiento de formación de imágenes coherentes y de control por retroalimentación para la modificación de materiales**

30 Prioridad:

21.01.2011 US 201161435076 P
25.09.2010 US 386496 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
05.06.2024

73 Titular/es:

IPG PHOTONICS (CANADA) INC. (100.0%)
199 Bay Street, Suite 5300, Commerce Court
West
Toronto ON M5L1B9, CA

72 Inventor/es:

WEBSTER, PAUL J. L.;
FRASER, JAMES M. y
YANG, VICTOR X. D.

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 971 465 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

Procedimiento de formación de imágenes coherentes y de control por retroalimentación para la modificación de materiales

5

CAMPO

La solicitud se refiere a la formación de imágenes coherentes y a la modificación o medición óptica de materiales, por ejemplo, mediante el uso de láseres y, en particular, a un procedimiento de control de al menos un parámetro de procesamiento de un proceso de modificación de materiales, y a un procedimiento de generación de un registro de un proceso de modificación de materiales, utilizando dicho primer procedimiento, contemplados en las reivindicaciones 1 y 9, respectivamente.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15

Los láseres son conocidos como una herramienta importante para el procesamiento de una amplia gama de materiales. Algunos ejemplos de procesos incluyen soldadura, taladrado, corte, fresado, perforación, sinterización y tratamiento de superficies. Los materiales pueden incluir metales, semiconductores, dieléctricos y polímeros, así como tejidos biológicos duros y blandos. Mediante el enfoque del haz, es posible lograr una mayor precisión de la acción del láser en una dirección transversal al eje del haz. Sin embargo, localizar la acción del láser en la dirección axial del haz puede resultar difícil.

20

Son comunes a muchos procesos láser las técnicas de metrología para guiar el sistema de procesamiento y obtener datos de garantía de calidad antes, durante y/o después de la acción del láser. Diversos aspectos de la interacción con el láser y limitaciones prácticas pueden dificultar las técnicas estándar. Algunos ejemplos de tales aspectos incluyen la generación de plasma/interferencias eléctricas, orificios de alta relación de aspecto, cegamiento por el láser de procesamiento, materiales en rápido movimiento, geometrías impredecibles, relajación del material y posibles daños causados al instrumental de metrología por el láser de procesamiento.

25

El control de la profundidad de corte por láser es un factor importante para el uso de láseres en una variedad de microcirugías. En particular, existe una enorme demanda de cirugías de columna (un tercio de los casos de neurocirugía en algunos hospitales). Las herramientas mecánicas actuales son arcaicas y difíciles de utilizar con seguridad y eficacia, salvo por cirujanos expertos. El uso del láser es deseable por su elevado control transversal, el nulo desgaste de las herramientas y el funcionamiento sin contacto (control de infecciones). El uso del láser ofrece otras ventajas, como un control flexible de la coagulación y un efecto aséptico inherente. Sin embargo, los láseres tienen un control axial muy deficiente (es decir, el haz continúa desplazándose en dirección axial). Esto significa que, si el punto de perforación no se controla con extrema precisión, se producirán, casi con toda seguridad, lesiones involuntarias en los tejidos blandos circundantes. Por lo tanto, el uso de láseres se ha descartado hasta ahora en un gran número de casos.

30

35

Los sistemas láser actuales se utilizan principalmente en tejidos blandos y se basan en la suposición de que se elimina una cantidad uniforme de material con una cantidad determinada de tiempo de exposición. Sin embargo, esta suposición no siempre es correcta y, además, a menudo no se sabe de antemano la cantidad de tejido que se eliminará exactamente. La realización de cortes o ablaciones precisos en interfaces de tejidos con propiedades ópticas, mecánicas y térmicas muy diferentes es de especial interés para los neurocirujanos, cirujanos ortopédicos, otorrinolaringólogos y cirujanos laparoscópicos. A diferencia de la cirugía láser de la córnea, estas especialidades quirúrgicas se ocupan principalmente de tipos de tejidos no transparentes, ópticamente turbios y con propiedades tisulares heterogéneas a escala microscópica, donde no es posible una caracterización opto-térmica pormenorizada y precisa realizada de antemano. El proceso de corte/ablación tisular no determinista resultante dificulta en gran medida el uso de láseres durante dichos procedimientos quirúrgicos. Por ejemplo, varios autores han destacado recientemente que la práctica de la osteotomía por láser (procedimiento quirúrgico para cortar hueso) se ve limitada por la falta de control de la profundidad del láser. El potencial beneficio de la eliminación precisa del tejido puede tener importantes repercusiones clínicas en este y otros ámbitos de la oncología quirúrgica y la implantación.

40

45

50

En aplicaciones industriales, el procesamiento por láser ofrece la ventaja de que un único láser puede utilizarse para limpiar, soldar y/o mecanizar diferentes materiales sin necesidad de realizar ajustes mecánicos ni cambios en los tratamientos químicos. Aunque se ha logrado la ablación por láser de muestras heterogéneas o multicapa, estos procesos requieren enormes cantidades de desarrollo y dependen de características o modelos de muestra uniformes con aplicabilidad limitada y resultados variables. La soldadura y la limpieza por láser también suelen requerir una optimización exhaustiva de múltiples parámetros. El problema de conseguir un conjunto específico de objetivos de procesamiento (por ejemplo, la relación de aspecto de la característica, la zona afectada por el calor, etc.) dentro del espacio de parámetros disponible (que engloba el caudal de alimentación, la energía del pulso, la duración del pulso, la longitud de onda, el gas de asistencia, el tamaño del punto y la posición focal) se ve agravado por las características del material (por ejemplo, el umbral de fusión y ablación y el peso molecular del polímero). Por consiguiente, el desarrollo de procesos láser industriales requiere un tiempo y una inversión financiera considerables, y puede requerir materias primas de tolerancia fina para garantizar la fiabilidad. En la supervisión y el control de los procesos láser de

60

65

soldadura y perforación se han utilizado sensores para medir la temperatura del metal, la reflectividad y la temperatura del plasma cerca de la zona que está siendo procesada. Estas formas de metrología no proporcionan una medición precisa de la profundidad de penetración del haz láser.

5 La soldadura por láser es un proceso industrial especialmente adecuado para la fabricación automatizada y de gran volumen. Las diversas aplicaciones de la soldadura por láser tienen en común un proceso de calentamiento controlado por láser para crear un cambio de fase localizado en la región de unión. El control de esta región de cambio de fase (PCR) es importante para controlar la geometría y la calidad de la soldadura y la productividad general del sistema de soldadura. La alta coherencia espacial de la luz láser permite un excelente control transversal de la energía de soldadura. El control axial (profundidad de la PCR) y la posterior difusión térmica resultan problemáticos en materiales gruesos. En estas aplicaciones, la profundidad de la PCR se adentra en el material (por ejemplo, 50 micrómetros y más) utilizando una técnica ampliamente conocida como "soldadura de ojo de cerradura". En este caso, la intensidad del haz es suficiente para fundir la superficie y abrir un pequeño canal de vapor (también conocido como "capilar" u "ojo de cerradura") que permite que el haz óptico penetre profundamente en el material. Dependiendo de la aplicación específica, el ojo de cerradura puede ser estrecho (por ejemplo, <mm) pero de varios milímetros de profundidad y se mantiene con la aplicación de hasta ~105 W de potencia óptica. Como resultado, la región de interacción luz-materia dentro de la PCR puede ser turbulenta, inestable y altamente estocástica. Lamentablemente, la inestabilidad de la formación del ojo de cerradura puede dar lugar a huecos internos y a una elevada porosidad de la soldadura que provoque su fallo, con posibles consecuencias catastróficas. Suele ser necesario verificar la calidad de la soldadura, para lo que, a menudo, se utilizan costosas pruebas *ex situ* y destructivas. Existen soluciones de formación de imágenes de soldadura, pero sus capacidades son limitadas y suelen monitorizar regiones anteriores o posteriores a la PCR, para realizar un seguimiento de la unión soldada o registrar la superficie superior de la unión soldada enfriada.

25 El documento EP 1 977 850 A1 (base del preámbulo de las reivindicaciones 1 y 9) se refiere a un dispositivo de mecanizado con al menos un cabezal de mecanizado, que está diseñado para proporcionar al menos un haz de mecanizado de alta energía, en particular un haz de electrones o láser. Un dispositivo de procesamiento de este tipo se utiliza para la eliminación de material de piezas de trabajo o para la unión integral de piezas de trabajo, en particular para soldadura. El documento EP 1 977 850 A1 prevé que el cabezal de mecanizado esté asociado con al menos un escáner de tomografía de coherencia óptica diseñado para escanear superficies. Además, en el documento EP 1 977 850 A1 se propone un procedimiento de procesamiento de materiales que utiliza un haz de procesamiento de alta energía para escanear superficies no procesadas, procesadas o en proceso, de una pieza de trabajo con la ayuda de un tomógrafo de coherencia óptica.

35 El documento DE 101 55 203 A1 se refiere a un dispositivo de procesamiento por láser con un dispositivo de procesamiento por láser para generar un haz de procesamiento dirigido a un punto de procesamiento de una pieza de trabajo y a un sistema de medición que cuenta con un dispositivo de iluminación y un dispositivo de observación para registrar datos de superficie de la pieza de trabajo en la zona del punto de procesamiento en al menos un punto de medición. El sistema de medición está conectado, al menos parcialmente, al dispositivo de mecanizado y está diseñado para capturar datos de superficie tridimensionales, lo que permite un análisis fiable del resultado del mecanizado con la posibilidad de regular el proceso de mecanizado.

45 Según el documento US 2005/0133488 A1, un sistema de soldadura en tándem incluye una pluralidad de electrodos separados dispuestos para desplazarse a una velocidad de desplazamiento común. La pluralidad de electrodos separados coopera para realizar una soldadura. Un medio de almacenamiento de datos almacena datos medidos para cada electrodo durante la realización de la soldadura. Un procesador efectúa un proceso que comprende, para cada electrodo, recuperar los datos medidos correspondientes al electrodo que pasa por una posición de referencia, y combinar los datos medidos recuperados de la pluralidad de electrodos separados para calcular un parámetro de soldadura del sistema de soldadura en tándem en la posición de referencia.

50 El documento US 6.755.819 B1 se refiere a un procedimiento de fotoablación de la córnea con un rayo láser, con la ayuda del cual se llevan a cabo múltiples operaciones consecutivas de ablación parcial, y se determina el grosor de la córnea con la ayuda de un dispositivo de medición que coopera con un interferómetro de Michelson antes y después de cada operación de ablación parcial. Utilizando los valores de espesor determinados, el dispositivo de medición guía el rayo láser, con valores de intensidad por él ajustados, sobre la córnea de forma controlada, para no quedar por debajo de un grosor de córnea previamente predeterminado en consideración de un perfil de córnea establecido con antelación.

60 El documento US 6.454.761 B1 se refiere a un procedimiento de tratamiento de tejido biológico mediante cirugía láser, que comprende detectar un límite o ubicación de superficie o masa de tejido biológico mediante un proceso de interferometría y controlar el tratamiento por láser de dicho tejido biológico según el límite o ubicación de superficie o masa detectado.

65 Webster, P.J.L. y col.: "*In situ 24 kHz coherent image of morphology change in laser percussion drilling*", Optics Letters, vol. 35, p. 646 (2010) divulga la perforación por percusión de imágenes de materiales industriales *in situ* utilizando tomografía de coherencia óptica de dominio espectral (SD-OCT) que resuelve axialmente la morfología de la muestra

mediante una transformada de Fourier del interferograma espectral resultante de la interferencia entre la luz retrodispersada de la muestra y un brazo de referencia.

SUMARIO

5 El procedimiento según la presente invención se define en la reivindicación independiente 1. Las realizaciones preferidas se describen en las reivindicaciones dependientes.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

10 La Figura 1 es un diagrama de bloques de un sistema de procesamiento de materiales que presenta un control de retroalimentación procedente de un sistema de formación de imágenes coherentes en línea 2, no cubierto por la presente invención tal como se reivindica;

15 la Figura 2 es un diagrama de bloques de un ejemplo de implementación del controlador de retroalimentación de la Figura 1;

20 la Figura 3 es un diagrama de bloques de un sistema de procesamiento de materiales que presenta un control de retroalimentación procedente de un sistema de formación de imágenes en el que la fuente de haz de modificación de material también funciona como fuente de luz de formación de imágenes;

las Figuras 4 y 5 son diagramas de bloques de sistemas de procesamiento de material que presentan un control de retroalimentación procedente de un sistema de formación de imágenes coherentes en línea;

25 las Figuras 6 y 7 son diagramas de bloques de sistemas de procesamiento de material de uno y dos canales que presentan un control de retroalimentación procedente de un sistema de formación de imágenes coherentes en línea y un fotodetector equilibrado;

30 la Figura 8 es un diagrama de bloques de un aparato para procesar una salida de interferometría utilizando un interferograma sintetizado precalculado;

35 la Figura 9 muestra un ejemplo de formación de imágenes OCT en modo M del corte por láser de costillas de bovino en el que la estructura subsuperficial aparece estática durante la exposición a los pulsos iniciales de $1,43 \times 10^5$, seguido de un inicio repentino del mecanizado con una velocidad de grabado aproximadamente lineal;

la Figura 10 muestra un ejemplo de la velocidad de grabado del material y la eficiencia de eliminación en costillas de bovino debido a la exposición a un láser de fibra de duración ns (potencia media constante de 23 W);

40 la Figura 11 es un ejemplo de formación de imágenes OCT en modo M del corte por láser de una muestra multicapa;

la Figura 12 es un ejemplo de imágenes OCT en modo B *in situ* de un hueso antes (izquierda) y después (derecha) de la perforación;

45 la Figura 13 es un ejemplo de una imagen en modo M en tiempo real de perforación por percusión en acero;

la Figura 14 es un diagrama de bloques de otro ejemplo de un sistema de formación de imágenes proporcionado por una realización de la invención;

50 la Figura 15 es una representación de una imagen en modo M completamente procesada del sistema de la Figura 14 con una línea superpuesta a la profundidad de filtro seleccionada (arriba), y mostrando la respuesta del filtro homodino que exhibe un pico agudo cuando el frente de mecanizado cruza la profundidad seleccionada (abajo);

55 la Figura 16 es un diagrama de flujo de un procedimiento de control de retroalimentación que utiliza el enfoque basado en filtro homodino;

la Figura 17 es un diagrama de bloques de otro sistema de formación de imágenes coherentes en línea;

la Figura 18 es un diagrama de bloques de un sistema de cirugía láser que presenta el sistema ICI de la Figura 17;

60 la Figura 19 es un diagrama de bloques de un sistema de soldadura que presenta el sistema ICI de la Figura 17;

la Figura 20 es un gráfico que compara el filtrado homodino con el procesamiento estándar (remuestreo por splines cúbicos, FFT);

65 la Figura 21 muestra un haz de formación de imágenes y una característica producida por láser, teniendo el haz de formación de imágenes un diámetro mayor que la característica producida por láser, y en el que el punto de

diferencia de longitud de trayectoria óptica cero se selecciona para que esté a una profundidad situada dentro del material que está siendo medido;

5 la Figura 22 muestra imágenes generadas por ICI a partir de perforación por percusión asistida por oxígeno de un solo pulso (duración de 5 ms indicada por líneas verticales) en láminas de acero inoxidable;

la Figura 23 es un diagrama esquemático que muestra el modo en que puede utilizarse la ICI para evaluar el ajuste y la separación en la soldadura solapada por láser;

10 la Figura 24 ilustra un escaneado realizado mediante un sistema de tomografía de coherencia óptica de escaneado independiente para verificar la precisión de la perforación láser controlada por ICI;

la Figura 25 muestra varias opciones para utilizar el mismo sistema ICI con múltiples ubicaciones de muestra;

15 la Figura 26 representa el uso de un sistema ICI para medir la altura de las características por debajo de la superficie de la muestra;

20 la Figura 27 es un diagrama de bloques de otra realización en la que el sistema ICI controla directamente el láser de mecanizado; y

la Figura 28 es un diagrama de bloques de otra realización en la que las interfaces del sistema ICI controlan indirectamente el láser de mecanizado a través de un controlador láser, y también las interfaces de otros componentes de control y/o gestión del sistema (por ejemplo, control de movimiento por robot, control de alimentación de material, etc.).

25

DESCRIPCIÓN DETALLADA

30 La Figura 1 es un diagrama de bloques lógico de un sistema de procesamiento de materiales que incorpora la formación de imágenes coherentes en línea (ICI) y el control de retroalimentación. El sistema cuenta con un procesador de material 10 que implementa un proceso de modificación de material. El procesador de material 10 comprende una fuente de haz de procesamiento de material 12 que produce un haz de procesamiento de material 14 que, a su vez, modifica una muestra situada en una ubicación de muestra 16. También se ilustra una fuente óptica de formación de imágenes 18 que produce una luz de formación de imágenes 20, al menos un componente de la cual se introduce en un interferómetro óptico 22. El interferómetro 24 produce una salida de interferometría 24 que se introduce en un controlador de retroalimentación 26. El controlador de retroalimentación 26 genera una retroalimentación 29 que se introduce en el procesador de material para controlar al menos un parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material.

40 El interferómetro óptico 22 produce la salida de interferometría utilizando al menos un componente de la luz de formación de imágenes 20 que se suministra a la ubicación de muestra 16. La línea 28 es una representación lógica de la interacción entre el interferómetro óptico 22 y la ubicación de muestra 16. La salida de interferometría 24 se basa en la longitud de al menos una trayectoria óptica hacia la ubicación de muestra comparada con la longitud de otra trayectoria óptica. Las trayectorias ópticas no se representan en la figura por motivos de claridad, pero, más adelante, se describen varios ejemplos. La ubicación de muestra es la ubicación desde la cual se recoge la luz de formación de imágenes reflejada. La ubicación de muestra puede seleccionarse de entre varias opciones para lograr diferentes objetivos de formación de imágenes. Por ejemplo, en algunas realizaciones, la ubicación de muestra es la ubicación física de la muestra de material que está siendo procesada. En algunas realizaciones, la ubicación de muestra está cerca de la ubicación física de la muestra de material que se está procesando. En algunas realizaciones, la ubicación de la muestra es una posición seleccionada para producir información significativa sobre el procesamiento del material.

50 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, la salida de interferometría en múltiples instancias se procesa para identificar cambios en la salida de interferometría con respecto al material que está siendo procesado. En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, al menos una parte del control de retroalimentación es una función de tales cambios. En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, los cambios en los datos de interferometría se utilizan para proporcionar una indicación de la "velocidad" de modificación/movimiento de la muestra u otros índices de cambio.

60 En un ejemplo específico de procesamiento de los datos de interferometría para identificar cambios, el controlador de retroalimentación está configurado, además, para determinar si la salida de interferometría inicialmente comprende sustancialmente solo la luz reflejada a lo largo de una trayectoria de referencia (trayectoria de referencia que puede extenderse a lo largo de un brazo de referencia en caso de que haya uno o a lo largo del brazo de muestra) después de lo cual la salida de interferometría se basa en la longitud de una trayectoria de muestra en comparación con la longitud de la trayectoria de referencia. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando la ubicación de muestra inicialmente presenta solo una superficie/subsuperficie reflectante (sin brazo de referencia) o ninguna superficie/subsuperficie reflectante (con brazo de referencia), y, después de que el material haya sido modificado y/o movido con respecto a la óptica de formación de imágenes, se detecta, en algún momento, una superficie/subsuperficie reflectante adicional.

65

5 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación está configurado, además, para determinar el momento en que la salida de interferometría realiza una transición pasando de comprender sustancialmente solo la luz reflejada a lo largo de una trayectoria de referencia (trayectoria de referencia que puede extenderse a lo largo de un brazo de referencia en caso de que haya uno o a lo largo del brazo de muestra) a basarse en la longitud de la trayectoria de muestra en comparación con la longitud de la trayectoria de referencia. El controlador de retroalimentación genera al menos una señal que influye en al menos un parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material basándose en la salida de interferometría teniendo en cuenta la transición.

10 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación 26 es un controlador en tiempo real que controla el parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material durante el proceso. En otros ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación controla al menos un parámetro de procesamiento durante intervalos entre procesos sucesivos.

15 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, la fuente de haz de procesamiento de modificación de material es un láser, tal como un láser de estado sólido, un láser de fibra o un láser de gas.

20 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, la fuente de haz de procesamiento de modificación de material genera un haz de iones y/o un haz de electrones.

25 El material procesado mediante dicho sistema puede ser, por ejemplo, uno o más de entre un metal, un semiconductor, un dieléctrico, un tejido biológico duro, un tejido biológico blando, un plástico, un caucho, madera, un compuesto. Son posibles otros materiales.

30 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el interferómetro dispone de un combinador y dos brazos distintos, denominados brazo de referencia y brazo de muestra. Un primer componente de la luz de formación de imágenes se aplica a una entrada del brazo de referencia, dando lugar a una señal de salida del brazo de referencia. Un segundo componente de la luz de formación de imágenes se aplica al brazo de muestra, dando lugar a una señal de salida del brazo de muestra. Al menos un componente de la señal de salida del brazo de muestra incluye reflexiones del componente de la luz de formación de imágenes procedente de la ubicación de muestra. El combinador combina la señal de salida del brazo de referencia y la señal de salida del brazo de muestra para producir una señal combinada que funciona como la salida de interferometría. Dependiendo de la implementación, el combinador puede ser un acoplador, un circulador o un divisor, pudiendo utilizarse cualquier componente que realice la función de combinación.

35 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el sistema también comprende un detector de señales que produce un interferograma a partir de la salida de interferometría. En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el detector de señales se presenta en forma de una matriz de elementos detectores. Un ejemplo específico es una cámara lineal. Otros ejemplos de dicho detector de señales se describen más adelante en el marco de implementaciones de ejemplo detalladas específicas.

40 Otro ejemplo, no cubierto por la presente invención tal como se reivindica, de un detector de señales que produce un interferograma a partir de la salida de interferometría es un par de fotodiodos equilibrados amplificados. Otros ejemplos de dicho detector de señales se describen más adelante en el marco de implementaciones de ejemplo detalladas específicas.

45 Puede haber múltiples brazos de muestra, con múltiples reflectores en la ubicación de muestra. Dichos brazos de muestra comparten componentes ópticos comunes en la transmisión de reflexiones de la muestra al combinador, pero las longitudes de las trayectorias ópticas son diferentes. Algunos de los brazos de muestra pueden ser reflectores subsuperficiales.

50 En cualquier caso, en el que se generen múltiples interferogramas, estos múltiples interferogramas son luego utilizados por el controlador de retroalimentación 26 en la generación de la retroalimentación 28 para controlar el procesador de material 10.

55 Cabe recordar que la salida de interferometría se basa en la longitud de al menos una trayectoria óptica hasta la ubicación de muestra en comparación con la longitud de otra trayectoria óptica. En algunas realizaciones, la "otra trayectoria óptica" es simplemente una trayectoria óptica diferente a la muestra. Efectivamente, las dos trayectorias comparadas por el interferómetro en este caso son dos trayectorias hacia diferentes reflectores de la misma muestra. En este caso, la luz de formación de imágenes atravesará la misma trayectoria óptica, pero con pequeñas diferencias entre las ubicaciones de los reflectores en la ubicación de muestra.

Según la presente invención, la al menos una longitud de trayectoria corresponde al menos a dos longitudes de trayectoria hasta los respectivos reflectores en la ubicación de muestra, y la otra longitud de trayectoria se extiende a lo largo de un brazo de referencia.

- 5 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación está configurado, además, para determinar si la salida de interferometría inicialmente comprende sustancialmente solo la luz reflejada a lo largo de una trayectoria de referencia (trayectoria de referencia que puede extenderse a lo largo de un brazo de referencia en caso de que haya uno o a lo largo del brazo de muestra) después de lo cual la salida de interferometría se basa en la longitud de una trayectoria de muestra en comparación con la longitud de la trayectoria de referencia. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando la ubicación de muestra inicialmente presenta solo una superficie/subsuperficie reflectante (sin brazo de referencia) o ninguna superficie/subsuperficie reflectante (con brazo de referencia), y, después de que se haya eliminado el material, se detecta, en algún momento, una superficie/subsuperficie reflectante adicional.
- 10
- 15 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación está configurado, además, para determinar el momento en que la salida de interferometría realiza una transición pasando de comprender sustancialmente solo la luz reflejada a lo largo de una trayectoria de referencia (trayectoria de referencia que puede extenderse a lo largo de un brazo de referencia en caso de que haya uno o a lo largo del brazo de muestra) a basarse en la longitud de la trayectoria de muestra en comparación con la longitud de la trayectoria de referencia. El controlador de retroalimentación genera al menos una señal que influye en al menos un parámetro de procesamiento del proceso de modificación del material basándose en la salida de interferometría teniendo en cuenta la transición.
- 20
- 25 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el procesador de retroalimentación realiza un análisis basándose en la salida de interferometría para producir una medición de profundidad que refleje la profundidad a la que el haz de procesamiento de material ha penetrado en la ubicación de muestra. En algunas de tales realizaciones, el controlador de retroalimentación controla al menos un parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material basándose en la medición de profundidad.
- 30 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación realiza un análisis basándose en la salida de interferometría y genera un control de retroalimentación que controla la profundidad de procesamiento (por ejemplo, corte) con respecto a una interfaz que está más cerca de la ubicación de procesamiento.
- 35 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación realiza un análisis basándose en la salida de interferometría y genera un control de retroalimentación que controla la profundidad de procesamiento (por ejemplo, profundidad de corte) con respecto a una interfaz que está más allá de la profundidad de procesamiento actual.
- 40 Debe entenderse que cualquier parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material puede ser controlado por el controlador de retroalimentación. Ejemplos específicos incluyen:
- el estado de encendido/apagado del haz de procesamiento de material;
 - 45 la potencia media del haz de procesamiento de material;
 - la duración del pulso del haz de procesamiento de material;
 - la intensidad máxima del haz de procesamiento de material;
 - 50 la densidad del haz de procesamiento de material;
 - la energía del haz de procesamiento de material;
 - 55 las especies de partículas del haz de procesamiento de material;
 - la longitud de onda del haz de procesamiento de material;
 - la frecuencia de repetición de pulsos del haz de procesamiento de material;
 - 60 la energía del pulso del haz de procesamiento de material;
 - la forma del pulso del haz de procesamiento de material
 - 65 la velocidad de escaneado del haz de procesamiento de material;

el diámetro focal del haz de procesamiento de material;

la posición focal del haz de procesamiento de material;

5 el patrón espacial del haz de procesamiento de material en la muestra;

el caudal de alimentación de material;

10 el caudal del medio refrigerante;

el caudal del gas de protección/asistencia;

la presión del gas de protección/asistencia;

15 la mezcla de gas de protección/asistencia;

los parámetros del proceso de soldadura por arco (tales como la tensión, la corriente y la velocidad de alimentación del hilo), cuando la soldadura es soldadura por arco/láser híbrida;

20 y

el caudal de alimentación del material aditivo (por ejemplo, en soldadura fuerte).

25 En un ejemplo específico, el controlador de retroalimentación controla al menos un parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material basado en la medición de profundidad controlando el haz fuente de modificación de material para que se apague cuando la medición de profundidad indique una profundidad específica.

30 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación comprende un procesador de interferograma que realiza un análisis basado en la salida de interferometría para producir una indicación del momento en que el haz fuente de modificación de material ha penetrado a una profundidad especificada que puede ser, por ejemplo, absoluta o relativa con respecto a una superficie o interfaz asociada con el material. En algunas de tales realizaciones, el controlador de retroalimentación controla la fuente del haz de procesamiento de material para apagar el haz de procesamiento de material basándose en la indicación del momento en que el láser ha penetrado hasta la profundidad especificada.

35 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación comprende un procesador de interferograma que realiza un análisis basado en la salida de interferometría para producir una indicación de la proximidad de la región del material que está siendo modificado en ese momento a otras regiones del material.

40 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el controlador de retroalimentación comprende un procesador de interferograma que realiza un análisis basado en la salida de interferometría para producir una indicación de la cantidad restante de material que debe penetrarse.

45 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el procesador de interferograma realiza un análisis basado en la salida de interferometría para producir una indicación de la presencia de material a una profundidad especificada, y el controlador de retroalimentación controla la fuente del haz de procesamiento de material para encender el haz de procesamiento de material basándose en dicha indicación. Las Figuras 6 y 7 son dos ejemplos específicos de un sistema de este tipo que presenta un circulador óptico y un fotodetector equilibrado.

50 Estas figuras se describen a continuación.

La Figura 2 muestra una implementación parcial de un controlador de retroalimentación. Se muestra un detector de señales 30 que recibe la salida de interferometría 18 y genera un interferograma medido 32. Un procesador de interferograma 34 recibe el interferograma medido 32. Se proporciona una memoria 36 en la que se almacena un interferograma sintetizado precalculado 37 para un resultado objetivo. El procesador de interferograma 34 procesa el interferograma medido junto con el interferograma sintetizado precalculado 37 para producir un resultado de correlación 38. El controlador de retroalimentación controla al menos un parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material basándose en el resultado de correlación que es una medida de similitud del interferograma medido 32 y el interferograma sintetizado 37.

60 El interferograma sintetizado precalculado para un resultado objetivo se precalcula de manera que esté inmediatamente disponible para su correlación con el interferograma medido. Se sintetiza en el sentido de que se determina únicamente a partir de cálculos, sin que intervengan señales ópticas en su generación.

En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el interferograma sintetizado precalculado para un resultado objetivo es una estimación de lo que se espera cuando el haz de procesamiento de material alcanza una profundidad especificada.

5 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el procesador de interferograma produce el resultado de correlación multiplicando el interferograma medido por el interferograma precalculado sobre la base de un elemento de detección y luego sumando.

10 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, al menos uno del interferograma sintetizado precalculado y el interferograma medido está conformado para compensar al menos uno de:

la alineación del espectrómetro;

15 la no linealidad del ángulo de rejilla del espectrómetro;

la distorsión de la formación de imágenes debido a la óptica de formación de imágenes del espectrómetro;

el remuestreo de la longitud de onda en términos de número de onda/frecuencia;

20 el tamaño finito del área activa del detector;

la forma de la envolvente espectral;

25 el desajuste de la dispersión; y

una otra no idealidad contenida en el interferograma que degrada la calidad de la imagen.

30 La compensación puede conseguirse, por ejemplo, mediante una modulación controlada de la fase y amplitud complejas de los elementos individuales del interferograma sintetizado. La cantidad de modulación puede determinarse a partir de al menos uno de entre los procedimientos de calibración experimental del aparato, modelización matemática de la propagación óptica, análisis teórico de la respuesta del sistema y una combinación de los anteriores. El procedimiento exacto depende de la no idealidad específica que se desea compensar.

35 Un ejemplo específico es la dispersión. Para un elemento dispersivo fijo, el desfase/avance relativo de cada longitud de onda derivado de los términos dispersivos del material puede añadirse a cada elemento en el interferograma sintetizado. La dispersión progresiva (es decir, la dispersión intrínseca en la muestra) también puede ser compensada debido a que el interferograma sintético puede ser calculado de manera diferente para cada profundidad que se va a medir.

40 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el resultado de la correlación se procesa para identificar el momento en que el haz de procesamiento de material ha alcanzado una profundidad especificada. Esto puede conseguirse, por ejemplo, determinando el momento en que el resultado de la correlación supera un umbral.

45 En algunos ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, el sistema incluye, además, un sintetizador de interferograma que sintetiza el interferograma sintetizado precalculado.

50 Otro ejemplo, no cubierto por la presente invención tal como se reivindica, proporciona un sistema de control de retroalimentación para su uso con un sistema de procesamiento de materiales que implementa un proceso de modificación de material, comprendiendo el sistema de procesamiento de materiales un puerto de cámara. Un sistema de control de retroalimentación de este tipo comprende la funcionalidad de la Figura 1, sin incluir el procesador de material. En este caso, el interferómetro óptico 22 interactúa con el procesador de material 10 a través de un puerto de cámara, no mostrado. La retroalimentación 28 se proporciona desde el controlador de retroalimentación 26 a otra entrada del procesador de material 10.

55 Los ejemplos no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, descritos anteriormente, pueden utilizarse, por ejemplo, para medir la geometría, morfología, dispersión óptica y/o composición de un material antes, durante y/o después del procesamiento por un haz de modificación de material, tal como un láser. En algunas realizaciones, puede proporcionarse información de retroalimentación sobre la geometría/morfología/composición del material (tal como, orificio, corte, características estáticas o dinámicas de la subsuperficie, y/o profundidad del baño de fusión) y dicha información puede utilizarse, ya sea directa o indirectamente, para controlar el proceso de modificación de material, tal como un proceso de modificación por láser.

65 En algunos materiales, los sistemas descritos en el presente documento pueden detectar elementos de la geometría del material en el que se está trabajando y su posición en relación con otros elementos de la geometría del material que se encuentran por debajo de la superficie con la que interactúa el haz de modificación. En algunos casos, esta

información se utiliza para guiar la modificación dentro de los márgenes prescritos de la geometría subsuperficial, incluso cuando la ubicación precisa de dicha geometría puede haber sido previamente desconocida y/o no caracterizada. En algunas realizaciones, la profundidad de un corte con láser en el hueso se mide de tal manera que la modificación por láser puede detenerse a una determinada distancia antes de que penetre en una capa subsuperficial del hueso de interés. Esto puede resultar útil para proporcionar márgenes seguros en la cirugía láser. En algunas realizaciones, tales márgenes/retroalimentación se consiguen utilizando análisis de los datos de metrología, en algunas realizaciones, utilizando técnicas que son manuales, automáticas o alguna combinación de ambas.

Se proporcionan aparatos, procedimientos y sistemas que detectan cambios a nivel de la subsuperficie, tales como, entre otros, cambios de temperatura, cambios de estado, flujo de fluido y/u ondas de presión, que, en algunas realizaciones, pueden utilizarse, además, para informar sobre el proceso de exposición al láser. Estos cambios se determinan basándose en una comparación/un análisis de múltiples interferogramas medidos. La fase del interferograma es sensible al movimiento de la muestra en el orden de unos pocos nanómetros. Ligeros cambios de temperatura, presión, flujo y estado provocan movimientos del tejido que modifican esta fase. Además, las imágenes coherentes tienen un "patrón de moteado" característico que es el resultado parcial de la creación de un patrón de interferencia interno por parte de los componentes microscópicos/nanoscópicos de la muestra. Este patrón de moteado también es extremadamente sensible a los cambios mencionados anteriormente. En algunas realizaciones, los cambios en la subsuperficie se observan durante el procesamiento por láser de velocidades variables analizando la frecuencia del cambio en el patrón de moteado.

En algunos casos, el dispositivo descrito se utiliza para realizar un seguimiento de los elementos del baño de fusión en el proceso de soldadura por láser. El experto en la materia apreciará que la estabilidad del baño de fusión (y/o del ojo de cerradura) y la profundidad de penetración pueden ser un indicador de la calidad de una soldadura por láser. Algunos casos se utilizan para medir estos y/u otros indicadores y, en algunas realizaciones, con el fin de regular el proceso de soldadura, ayudar al desarrollo del proceso de soldadura o producir datos de garantía de calidad para la totalidad o parte del proceso.

La fuente de luz de formación de imágenes puede ser una fuente de luz con un espectro centrado en una longitud de onda, λ_0 , que puede situarse entre 300 y 15000 nm y puede tener una anchura, $\Delta\lambda$, que puede proporcionar una resolución axial, δz , que puede representarse mediante la siguiente relación:

$$\delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

En otros casos, la fuente de luz de formación de imágenes puede consistir en diodos superluminiscentes, diodos láser, diodos emisores de luz, osciladores ópticos ultrarrápidos, amplificadores ópticos semiconductores y lámparas halógenas, si bien las personas con conocimientos ordinarios en la técnica entenderán que pueden utilizarse otras fuentes de luz apropiadas. En otras realizaciones, la fuente de luz puede incluir un diodo superluminiscente (SLD) que, en algunas realizaciones, tiene un espectro de emisión que oscila entre 1100 nm y 1400 nm o, en realizaciones alternativas, un oscilador Ti:AlO₃ que, en algunas realizaciones, tiene un espectro de emisión que oscila entre 750 nm y 900 nm. En algunas realizaciones, dependiendo de la tecnología de detector posterior seleccionada, puede utilizarse una fuente de luz con un estrecho ancho de línea instantáneo que sea rápidamente barrido a través de la banda espectral definida por λ_0 y $\Delta\lambda$ en lugar de, o junto con, las otras fuentes mencionadas.

En otros casos, pueden incluirse fuentes de luz adicionales para la modificación del material. Estas fuentes pueden tener espectros en la región de 200 nm a 15000 nm y, en algunas realizaciones, pueden ser continuas o, en otras realizaciones, pulsadas en su emisión. En realizaciones que tienen emisiones pulsadas, pueden utilizarse energías de pulso que oscilan entre 1 nJ y 1 MJ y duraciones de pulso que oscilan entre 1 fs y 30 minutos.

Un detector de señales (que puede ser un detector único o una combinación de detectores) puede detectar las intensidades de las diferentes longitudes de onda de la luz de interés. Esto puede implicar el uso de elementos difractivos para dispersar el espectro espacialmente sobre una matriz de detectores. De manera alternativa, el detector de señales puede ser un fotodetector equilibrado o no equilibrado conocerse si el momento de llegada de los componentes del espectro es simultáneo o disperso en el tiempo.

Pueden incluirse componentes electrónicos capaces de medir e interpretar la señal detectada. En este punto de la cadena de procesamiento de la información, la señal ya no es óptica. En algunas realizaciones, estos pueden incluir, entre otros, hardware de cámara integrada, captadores de fotogramas, matrices de puertas programables en campo, circuitos integrados de aplicación específica, ordenadores personales y tarjetas de adquisición de datos. El hardware electrónico puede seleccionarse para complementar el esquema de retroalimentación y los procedimientos o algoritmos empleados.

Algunos casos incluyen software y/o hardware almacenado en un medio de almacenamiento legible por ordenador apropiado que implementa procedimientos o algoritmos capaces de identificar la posición del fondo del orificio y/o las

interfaces subsuperficiales y/o los cambios de interés en los datos de formación de imágenes y pueden calcular métricas y parámetros de control basados en sus posiciones, por ejemplo, sus posiciones absolutas o relativas.

La Figura 3 es un diagrama de bloques de un aparato en el que un láser de modificación (FL) 100 también sirve como fuente de luz de formación de imágenes. De este modo, la alineación de los haces de formación de imágenes y de procesamiento es automática. Por el contrario, los ejemplos de las Figuras 1 y 4, 5, 6, 7, 14, 17, 18, 19 no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, presentan una fuente de haz de procesamiento de material y una fuente óptica de formación de imágenes. Se utiliza un interferómetro de Michelson de espacio libre que incluye un divisor de haz (BS) 102, un compensador de dispersión (DC) 104, un espejo de referencia (RM) 106, espejos galvanométricos (GM) 107 y un objetivo 116 para enfocar la luz sobre la muestra 112. La detección se lleva a cabo mediante un espectrómetro que comprende una rejilla (GR) 114, una lente (ASL) 116 y una matriz de fotodetectores (IGALC) 118. El PC 122 y el capturador de fotogramas (FG) 120 implementan los componentes electrónicos y algorítmicos de los aparatos, procedimientos y sistemas descritos en el presente documento. El PC 122 controla el láser de modificación 100 y/u otros aspectos del proceso de modificación a través de la trayectoria de retroalimentación 124 y, en este caso, funciona como controlador de retroalimentación.

La Figura 4 es un diagrama de bloques de una primera implementación detallada. En esta implementación, se muestran fuentes de luz de modificación (ML) 200 y formación de imágenes (SLD) 204 separadas. En esta implementación, las dos trayectorias de luz se combinan mediante una óptica dicróica u otra óptica de combinación (DM) 206 tras objetivos focales independientes 208, 210. En esta implementación, el interferómetro puede construirse en fibra óptica monomodo o, en otras realizaciones, en fibra óptica multimodo. La detección se realiza mediante un detector espectral de alta velocidad (HSS) 212. Si bien la implementación mostrada presenta una relación de división de potencia 214 de 50:50 entre el brazo de muestra 216 y el brazo de referencia 218, en otras realizaciones son posibles otras relaciones de división en el interferómetro y pueden depender de la disponibilidad de potencia óptica y/o de la necesidad de sensibilidad de detección. En algunos casos, pueden ser posibles otras configuraciones de interferómetro, por ejemplo, Mach-Zehnder, Sagnac, trayectoria común, etc. Aunque en esta realización se muestra que el DM 206 refleja la luz de formación de imágenes y transmite la luz de modificación, también puede ser posible lo contrario. En algunas realizaciones puede producirse la combinación de los haces mediante ópticas sensibles a la polarización o de reflexión neutra. El experto en la materia entenderá que la electrónica de detección, procesamiento y retroalimentación se omite en la realización mostrada en esta figura y que dichas etapas de procesamiento pueden realizarse dentro del controlador de retroalimentación. El controlador de retroalimentación 214 recibe la salida del HSS 212 y controla el láser de modificación 206 y/o algún otro aspecto del proceso de modificación del material.

La Figura 5 es un diagrama de bloques de una segunda implementación detallada. En esta implementación, se crea una fuente de banda ancha de alta potencia acoplando pulsos cortos, optimizados para dispersión, emitidos por la fuente de banda ancha 300 en una longitud de fibra óptica monomodo 310. Esto da como resultado un ensanchamiento del ancho de banda espectral, en algunos ejemplos, del orden de un factor de 6, aunque en otros ejemplos es posible un ensanchamiento mayor o menor. La realización que se muestra en este caso presenta una fuente láser de Ti:AIO_3 301 que funciona en la región de 650 a 1100 nm. En otros ejemplos, son posibles intervalos espectrales de 300 a 15000 nm de otras fuentes de formación de imágenes ópticas. En esta realización, se muestran un polarizador Glan-Taylor (GTP) 302, un aislador óptico de Faraday (ISO) 304, un control de polarización de placa $\lambda/2$ de media onda 305 y una compensación de dispersión de prisma de horquilla 306. En otros ejemplos, otras fuentes de banda ancha (tales como diodos superluminiscentes, otros láseres y/u otros procedimientos de ampliación) pueden sustituirse por la fuente láser de Ti:AIO_3 ensanchada.

En esta implementación, el láser de modificación (ML) 320 pasa a través del colimador 351 y el haz de formación de imágenes pasa a través del colimador de brazo de muestra 353, después de lo cual el haz láser de modificación y el haz de formación de imágenes se combinan mediante un componente óptico (DM) 312 antes de que ser enfocados por un objetivo focal común 314.

En tales implementaciones, la lente puede ser acromática, esférica y/o cónica (es decir, axiónica). Esta combinación de haces puede enfocarse a través de una boquilla opcional 316 que puede utilizarse para aplicar fluidos de asistencia (por ejemplo, gas comprimido, por ejemplo, pulverización de agua) al proceso de modificación. La pulverización de la boquilla también puede ser independiente del haz óptico, es decir, ambos se suministran a la muestra desde diferentes puntos. El interferómetro de Michelson incluye el divisor 50:50 322 (aunque en otras realizaciones, pueden utilizarse otras relaciones de división), el colimador de brazo de referencia 355 y el espejo de referencia 326. También se muestran los controladores de polarización 324, 325, 330. La detección espectral en esta realización utiliza un espectrómetro de rejilla reflectante 318 acoplado a fibra. En algunos ejemplos, un espejo adicional delante de la lente (ASL) 321 puede permitir que el haz se aproxime y salga de la rejilla reflectiva 318 lo más cerca posible de la configuración Littrow, mejorando la eficiencia de la difracción. En algunos ejemplos, puede utilizarse una rejilla de transmisión y/o una rejilla múltiple y/o un espectrómetro Fabry-Perot. Una cámara lineal de silicio 330 produce un interferograma que se pasa a la electrónica de procesamiento de imágenes 332, cuya salida se pasa al controlador de retroalimentación 334. El controlador de retroalimentación 334 produce una retroalimentación 336 para controlar el láser de modificación 320 o algún otro aspecto del proceso de modificación.

La correcta alineación y conformación del haz de la luz de modificación y formación de imágenes pueden ser beneficiosas para la calidad y utilidad de los datos de formación de imágenes y el control de retroalimentación. En algunas realizaciones, puede ser deseable obtener imágenes de una característica de alta relación de aspecto, tal como un orificio que está siendo perforado. En tales casos, un procedimiento de alineación (en algunas realizaciones utilizando un combinador de haz de espejo dicróico para la luz de formación de imágenes y modificación) reúne los dos haces sustancialmente en el mismo punto de la superficie reflectiva del combinador. En tales realizaciones, es beneficioso un control de haz adecuado de los dos haces (uno o más espejos). Cuando los dos haces emanan del mismo punto de la óptica de combinación, pueden enfocarse a través de una lente acromática adecuada (u otro diseño). En algunas realizaciones, el ajuste de la óptica de combinación puede verse facilitado por el uso de un detector de matriz o agujero de alfiler (en algunas realizaciones realizado por el propio láser de modificación) situado en el plano focal de la lente, de modo que ambos haces se enfoquen sustancialmente en el mismo punto. En algunas realizaciones, esto puede utilizarse para hacer coincidir la longitud del brazo de referencia del interferómetro de modo que el centro del volumen focal se sitúe la posición deseada en el campo de visión de la imagen. Esta posición puede seleccionarse en función de la aplicación de modificación en cuestión y, además, puede ajustarse a lo largo del proceso de modificación. En otras realizaciones, tales como aquellas en las que no se utiliza una lente focal común, puede ser beneficioso que el rayo central de todos los haces coincida en la óptica de combinación. Además, puede ser deseable desplazar las posiciones focales de los haces de formación de imágenes y de modificación independientemente unos de otros, para formar imágenes de/modificar de manera más eficaz las profundidades seleccionadas. En algunas realizaciones, esto puede lograrse ajustando la divergencia de los haces de formación de imágenes o de modificación antes de que alcancen la lente de enfoque común. Por ejemplo, la divergencia del haz de formación de imágenes puede aumentarse disminuyendo la distancia entre la lente colimadora del brazo de muestra y la punta de la fibra.

El tamaño del punto focal de los haces de formación de imágenes y de modificación puede afectar a la calidad de los resultados de la formación de imágenes. Debe considerarse cuidadosamente la relación de aspecto de la morfología y la apertura numérica del haz de formación de imágenes. En realizaciones en las que el haz de formación de imágenes es mucho más pequeño transversalmente que el orificio, los datos de formación de imágenes resultantes pueden mostrar una clara marca del fondo del orificio y de las interfaces situadas debajo del mismo. Sin embargo, en tales realizaciones, el intervalo práctico de formación de imágenes puede estar limitado por el corto intervalo de Raleigh presente en un haz de alta apertura numérica. En algunas realizaciones, se emplea una apertura numérica para rechazar las señales que emanan de las paredes laterales del orificio. En tales realizaciones, si partes de la periferia de un orificio/incisión se iluminan en una muestra que es (cuasi)transparente y son captadas por el sistema de formación de imágenes, las señales correspondientes pueden complicar los datos de la formación de imágenes y dificultar el uso de los datos por parte de un algoritmo automático para la retroalimentación. Sin embargo, en realizaciones en las que la muestra no es transparente, puede resultar beneficioso contar con una alguna iluminación de las paredes laterales, ya que dicha señal puede proporcionar información sobre la anchura del corte, la deposición de la refundición y la profundidad del volumen de material.

En algunas realizaciones, los componentes ópticos se combinan (en algunas realizaciones, el retardo de grupo y los términos de dispersión de orden superior) en los brazos de muestra y de referencia para reducir cualquier desajuste de dispersión entre los dos brazos. Esto puede mejorar la resolución axial de la formación de imágenes. También puede resultar beneficioso cambiar esta compensación de dispersión en el brazo de referencia para igualar la dispersión adicional causada por el material presente en la muestra.

El desajuste de dispersión puede añadirse intencionadamente al interferómetro y los algoritmos de procesamiento de imágenes pueden modificarse para aumentar el intervalo efectivo de formación de imágenes del sistema utilizando técnicas de intervalo completo codificadas por dispersión tales como las descritas por Hofer y col. (Bernd Hofer, Boris Povazay, Angelika Unterhuber, Ling Wang, Boris Hermann, Sara Rey, Gerald Matz y Wolfgang Drexler, Optics Express 18, 4898-919 [2010]).

Cuando se obtienen imágenes de una muestra, puede tenerse en cuenta el grado de carbonización que puede crear el láser de modificación. Los láseres que causan grandes cantidades de carbonización pueden reducir la profundidad de la formación de imágenes (y la observación previa para la perforación, etc.). Puede resultar beneficioso seleccionar láseres con carbonización reducida (pulsos ultracortos, longitudes de onda centrales de 3000 nm, 9600 nm, etc.).

Pueden utilizarse procedimientos y algoritmos para procesar los datos brutos y/o proporcionar parámetros de retroalimentación, y pueden incluir etapas de sustracción del espectro de fondo, remuestreo/interpolación entre los píxeles del espectrómetro, longitudes de onda y/o espacio de frecuencias, eualización del ruido de fondo, transformada rápida de Fourier, autocorrelación de Kasai/desplazamiento Doppler y/u otros cálculos basados en la fase y/o separación de las franjas de interferencia. Dichos procedimientos pueden implementarse en hardware y/o software que se ejecuta en uno o más procesadores. En algunas realizaciones se emplea un análisis del patrón de moteado y/o de los cambios del mismo para indicar la diferenciación del tejido, la dinámica de calentamiento temporal y/u otras características de la muestra. Estos análisis pueden realizarse, por ejemplo, calculando la variación espacial o temporal del moteado y su amplitud. Dichos procedimientos y algoritmos se utilizan en algunas realizaciones para evaluar la profundidad del daño térmico que se ha producido, se está produciendo y/o se producirá en el futuro. También son posibles procedimientos de extracción de señales que prescinden de muchas de las etapas anteriores. En una realización, puede precalcularse un conjunto de formas de onda homodinas o heterodinas basándose en una

o varias diferencias de longitud de trayectoria óptica simuladas, no linealidades/no idealidades del espectrómetro, conversiones de longitud de onda a número de onda/frecuencia, desajustes de dispersión de uno o varios órdenes en el interferómetro, desplazamientos Doppler, formas espectrales no ideales y otros ajustes de los datos de formación de imágenes. Los conjuntos de dichas formas de onda homodinas/heterodinas pueden multiplicarse por los datos recogidos por el hardware o software para determinar la información de la formación de imágenes en uno o más de los vóxeles del espacio de formación de imágenes. Este resultado puede obtenerse debido a la ortogonalidad y/o cuasi-ortogonalidad de las diferentes frecuencias de franja de interferencia presentes en los datos adquiridos. A continuación, se describen ejemplos detallados de este enfoque. En algunas realizaciones, los procedimientos y algoritmos pueden proporcionar ahorros computacionales en comparación con otros procedimientos que utilizan, por ejemplo, transformadas rápidas de Fourier. Esto puede ser deseable para aplicaciones de retroalimentación en tiempo real donde una respuesta rápida generalmente proporciona mejores resultados del proceso. El procesamiento puede, en algunas realizaciones, utilizar el conjunto de datos del espectro completo o, en otras realizaciones, utilizar una subsección del conjunto de datos.

En realizaciones que utilizan una subsección del conjunto de datos, esto puede reducir el tiempo de procesamiento y puede proporcionar una resolución axial más baja, que puede ser útil para una variedad de propósitos de retroalimentación. El filtrado homodino/heterodino también puede tener aplicaciones en el procesamiento general de imágenes en las variantes del dominio de Fourier de la tomografía de coherencia óptica, donde el gran número de cálculos de post-procesamiento y/o en tiempo real (incluyendo interpolación, compensación de dispersión digital, conformación espectral, etc.) pueden comprometer la eficiencia computacional del sistema. Aunque no se limitan a este caso, tales realizaciones pueden resultar útiles en situaciones en las que la formación de imágenes se dirige a una subsección de la profundidad de campo completa.

En algunos casos, resulta beneficioso obtener la(s) forma(s) de onda homodina midiendo un interferograma real cuando una interfaz se encuentra a una(s) profundidad(es) específica(s) en la imagen. La(s) forma(s) de onda homodina compleja(s) puede(n) obtenerse desplazando la interfaz optomecánicamente mediante el movimiento de la interfaz, ópticamente con ópticas de desplazamiento de fase y/o mediante procesamiento digital, que puede utilizar transformadas de Hilbert y otros procedimientos. A continuación, pueden aplicarse etapas adicionales de conformación (que pueden incluir eliminación de ruido, cálculo de promedios y conformación de envolventes) para optimizar aún más estas formas de onda. En algunos casos, el perfil espectral se conforma mediante procedimientos digitales, ópticos (incluidos, entre otros, bloqueo mecánico, ajuste de polarización, filtrado de densidad neutra, filtrado de interferencias, elementos Fabry-Perot) u otros procedimientos para cambiar la función de dispersión de puntos efectiva del algoritmo a fin de optimizarla para el uso de retroalimentación. Por ejemplo, puede aplicarse digitalmente un perfil espectral no gaussiano a la forma de onda homodina/heterodina para crear lóbulos adicionales en la función de dispersión de puntos. Estos lóbulos pueden diseñarse para proporcionar señales de "alerta temprana" o mínimos y máximos locales/globales estructurados para que se establezca el algoritmo de retroalimentación. Cuando la muestra es un material transparente o semitransparente, el espacio originalmente ocupado por el volumen de la muestra puede llenarse con aire a medida que el material es eliminado por el láser de modificación. Cuando la muestra tiene un índice óptico de refracción mayor que el del aire, a medida que se elimina el material, puede reducirse la longitud de la trayectoria óptica hasta cualquier reflector subsuperficial. Esto tiene el efecto de cambiar la profundidad aparente de dichos reflectores (en algunas realizaciones, más cerca y más lejos del punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero) a una velocidad que generalmente está relacionada con la velocidad de eliminación lineal de material y el índice óptico. Al utilizar una imagen en modo M ("modo de movimiento", que se muestra en ejemplos posteriores), la interfaz superficial y la interfaz subsuperficial se aproximan con la eliminación continua de material hasta que acaban encontrándose en el punto de perforación. La detección de la separación de las dos interfaces y el uso de dicha separación como entrada en un procedimiento o algoritmo de retroalimentación puede utilizarse para representar un margen quirúrgico que debe preservarse/monitorizarse. En el dominio de Fourier, estas dos interfaces pueden aparecer como dos frecuencias separadas que se acercan entre sí. Los aparatos y sistemas que implementan procedimientos y algoritmos que detectan el cambio en la diferencia de frecuencia entre las dos señales pueden comunicar dicha información a un controlador de proceso y/o usuario que puede controlar el corte.

La misma técnica puede aplicarse a cualquier sistema de procesamiento de materiales en el que múltiples interfaces indiquen características específicas de la muestra, y se desee controlar el procesamiento del material basándose en parte en mediciones de profundidad de dichas características.

La medición de las pendientes relativas puede medir el índice óptico de refracción efectivo del material que está siendo eliminado. Esto puede ser un indicador de la composición del material, que puede ser información útil para la retroalimentación. En algunas realizaciones, es posible detectar el momento en que el láser de modificación ha perforado un material y ha comenzado con el siguiente realizando el seguimiento de un cambio en la pendiente relativa.

Estos mismos principios también pueden aplicarse a situaciones en las que el material que llena el orificio es agua y/o materiales distintos del aire.

Puede añadirse un circulador al interferómetro entre la fuente y el divisor de fibra. Puede utilizarse un fotodetector equilibrado (además, o en lugar, del espectrómetro) para detectar las franjas de interferencia que se crean cuando la interfaz llega al punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero del interferómetro. En tales casos, el

fotodetector equilibrado puede tener velocidades de medición superiores a las de un conjunto de detectores o a la velocidad de barrido de un láser de bloqueo de modo en el dominio de Fourier (u otra fuente de barrido) y mejorar la respuesta de retroalimentación. Esto puede proporcionar una retroalimentación rápida, sencilla y económica para detectar la llegada de una interfaz a una determinada profundidad. Esto puede utilizarse para detectar la presencia de material a cierta distancia de la óptica del sistema. Es sabido por el experto en la materia que la eficacia de un haz láser enfocado puede depender de la distancia entre el foco y el material que se desea modificar. Esto puede utilizarse para proporcionar retroalimentación al sistema de procesamiento de materiales con una precisión de picosegundos. En algunos casos, esta retroalimentación puede utilizarse para permitir la emisión de energía de modificación solo cuando el material está presente en una zona de profundidad seleccionada (SDZ) que, en algunas realizaciones, puede estar relacionada con la zona focal del láser de modificación. La posición y el grosor de la SDZ pueden ajustarse mediante el control del espectro de la fuente de luz de formación de imágenes y la longitud del brazo de referencia. Esta sintonización puede ser ajustada en fábrica y/o ajustada dinámicamente por el operador. En algunas realizaciones, los haces de formación de imágenes y de modificación pueden acoplarse a una pieza de mano y la SDZ puede configurarse para colocarse con el foco del haz de modificación a determinada distancia del extremo distal de la pieza de mano. De este modo, la pieza de mano actúa como un análogo óptico del bisturí quirúrgico tradicional. La SDZ sería análoga al borde de la punta de la hoja del bisturí y puede utilizarse para realizar una incisión en el material que se encuentra en la SDZ.

Esto puede ofrecer una serie de ventajas que incluyen, entre otras, proporcionar una interfaz táctil que sea familiar para los cirujanos, reducir el uso total de energía láser y reducir la exposición total al láser del material y/o del paciente. El experto en la materia sabe que algunos tipos de modificación por láser de materiales pueden generar plasma sobre el material que dispersa y/o absorbe la energía láser. Mientras dicho plasma esté presente, la energía adicional aplicada puede no tener el efecto de modificación deseado y puede contribuir a aumentar las zonas afectadas por el calor. En algunas realizaciones, el plasma puede bloquear la luz de formación de imágenes, impidiendo así que las reflexiones del material activen el sistema de retroalimentación hasta que dicho plasma se haya disipado. Esto proporciona la ventaja de limitar la energía de aplicación de la modificación a menos que las condiciones del plasma cerca de la muestra sean favorables.

El control de retroalimentación puede utilizarse junto con un interruptor de operador (tal como un pedal), de modo que el operador pueda indicar su consentimiento para liberar energía de modificación cuando se cumplan las condiciones de retroalimentación optoelectrónica.

El control de retroalimentación puede efectuarse en la fuente de energía de modificación mediante un selector de impulsos ópticos, un control digital de pulsos de semilla, una modulación de bomba, un obturador, un modulador electroóptico, una célula de Pockles y/o un modulador acústico-óptico.

En la Figura 6 se representa una configuración específica que muestra el circulador óptico 350 y el fotodetector equilibrado 352. La salida del fotodetector equilibrado 352 se dirige al controlador de retroalimentación 354 que controla la fuente del haz de modificación.

En la Figura 7 se representa una versión de dos canales. La longitud de la trayectoria a lo largo del brazo de muestra de un canal es aproximadamente la misma que la del brazo de referencia, pero muy diferente de sus homólogos en el canal 2 (y canales adicionales, si están presentes) para evitar diafonias de la señal de interferencia.

Las Figuras 6 y 7 muestran ejemplos de sistemas que pueden utilizarse para detectar la presencia de material presente a una profundidad específica (10a). Las reflexiones de la luz de formación de imágenes que emana de la muestra y es captada por la óptica del sistema generarán una señal de interferencia en el fotodetector (equilibrado) cuando las longitudes de la trayectoria óptica de referencia y de la muestra coincidan.

La dispersión óptica inducida por una muestra que está siendo medida puede tener un efecto adverso sobre la resolución axial de imágenes coherentes. La muestra puede inducir un desplazamiento de fase dependiente de la longitud de onda en el patrón de interferencia que puede depender de la profundidad a la que se ha propagado la luz en la muestra. Para compensar estos efectos, puede utilizarse, por ejemplo, un algoritmo homodino/heterodino como el descrito anteriormente. Los coeficientes de dispersión de los materiales de la muestra pueden calcularse *a priori* o, en otras realizaciones, determinarse de forma iterativa. Puede comenzarse suponiendo que los desplazamientos de fase inducidos por la muestra aumentan linealmente al aumentar la penetración en la muestra. De esta manera, cada color (es decir, la medición de píxeles) en el detector puede tener un determinado desplazamiento de fase dictado por el color que es y la profundidad en la muestra desde la que la señal está regresando. Si el color medido por cada píxel y la profundidad asociada a cada forma de onda heterodinas/homodinas pueden conocerse *a priori*, esta distorsión puede estimarse y calcularse *a priori* e incorporarse a las formas de onda heterodinas/homodinas que se multiplican por la señal medida por el(los) detector(es). De manera alternativa, la medición de la señal óptica que se propaga a través del sistema también puede proporcionar información de desajuste de dispersión utilizada para la compensación. Puede prepararse una tabla de búsqueda de formas de onda heterodinas/homodinas antes de la sesión de formación de imágenes. La corrección de la dispersión puede aplicarse sin carga computacional adicional en tiempo real.

APARATO DE UMBRALIZACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE INTERFEROGRAMAS

Con referencia ahora a la Figura 8, se muestra un aparato de umbralización de la correlación de interferogramas. Se muestra un interferómetro 46 que produce una salida de interferometría 48. Se muestra un detector de señales 50 que recibe la salida de interferometría 48 y genera un interferograma medido 52. Un procesador de interferograma 54 recibe el interferograma medido. Se proporciona una memoria 56 en la que se almacena un interferograma sintetizado precalculado. El procesador de interferograma 54 procesa el interferograma medido junto con el interferograma sintetizado precalculado para producir un resultado de correlación 58. Un umbralizador 60 está configurado para determinar el momento en que el resultado de la correlación satisface un umbral.

El interferograma sintetizado precalculado para un resultado objetivo se precalcula de tal manera que está inmediatamente disponible para su correlación con el interferograma medido. Se sintetiza en el sentido de que se determina únicamente a partir de cálculos, y en su generación no intervienen señales ópticas. -Los detalles acerca de la forma en que este interferograma puede ajustarse *a priori* para realizar diversas compensaciones se han indicado anteriormente.

En algunos casos, se dispone de un respectivo interferograma sintetizado precalculado para cada uno de una pluralidad de resultados objetivo. El procesador de interferograma 54 procesa el interferograma medido junto con cada uno de los interferogramas sintetizados precalculados para producir un resultado de correlación respectivo. El umbralizador 60 determina el momento en que cada resultado de correlación alcanza un umbral respectivo.

En algunos casos, el interferograma sintetizado precalculado es un interferograma que representa una estimación de lo que se espera cuando se alcanza el resultado objetivo mediante un haz de modificación de material en la ubicación de muestra, y el interferograma medido está en relación con la ubicación de muestra. El procesador de interferograma produce el resultado de la correlación multiplicando el interferograma medido por el interferograma sintetizado precalculado sobre la base de cada longitud de onda y luego sumando.

En algunos casos, al menos uno del interferograma sintetizado precalculado y el interferograma medido se conforma para compensar al menos uno de:

- la alineación del espectrómetro;
- la no linealidad del ángulo de rejilla del espectrómetro;
- la distorsión de la formación de imágenes debido a la óptica de formación de imágenes del espectrómetro;
- el remuestreo de la longitud de onda en términos de número de onda/frecuencia;
- el tamaño finito del área activa del detector;
- la forma de la envolvente espectral;
- el desajuste de la dispersión; y
- una otra no idealidad contenida en el interferograma que degrada la calidad de la imagen.

Algunos casos presentan un sintetizador de interferograma que calcula el interferograma sintetizado precalculado.

En algunos casos, el resultado objetivo es una profundidad especificada alcanzada por el haz de modificación de material.

En algunos casos, el aparato dispone de un controlador de retroalimentación que controla una fuente de modificación de material para apagar el haz de modificación de material cuando el resultado de la correlación alcanza un umbral.

En algunos casos, el aparato dispone de un controlador de retroalimentación que controla una fuente de modificación de material para encender el haz de modificación de material cuando el resultado de la correlación alcanza un umbral.

En algunos casos, el aparato dispone de un sintetizador de interferograma que sintetiza el interferograma sintetizado precalculado.

GUIADO AUTOMÁTICO DE CORTE POR LÁSER DE TEJIDO DURO CON FORMACIÓN DE IMÁGENES COHERENTES EN LÍNEA

Uno o más de los sistemas y procedimientos descritos anteriormente y el software relacionado almacenado en medios de almacenamiento informático están configurados para guiar automática y/o manualmente la eliminación de tejido duro mediante irradiación láser.

- 5 En algunos casos, la base de la tecnología de formación de imágenes es la tomografía de coherencia óptica en el dominio espectral, pero en otras realizaciones, se emplean otras variantes (OCT de fuente de barrido, formación de imágenes de dominio de frecuencia óptica, OCT en el dominio del tiempo, etc.). Cabe observar que los artefactos de movimiento generados en la SD-OCT son favorables y la SD-OCT generalmente tiene un rechazo aceptable de la intensa luz de mecanizado.
- 10 En algunos casos, se utiliza formación de imágenes coherentes para medir rápidamente la información de profundidad y reflectividad de una muestra que está siendo mecanizada por láser. El haz de formación de imágenes es, a menudo, capaz de ver a través de eyecciones, plasma, luz intensa de formación de imágenes y más allá de la zona de modificación. Esto permite la identificación y el seguimiento de la geometría subsuperficial que, en algunas realizaciones, se utiliza entonces como referencia para conservar capas finas de tejido.
- 15 La combinación de luz de formación de imágenes y de mecanizado se logra, por ejemplo, con un espejo dicróico, pero también puede lograrse con polarización y otras técnicas conocidas por los expertos en la materia. De esta manera puede utilizarse prácticamente cualquier láser de modificación (espectros de 250-10600 nm, CW, duraciones ps, ns, ps, fs). Esto permite la adaptación del láser de mecanizado a la aplicación o el uso de la infraestructura existente/aprobaciones de la FDA.
- 20 Otras aplicaciones útiles del sistema de formación de imágenes cuando se integra en una plataforma de mecanizado son el autofocus, los registros terapéuticos permanentes y (con la adición de ópticas de escaneado) la planificación previa al tratamiento y la confirmación posterior al tratamiento.
- 25 Algunos casos emplean un algoritmo de procesamiento de imágenes optimizado que utiliza una tabla de búsqueda para heterodinación/homodínación en lugar de operaciones más complejas que requieren interpolación, compensación de la dispersión digital, transformadas rápidas de Fourier, etc.
- 30 Otros casos presentan la inclusión de uno o más espejos de barrido, fuentes de mecanizado más complicadas, corte asistido por gas, diseños de espectrómetros más potentes, etc.
- 35 La formación de imágenes coaxiales de procesos de mecanizado por láser con SD-OCT proporciona información útil a la hora de medir parámetros críticos para el desarrollo de procesos, tales como la velocidad de grabado y la relajación morfológica, en materiales industriales. Al cortar tejidos como el hueso, la SD-OCT ofrece ventajas similares. Para demostrarlo, se utilizó un sistema SD-OCT basado en un oscilador de Ti:AIO_3 bloqueado en modo de 100 fs a 805 nm (Coherent Mira 900) ensanchado en fibra óptica monomodo. Con un espectrómetro CMOS de alta velocidad y un interferómetro de Michelson basado en fibra, el sistema de formación de imágenes proporciona una resolución axial de $< 5 \mu\text{m}$ (en aire) y una sensibilidad $>100 \text{ dB}$ medida a $150 \mu\text{m}$ con un tiempo de integración (medido) de $1,5 \mu\text{s}$ a una velocidad de línea máxima de 312 kHz. Las imágenes se procesaron en LabVIEW en 4 núcleos de un PC (y/u otros entornos de software) utilizando sustracción del espectro de fondo, conformación espectral gaussiana, interpolación spline cúbica, FFT y ecualización de ruido de fondo. Se aplicaron también otras técnicas y procedimientos de procesamiento (mencionados en la presente descripción).
- 40 Para el mecanizado en estos experimentos, se utilizó un láser de fibra pulsada de 100 - 200 ns (FWHM) (IPG YLP-100-30-30-HC) con una potencia media en la muestra de 23 W a 1070 nm y frecuencias de repetición de 30-80 kHz. Los haces de mecanizado y de formación de imágenes se alinearon con un espejo dicróico y se enfocaron juntos con una única lente acromática de 50 mm. Los colimadores de fibra se seleccionaron de tal manera que los diámetros focales de formación de imágenes y mecanizado fueran de aproximadamente $20 \mu\text{m}$ ($1/e^2$) con profundidades de enfoque de 500 y 340 μm , respectivamente. El hecho de tener los mismos tamaños de puntos de formación de imágenes y mecanizado redujo las señales de las paredes laterales (que se comentarán más adelante) y simplificó las imágenes. La luz de formación de imágenes y de mecanizado se suministró coaxialmente a través de un orificio de boquilla de gas de 500 μm de diámetro (separación entre la boquilla y la superficie de la muestra de 1 mm) que suministraba gas N_2 (en otros casos, también se suministraban otros gases y mezclas) a 2 bares para ofrecer refrigeración, protección de la óptica y supresión de la combustión.
- 45 Se utilizaron secciones transversales de costillas bovinas lavadas y desecadas como muestras apropiadas de hueso grueso y compacto. El sistema de formación de imágenes y los trenes de pulsos de mecanizado se activaron de forma asincrónica a medida que se perforaban orificios por percusión en las muestras en dirección transversal al eje de la médula. Las imágenes en modo M ("modo de movimiento", reflectividad en función de la profundidad y el tiempo) mostraron que el comportamiento de corte se caracterizaba por periodos iniciales de poca o nula modificación del material, seguidos de un cambio rápido en la muestra y el súbito inicio del corte a $\sim 10 \text{ mm/s}$. Si bien este comportamiento es común a esta fuente de modificación en particular, se ha observado que es sustancialmente diferente al utilizar otras fuentes. En la Figura 9, una sección de ejemplo de un escaneado M muestra este inicio repentino después de 143.000 pulsos de mecanizado y la progresión aproximadamente lineal del orificio a partir de entonces.
- 50 Se utilizaron secciones transversales de costillas bovinas lavadas y desecadas como muestras apropiadas de hueso grueso y compacto. El sistema de formación de imágenes y los trenes de pulsos de mecanizado se activaron de forma asincrónica a medida que se perforaban orificios por percusión en las muestras en dirección transversal al eje de la médula. Las imágenes en modo M ("modo de movimiento", reflectividad en función de la profundidad y el tiempo) mostraron que el comportamiento de corte se caracterizaba por periodos iniciales de poca o nula modificación del material, seguidos de un cambio rápido en la muestra y el súbito inicio del corte a $\sim 10 \text{ mm/s}$. Si bien este comportamiento es común a esta fuente de modificación en particular, se ha observado que es sustancialmente diferente al utilizar otras fuentes. En la Figura 9, una sección de ejemplo de un escaneado M muestra este inicio repentino después de 143.000 pulsos de mecanizado y la progresión aproximadamente lineal del orificio a partir de entonces.
- 55 El número de pulsos de mecanizado necesarios para iniciar el corte varió de 102 a 106 en la misma muestra de hueso. Esto se atribuye al gran grado inhomogeneidad de la muestra de tejido. Si bien este comportamiento es común a esta
- 60
- 65

fente de modificación en particular, se ha observado que es sustancialmente diferente al utilizar otras fuentes. Pequeñas variaciones en la absorción y la resistencia térmica en el hueso (debido a la presencia de vasos sanguíneos, etc.) pueden crear sitios de "nucleación" térmica en los que cambios inicialmente lentos en la humedad residual o la carbonización provocan incrementos desmesurados en la absorción óptica y el corte. La variabilidad en el inicio probablemente se vea reducida en el caso de una fuente de luz de ablación que produzca una longitud de onda central con una profundidad de absorción corta en el tejido. En cualquier caso, la monitorización *in situ* del área de la muestra expuesta a la luz de mecanizado proporciona una lectura directa del inicio de la ablación.

Una vez iniciado el corte, la eliminación de material resultó aproximadamente lineal con el número de pulsos. Varias interfaces subsuperficiales parecían elevarse y encontrarse con el frente de mecanizado primario. La OCT mide la longitud de la trayectoria óptica y, por tanto, se ve afectada por el índice de refracción del medio. La eliminación de material por encima de una interfaz reduce la longitud de la trayectoria óptica hasta las características estacionarias de la subsuperficie. La relación de las pendientes (en la ecuación siguiente, l - profundidad aparente de la característica subsuperficial, x - profundidad del orificio) proporciona una medida directa del índice efectivo del material eliminado (n). En este caso, n resultó ser de 1,5, lo que concuerda con informes anteriores de 1.530 para tejidos similares. Estas características pueden proporcionar información útil para el corte guiado, como se expone a continuación.

$$\frac{dl}{dt} = (1 - n) \frac{dx}{dt}$$

Debido a la naturaleza estocástica del inicio de la ablación, sería muy difícil medir las tasas de corte por pulso o por fluencia utilizando procedimientos *ex situ* convencionales. Sin embargo, estos parámetros constituyen información importante para la ingeniería de equipos y procedimientos quirúrgicos. Con la formación de imágenes coherentes en línea, estas mediciones son sencillas y la información está disponible inmediatamente después (y, de hecho, durante) el proceso, sin necesidad de modificaciones adicionales de las muestras. A modo de demostración, se perforaron 23 orificios en costillas a cuatro frecuencias de repetición diferentes, manteniendo constante la potencia media (23 W). La Figura 10 muestra la velocidad de grabado del material y la eficacia de eliminación en el hueso de costillas bovinas debido a la exposición al láser de fibra de ns de duración (potencia media constante de 23 W). Las barras de error indican la desviación estándar de los resultados. Una simple inspección de los datos en modo M revela las tasas de corte resultantes (Figura 10 con barras de error que indican intervalos de confianza de desviación estándar del 95 %). Aunque la ablación se consigue mediante procesos térmicos, la eliminación de material no depende simplemente de la potencia media. Por ejemplo, en la Figura 10 (izquierda), la velocidad de grabado aumenta solo en un ~50 % cuando la energía del pulso casi se triplica. Otra forma de mostrar este resultado es considerar la eficiencia de la eliminación de material por unidad de luz incidente. A menudo es deseable reducir la exposición a la luz sin sacrificar la velocidad de corte. Se observa una mayor eficiencia de eliminación de material al aumentar la frecuencia de repetición de la fuente láser de ablación. Explicado en términos sencillos, los pulsos con la mitad de energía, pero el doble de frecuencia de repetición, son más eficaces en la ablación que los pulsos con el doble de energía, pero la mitad de frecuencia de repetición. Esto sugiere que los efectos intrapulso, como la protección contra la generación/eyección de plasma, reducen la eliminación de material y puede obtenerse una mayor eficacia aumentando aún más la frecuencia de repetición.

Para demostrar la versatilidad de la técnica en el guiado del corte, se utilizó un sistema ICI portátil basado en un par de diodos superluminiscentes acoplados a fibra (1320 ± 35 nm) y un espectrómetro de rejilla reflectante con matriz de fotodiodos de InGaAs. El uso de esta banda espectral permite obtener imágenes más profundas del hueso, a expensas de la velocidad y el coste del detector. Una vez integrado en la plataforma de micromecanizado, el sistema tiene una resolución axial de 14 μ m y un tamaño de punto transversal de 30 μ m ($1/e^2$) en el aire. La gran anchura del haz de formación de imágenes se utiliza para recoger información morfológica tanto del fondo de la incisión como del tejido circundante, como se explica a continuación. Este sistema tiene una sensibilidad de 98 dB medida a 300 μ m con un tiempo de integración de 10 μ s y una incidencia de 7 mW en la muestra. La velocidad de la línea axial está limitada por el detector a 47 kHz. En esta implementación, las imágenes se procesaron en LabVIEW en 4 núcleos de un PC utilizando sustracción de espectro de fondo, interpolación lineal, FFT y ecualización de ruido de fondo.

La fuente de mecanizado utilizada en este caso es un láser de fibra de 100 W (potencia media máxima) (IPG YLR-100-SM) a 1070 nm enfocado a 23 μ m ($1/e^2$) que es pulsado mediante un comando TTL para emitir pulsos de 300 ns FWHM (medidos) de duración, pulsos de 230 μ J incidentes sobre la muestra a una frecuencia de repetición de 47 kHz. Aunque el FWHM del pulso medido es de 300 ns, la forma es altamente asimétrica con una duración total de aproximadamente 3 μ s. También se exploraron pulsos de mayor duración que corresponden a una forma de pulso más simple, pero dieron como resultado una calidad de corte degradada y una reproducibilidad reducida.

Tanto los haces de formación de imágenes como los de corte se alinearon coaxialmente con un espejo dicróico y se enfocaron juntos con una única lente acromática de 50 mm. La formación de imágenes se controló electrónicamente para activarse de forma asincrónica con la exposición al láser a fin de proporcionar el máximo retardo entre la exposición al láser y la formación de imágenes. Aunque el tejido no se había relajado hasta alcanzar el equilibrio entre

los pulsos, el retardo mejora el contraste de la formación de imágenes al minimizar el lavado de franjas de las interfaces que cambian rápidamente.

5 La muestra analizada era hueso cortical extraído de las apófisis espinosas de las vértebras lumbares bovinas. Para crear secciones finas de hueso adecuadas para esta prueba de concepto, se utilizó una broca de 1 mm de diámetro enfriada por agua para ahuecar pequeñas secciones de la muestra, dejando aproximadamente 600 μm de hueso sobre un espacio de aire de ~ 1 mm. La interfaz hueso/aire proporcionó una interfaz objetivo ideal para el mecanizado.

10 La obtención de imágenes en modo M del hueso durante la exposición al láser muestra el progreso del frente de mecanizado en función del pulso de mecanizado. La Figura 11 muestra el mecanizado en el que la exposición al láser se controla para lograr la perforación en el espacio de aire (izquierda) y detener la incisión antes de la perforación (derecha). La parte izquierda de la Figura 11 muestra dos grupos de 1000 pulsos que causan la perforación en la capa de aire, mostrando la siguiente capa ósea (profundidad de 1,7 mm). La parte derecha de la Figura 11 muestra que la aplicación de 7 grupos de 200 pulsos da como resultado un corte detenido a 150 micras antes de la penetración. La formación de imágenes (47 kHz) continuó después del corte para mostrar la relajación del material tras la perforación. 15 Anotaciones (destinadas a servir de guía visual): MF, frente de mecanizado; SI, interfaz subsuperficial; AI, interfaz aérea; BW pared posterior; P, punto de perforación; LO, láser de mecanizado apagado; AG, espacio de aire; SB, hueso conservado. El inicio de la eliminación del material demostró ser muy variable, por ejemplo, con 400 pulsos en la Figura 11 izquierda y solo 50 en la Figura 11 derecha, probablemente debido a la falta de uniformidad de la capa ósea superior, así como a la naturaleza no determinista del inicio de daños en el mecanizado CW. Una vez iniciado el mecanizado, este progresó a un ritmo bien definido hasta la perforación (Figura 11 izquierda) y la capa ósea secundaria se hizo visible. Cierta obstrucción del haz de formación de imágenes provoca sombras en la estructura subsuperficial, pero las estrías del tejido son claramente visibles, siendo la discontinuidad más pronunciada debido a la interfaz hueso/aire. Tal como se ha descrito anteriormente, las estrías situadas por debajo del frente de mecanizado parecen desplazarse hacia arriba durante la eliminación del material. 20 25

En todas las imágenes se observa una dispersión por encima del frente de mecanizado. Esto proviene de la dispersión de las paredes laterales del orificio. Se utilizó una anchura del haz de formación de imágenes mayor que la del haz de mecanizado para permitir la monitorización de las modificaciones de las paredes laterales, consiguiendo así cierto grado de información transversal sin escaneado lateral. El escaneado lateral también se realiza *in situ* (véase más adelante), pero a expensas de reducir la velocidad de obtención de imágenes. Una vez finalizada la exposición al láser (pulso 2000 en la Figura 11 a la izquierda, pulso 1400 en la Figura 11 a la derecha), la muestra se relaja y las características de la pared lateral y de la subsuperficie se vuelven estáticas. La variación de la luz dispersa durante el mecanizado se debe a cambios en la morfología de la superficie, así como al lavado de franjas para interfaces de movimiento rápido. Cabe señalar que en SD-OCT las interfaces que se mueven más de la mitad de la longitud de onda de la luz durante el tiempo de integración de la cámara sufren una reducción del contraste. Este artefacto inducido por el movimiento es preferible a las variaciones de OCT en el dominio del tiempo o de fuente barrida, donde otras interfaces de movimiento rápido aparecen a profundidades incorrectas, dificultando así el seguimiento de la incisión. 30 35

40 Al trasladar la muestra, se obtuvieron imágenes en modo B del sitio de perforación antes y después del procesamiento. Dado que las imágenes *in situ* se alinean automáticamente con el eje del orificio, la obtención de imágenes profundas en orificios de alta relación de aspecto (>20) fue sencilla. La Figura 12 muestra una imagen OCT en modo B *in situ* del orificio antes (izquierda) y después (derecha) de la perforación. Los dos orificios transparentes muestran la interfaz ósea inferior, mientras que el orificio del medio (correspondiente a la Figura 12 a la derecha) se perforó hasta detenerse a 150 μm antes del espacio de aire. El grosor óseo conservado se resalta con corchetes. Las paredes posteriores vistas a través de los orificios correspondientes a los de la Figura 12 (izquierda) están etiquetadas como BW. El orificio central muestra claramente el hueso conservado (soportes ortopédicos en la Figura 12 a la derecha) por encima del espacio de aire. Los otros dos orificios son pasantes y muestran el espacio de aire y la dispersión de la capa ósea inferior. La mayor dispersión de las paredes laterales de los orificios causada por la modificación del tejido en el proceso de corte térmico reduce la profundidad de penetración de la luz de formación de imágenes, oscureciendo a veces las características más profundas. Esto puede minimizarse seleccionando un proceso de modificación con láser que cause poca o ninguna carbonización del sitio de modificación. 45 50

55 La aplicación de estas capacidades de formación de imágenes coherentes prospectivas puede, en algunos casos, dar lugar a un seguimiento del mecanizado en tejidos duros a escalas de longitud milimétricas con una resolución temporal de varios órdenes de magnitud superior a la que se ha comunicado anteriormente. Se ha demostrado que la formación de imágenes en tiempo real permite un corte preciso en tejidos de los que se dispone de poca información *a priori* y que pueden tener una respuesta altamente estocástica a la energía de mecanizado. Este desarrollo es un paso importante hacia el control preciso en procedimientos quirúrgicos de tejidos duros, en particular, en las proximidades de órganos sensibles como el sistema nervioso. 60

TOMOGRAFÍA DE COHERENCIA ÓPTICA DE DOMINIO ESPECTRAL

65 Las realizaciones descritas en el presente documento utilizan tomografía de coherencia óptica de dominio espectral y sus variantes. La tomografía de coherencia óptica de dominio espectral (SD-OCT) se ha descrito como el análogo óptico de la formación de imágenes por ultrasonidos. La medición utiliza un interferómetro de fibra óptica de luz blanca

para obtener la longitud de la trayectoria óptica (OPL) de un objeto con respecto a una longitud de referencia fija. En el dominio espectral, la OPL relativa de la reflexión de la muestra se codifica en el espaciado de las franjas de interferencia espectral en la salida del interferómetro. Específicamente, se considera un conjunto de p reflectores en el brazo de muestra, cada uno con una diferencia de OPL con respecto a la longitud de referencia de z_i . La intensidad del interferograma espectral resultante es aproximadamente:

$$I(k) = A(k) \sum_{i=1}^p \left[\frac{I_{ref}}{2p} + \frac{I_i}{2} + \sqrt{I_{ref} I_i} \cos(2kz_i) \right]$$

$A(k)$ es la envolvente espectral de la fuente de luz de formación de imágenes y k es el número de onda. El primer término se conoce *a priori* y puede ser sustraído como señal de fondo. El segundo término suele ser muy pequeño y puede despreciarse. En el tercer término, la reflexión débil de la muestra (I_i) ve multiplicada su intensidad por la señal de referencia fuerte y aparece como una franja de interferencia sinusoidal cuyo espaciado (es decir, frecuencia) depende de su profundidad (z_i). Dado que cada profundidad corresponde a una frecuencia de franja diferente, las señales son ortogonales y pueden monitorizarse de forma independiente sin partes móviles. Por lo tanto, la velocidad de adquisición y la relación señal/ruido están limitadas por el detector y la intensidad de la luz de formación de imágenes. Cabe destacar que la ICI puede trabajar coaxialmente con el haz de mecanizado, lo que permite la detección de profundidad con relaciones de aspecto de orificios mucho mayores de lo que sería posible con procedimientos de triangulación.

Para extraer información de profundidad, el interferograma espectral (medido con un espectrómetro) puede ser remuestreado en términos de unidades de número de onda constante mediante interpolación y puede ser transformado a $I(z)$ mediante FFT. La función resultante (conocida como escaneado A o línea A) es un perfil de profundidad-reflectividad de la muestra (representado en unidades logarítmicas relativas al ruido de fondo) y cada interfaz reflectante en la muestra aparece como una función de dispersión de puntos (PSF) centrada en su profundidad. La anchura total de la PSF a la mitad del máximo (FWHM) normalmente se conoce como resolución axial del sistema, y para la gaussiana $A(k)$ como:

$$\delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

Por lo tanto, se desea una longitud de onda central corta (λ) de la fuente de luz y un espectro amplio ($\Delta \lambda$) para obtener imágenes de alta resolución. Las resoluciones axiales típicas en formación de imágenes biológicas del orden de 5 a 10 μm se logran con espectros cuasi gaussianos de $830 \pm 30 \text{ nm}$ FWHM (oftalmología) o $1310 \pm 35 \text{ nm}$ FWHM (tejido de dispersión).

Puede surgir un artefacto de formación de imágenes importante debido a la ambigüedad entre las OPL positivas y negativas (z_i y $-z_i$ producen el mismo interferograma). Dado que el interferograma espectral es puramente real, el perfil reflejado en profundidad tiene una simetría conjugada compleja alrededor de cero. Generalmente se descarta la mitad de la imagen dejando solo las OPL positivas. Sin embargo, si una interfaz reflectante está ubicada en el lado negativo del punto de referencia, su marca vuelve a aparecer en la imagen como un artefacto. Por lo tanto, algunas realizaciones están diseñadas con un campo de visión (FOV) de profundidad adecuada y se tiene cuidado para garantizar que todas las interfaces reflectantes estén situadas en solo un lado del punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero.

Para crear una imagen, el espectrómetro puede adquirir en serie muchos interferogramas espectrales, procesarlos en líneas A ("línea axial", reflectividad en función de la profundidad) y luego mostrarlos como un conjunto de datos en 3D de reflectividad frente a profundidad frente a número de línea A. En la formación de imágenes biológicas, el número de la línea A corresponde a la posición transversal a medida que el haz de formación de imágenes se escanea por trama. Esto produce una imagen de reflectividad en función de dos dimensiones espaciales conocidas como imagen en modo B (B = brillo). De manera alternativa, si el haz es estático, el número de la línea A corresponde al tiempo y la imagen resultante se denomina imagen en modo M (M = movimiento). Este tipo de imagen es útil para observar cambios rápidos en el perfil de profundidad-reflectividad de la muestra. Por ejemplo, la formación de imágenes coaxiales durante la perforación por percusión de acero inoxidable 304 con un láser de fibra de 1070 nm de longitud de onda central y 100 ns de duración (IPG YLP-1/100/30/30-HC) proporciona la imagen en modo M de la Figura 13. El frente de mecanizado (curva blanca brillante) se observa descendiendo ~600 μm en la mayor parte de la muestra. La relación completa entre la profundidad de grabado y el número de pulsos se obtuvo perforando un único orificio y no fue necesario procesar el material después del corte.

Se aplicaron pulsos de 760 μJ a 30 kHz sobre un punto de 20 μm de diámetro de intensidad e^{-2} . Se utilizó un chorro coaxial de gas de asistencia de oxígeno a 8,3 bares. La velocidad de formación de imágenes es de 300 kHz. El brillo

del gráfico corresponde a la reflectividad de la muestra en escala logarítmica. El rango dinámico mostrado es de ~ 60 dB.

Con velocidades de adquisición de incluso unas pocas decenas de kilohercios, las imágenes en modo M no solo permiten medir directamente las velocidades de grabado, sino también el flujo del baño de fusión y otras dinámicas de los procesos de perforación/soldadura por láser. Dado que es posible la detección por debajo del frente de mecanizado, los datos del modo M también pueden utilizarse junto con el hardware de retroalimentación apropiado para guiar el corte de orificios ciegos en una variedad de materiales semitransparentes, incluidos los tejidos biológicos, incluso cuando la geometría exacta de la muestra no se conoce *a priori*.

La Figura 14 es un diagrama esquemático de otro sistema de obtención de imágenes proporcionado por una realización de la invención que se utilizará como ejemplo para la mezcla homodina. Sin embargo, la mezcla homodina puede utilizarse con cualquiera de los sistemas descritos en el presente documento. Etiquetas: ISO, aislador óptico de fibra acoplada 400; 50:50, acoplador de modo 402; PC, controlador de polarización 406; TGR, rejilla de transmisión 408; ASL, lente espaciada por aire 410; SiLC: cámara lineal CMOS de silicio 412; 50FC, colimador de fibra de 50 mm 414; 10FC, colimador de fibra de 10 mm 407, 409. Se dispone de un diodo superluminiscente acoplado a fibra (SLD) 418, un espectrómetro personalizado y un interferómetro de Michelson de fibra óptica que puede interconectarse a un cabezal de mecanizado láser a través de un puerto de cámara (más generalmente un puerto de acceso óptico). La luz de formación de imágenes procedente del SLD pasa primero a través de un aislador y/o circulador óptico, que protege el SLD de la retroreflexión. La luz continúa hacia un acoplador de modo evanescente (divisor de haz o combinador de haz) donde se divide en los brazos de muestra y de referencia y, a continuación, se acopla fuera de la fibra hacia el espacio libre. Parte de la luz se retrorefleja en ambos brazos del interferómetro y las señales se recombinan e interfieren en el acoplador de modo. Los controladores de polarización corrigen los desajustes entre los dos brazos del interferómetro que surgen de los efectos de polarización en la fibra monomodo y también optimizan la eficiencia de la rejilla de difracción. La fibra que mantiene la polarización también puede utilizarse junto con, o en lugar de, los controladores de polarización. Se utiliza una rejilla de transmisión en el espectrómetro para facilitar la alineación. Por último, la cámara mide el interferograma espectral y transmite datos vía IEEE-1394 a un ordenador de escritorio (u otra plataforma de procesamiento, no mostrada) para su procesamiento.

A continuación, se muestra un ejemplo de medición del rendimiento del sistema de la Figura 14.

Tabla 1: Características calculadas de rendimiento del sistema

Resolución axial (µm)	12
Profundidad de campo (mm)	5,9
Velocidad de línea máxima (kHz)	27
Ciclo de trabajo (interfaz IEEE-1394 limitada)	0,73
Sensibilidad (dB)* † (integración de 35 µs)	98
Sensibilidad (dB)* † (integración de 1 µs)	82
Sensibilidad (dB)* † (integración de 100 ns)	67
Rango dinámico máximo (dB)*	66
<p>*Basado en las especificaciones de ruido disponibles para cámaras que funcionan a baja velocidad. Se espera que, a máxima velocidad, el valor real sea inferior. †Suponiendo una eficiencia de la óptica del brazo de muestra de ~80 %</p>	

Algunas realizaciones pueden tener diferentes velocidades, sensibilidades, resoluciones y/o rangos dinámicos dependiendo de la elección de los componentes.

En algunos casos, el sistema completo incluye, además, una interfaz personalizada con cabezales de mecanizado para aplicaciones específicas. Generalmente, esto puede lograrse modificando el puerto de la cámara y seleccionando la óptica dicróica adecuada que combine la luz de formación de imágenes y de mecanizado. Además, puede seleccionarse un diámetro de haz enfocado apropiado para el haz de formación de imágenes. En algunas implementaciones, la luz de formación de imágenes y de mecanizado es enfocada por el mismo objetivo (aunque esto no es necesario), cuya longitud focal viene predeterminada por las exigencias del proceso de mecanizado existente. En este caso, la elección y alineación del colimador del brazo de muestra pueden utilizarse para obtener las características focales deseadas para la formación de imágenes. La alineación del colimador también puede utilizarse para compensar la variación de la longitud focal del objetivo entre la luz de formación de imágenes y la luz de mecanizado.

Como ejemplo de aplicación, se considera un cabezal láser de mecanizado con una lente de enfoque de 100 mm. Para mantener imágenes uniformes en la profundidad de campo, la distancia focal del colimador debe seleccionarse

de tal manera que el rango de Rayleigh del haz de formación de imágenes enfocado sea aproximadamente la mitad de la profundidad de campo del sistema. Para la configuración descrita anteriormente, se seleccionó una lente colimadora de 10 mm y, por lo tanto, se espera una cintura de haz de 27 μm (radio de intensidad $1/e^2$) y un rango de Rayleigh de 2,8 mm. Cabe señalar que, para lograr la máxima resolución axial, puede ser útil una compensación adecuada del desajuste de dispersión entre los brazos de muestra y de referencia.

El diseño es flexible y puede modificarse para mejorar la velocidad de formación de imágenes (con una cámara mejorada) o la resolución axial. Esto último se consigue seleccionando un SLD de espectro más amplio (u otra fuente de luz) y una rejilla con una densidad de línea reducida. De este modo se obtendría una mejora significativa de la resolución, con el inconveniente de una menor profundidad de campo, pero con un coste monetario adicional escaso o nulo. Por ejemplo, la sustitución de los componentes actuales por una fuente de luz FWHM de 840 ± 25 nm (Exalos EXS8410-F413) combinada con una rejilla de 1200 líneas/mm (Edmund Optics NT48-589) puede proporcionar una resolución de 6,2 μm en un intervalo máximo de 3 mm. Cabe señalar que, con mayores anchos de banda espectrales, es importante una compensación adecuada del desajuste de dispersión para conseguir la máxima resolución.

Cabe señalar que, en técnicas de formación de imágenes coherentes como esta, si una interfaz se mueve $\sim \lambda/4$ o más durante el tiempo de integración del detector, el contraste de franjas se degrada significativamente ("lavado"), provocando que la señal de esa interfaz desaparezca. Esto corresponde al límite superior de la velocidad de la interfaz que puede ser rastreada. Sin embargo, también tiene la ventaja de rechazar ciertas interfaces de alta velocidad (por ejemplo, eyecciones) que producirían reflejos que complicarían las imágenes y dificultarían la retroalimentación automática. La velocidad máxima de la interfaz depende del tiempo de integración del detector, lo que a su vez afecta a la sensibilidad. Para un tiempo de integración de 35 μs , el sistema puede rastrear interfaces que se mueven a velocidades de hasta 0,006 m/s. Para interfaces que se mueven más rápido, el tiempo de integración puede reducirse (a expensas de la sensibilidad) a 1 μs o 100 ns, para obtener velocidades máximas de 0,21 m/s o 2,1 m/s, respectivamente. Dado que esto es más rápido que las velocidades de grabado típicas de los procesos industriales, se espera que este diseño resulte adecuado para una amplia gama de aplicaciones. El uso de cámaras lineales con tiempos de integración más cortos, fotodetectores equilibrados y/o fuentes de barrido permite la resolución de interfaces que se mueven a velocidades aún mayores.

30 FILTRADO DE PROFUNDIDAD HOMODINO

Para utilizar la ICI como un procedimiento de retroalimentación automática, el procesamiento debe poder ejecutarse preferiblemente al menos tan rápido como la adquisición de datos. En la formación de imágenes biológicas, se requieren operaciones de interpolación y FFT para calcular la intensidad reflejada desde todas las profundidades dentro del FOV para formar una imagen. En cambio, en los sistemas de retroalimentación, la salida de la imagen se utiliza para desencadenar un cambio en el proceso de modificación del material (por ejemplo, terminar la emisión) en función de la salida de la imagen, por ejemplo, una vez que se ha alcanzado una determinada profundidad. En este caso, calcular la reflectividad desde todas las profundidades puede resultar excesivo. Se proporciona un procedimiento eficaz para determinar el momento en que la perforación ha penetrado hasta una profundidad determinada.

Partiendo de una profundidad deseada, z , y utilizando la ecuación para $I(k)$ presentada anteriormente junto con los datos de calibración del espectrómetro, se precalcula un interferograma sintético, expresado en unidades de número constante de píxeles de la cámara (o la base que corresponda al sistema de detección). Este cálculo puede realizarse *a priori* y no contribuye a la carga computacional en tiempo real. Pueden generarse múltiples interferogramas sintéticos precalculados de este tipo y extraerse (individualmente o de otro modo) de una tabla de memoria para ser utilizados para diferentes resultados de objetivos, por ejemplo, lograr una de varias profundidades posibles, rastrear la aproximación a una profundidad deseada a través de una serie de etapas intermedias, eliminar material de una profundidad especificada, lograr más material en una profundidad en comparación con otra profundidad u optimizar el cambio en la retrodispersión de una profundidad objetivo.

Mediante la mezcla homodina del interferograma sintético con los datos brutos de la cámara, se extrae la señal de la profundidad deseada, que puede tener una señal de lóbulo lateral espuria significativamente menor (por errores de interpolación) en comparación con otros procedimientos conocidos por el experto en la materia, tal como se muestra en la Figura 20. F. Para cada salida de imágenes de la cámara, los datos brutos de la cámara se multiplican por el interferograma sintético píxel a píxel y luego se suman. Cuando se alcance la profundidad deseada, el resultado sumado tendrá un pico.

Cuando se desea combinar la señal con múltiples interferogramas sintéticos, puede adoptarse un enfoque de multiplicación matricial.

Si los elementos de datos se transfieren desde el detector de forma serial o cuasi-serial (es decir, a través de múltiples pulsaciones de la cámara), en algunas realizaciones, la electrónica receptora puede comenzar los cálculos en los elementos individuales tan pronto como estén disponibles con el fin de preservar los recursos de procesamiento tales como memoria y/o puertas (como en una matriz de puertas programables en campo, FPGA) y reducir la latencia de retroalimentación general.

Para demostrarlo, esta técnica de filtrado se aplica a los datos del espectrómetro utilizados en la Figura 15, seleccionando una profundidad objetivo de 200 μm (indicada por una línea 100 en la Figura 15). La respuesta del filtro muestra una respuesta SNR clara y alta en el momento en que el frente de mecanizado pasa a través de la profundidad (Figura B inferior).

5 La respuesta del filtro se utiliza para activar una respuesta de retroalimentación con el fin de detener la perforación, o para realizar algún otro cambio en los parámetros del proceso de modificación de material. La Figura 16 es un diagrama de flujo de un procedimiento de control automático de retroalimentación, que puede utilizarse, por ejemplo, para detener la perforación, basándose en el momento en que se alcanza una profundidad determinada. También son posibles sistemas de control más complicados con retroalimentación de múltiples profundidades y control de otros parámetros del proceso. En algunas realizaciones, se emplea una tabla de consulta para cambiar rápida y dinámicamente la(s) profundidad(es) de interés (seleccionando diferentes interferogramas sintéticos precalculados).

15 El filtrado de profundidad puede suponer ahorros computacionales frente al procesamiento estándar. En la Tabla 2, se compara el tiempo necesario para procesar múltiples bloques de 576 líneas de elementos de datos experimentales brutos previamente adquiridos, tanto utilizando los códigos de formación de imágenes biológicas estándar de los inventores (sustracción de fondo, interpolación spline cúbica, FFT, ecualización de ruido de fondo) como con el filtro homodino. El procesamiento se realizó con un único subproceso ejecutando MATLAB en una CPU de escritorio Intel de cuatro núcleos en un entorno Microsoft Windows 7 de 64 bits. Los resultados de la Tabla 2 se expresan en términos de 103 líneas por segundo (klps) y el factor de aumento de velocidad relativo obtenido utilizando el filtro homodino.

Tabla 2: Comparación de la velocidad de procesamiento para 4×10^5 líneas de imagen

Tamaño del bloque (líneas A)	Interpolación + velocidad FFT (IF) (klps)	Velocidad del filtro homodino (HF) (klps)	Velocidad relativa (HF/IF)
2×10^5	0,77	451,2	588
2×10^4	5,096	522,2	102
2×10^3	4,596	555,6	121
200	1,861	794,0	427
20	0,241	746,0	3097

25 Para tamaños de bloque muy pequeños y muy grandes, el procedimiento FFT es muy lento. Esto se debe a limitaciones específicas del entorno de hardware y software y no a la complejidad computacional del código. Como resultado, la mejor comparación teórica entre los dos procedimientos son los bloques de tamaño intermedio. En este caso, incluso cuando la FFT produce sus mejores resultados, el filtro homodino sigue superándola en dos órdenes de magnitud.

30 Si bien el periodo de línea limita la tasa de rendimiento bruto, es solo un valor mínimo para la latencia de retroalimentación total. La latencia de interrupción y otros retardos inherentes al hardware de escritorio y a los sistemas operativos son aditivos y pueden ser, en última instancia, los términos dominantes. Por este motivo, todas las capacidades de la retroalimentación basada en ICI no se alcanzarán potencialmente sin el uso de hardware de procesamiento dedicado en forma de matrices de puertas programables en campo (FPGA) o circuitos integrados de aplicación específica (ASIC). Estos componentes ya existen en muchas cámaras modernas, incluida la que se especifica en el presente documento. La facilidad de implementación del algoritmo de filtro homodino descrito integrado en una cámara en el presente documento evita el cuello de botella del PC de escritorio y permite que la propia cámara regule el sistema de mecanizado.

40 **OBTENCIÓN DE IMÁGENES DEBAJO DE LA SUPERFICIE**

La Figura 17 muestra otro ejemplo de un sistema que presenta formación de imágenes coherentes en línea. Esta implementación presenta una implementación de fibra óptica de la ICI. Una fuente de luz de banda ancha 500 inyecta luz en la fibra óptica 502. Un aislador bloquea las reflexiones para que no lleguen a la fuente de luz. El acoplador óptico 504 divide la luz en el brazo de referencia 506 (superior) y el brazo de muestra 508 (inferior, hacia el sistema de procesamiento láser). La proporción de división depende de las necesidades de la aplicación. Un ejemplo sería 50:50 (50 % para el brazo de referencia, 50 % para el brazo de muestra). La luz de referencia se desplaza a lo largo del brazo de referencia y se retrorrefleja. La longitud de la trayectoria del brazo de referencia puede ajustarse en divisiones aproximadas, utilizando varias longitudes de fibra óptica, y en divisiones precisas, utilizando un espejo montado en una platina de traslación con control micrométrico. Por lo general, la longitud del brazo de referencia se ajusta para que coincida con la longitud de la trayectoria óptica de la pieza de trabajo en el sistema de procesamiento por láser, menos aproximadamente doscientos micrómetros. A menudo es conveniente colocar un objetivo de enfoque idéntico al utilizado en la plataforma de procesamiento por láser antes del espejo de referencia (no mostrado) para igualar la dispersión y controlar la potencia reflejada del brazo de referencia. El brazo de referencia contiene ópticas 510, 512 que permiten el control de la dispersión y la polarización. El control de la dispersión se realiza de modo que tanto el brazo de referencia como el de muestra estén casi igualados en la dispersión. El control de la polarización se ajusta generalmente de tal manera que la referencia y la retrorreflexión del brazo de muestra tengan estados de polarización similares (para máxima interferencia). El brazo de referencia también puede incluir un atenuador de

intensidad controlable (no mostrado) para controlar la saturación del detector y el rango dinámico de la formación de imágenes. Esto puede lograrse mediante un filtro de densidad neutra variable, la desalineación de un acoplador de fibra o la traslación del objetivo de enfoque con respecto al espejo de referencia final (no mostrados). La fibra del brazo de muestra sale del sistema de formación de imágenes coherentes en línea y se conecta a una plataforma de procesamiento por láser externa. La luz se retrodispersa de la pieza de trabajo y viaja de regreso a lo largo de la misma fibra. La luz de referencia retroreflejada se divide en el acoplador óptico 504, de modo que parte de ella se inyecta en la fibra conectada al espectrómetro de alta velocidad 514 (la cantidad depende de la relación de división del acoplador). La luz de muestra retrodispersada se divide en el acoplador óptico, de modo que parte de ella se inyecta en la fibra conectada al espectrómetro de alta velocidad (la cantidad depende de la relación de división del acoplador). La luz de muestra y la luz de referencia interfieren en la fibra óptica 516. La luz se dispersa según su longitud de onda en el espectrómetro. El detector puede ser un espectrómetro que mide la intensidad en función de la longitud de onda. La posición de los picos constructivos y destructivos contiene información sobre la longitud relativa de la trayectoria del brazo de muestra en comparación con el brazo de referencia. Si la luz se retrodispersa simultáneamente desde más de una profundidad en el brazo de muestra (por ejemplo, los lados de un ojo de cerradura láser), la intensidad y las posiciones relativas de todas las profundidades se codifican en el interferograma. El interferograma espectral (intensidad en función de la longitud de onda) es convertido en una señal electrónica por el detector y transmitido a la electrónica de control 518 para su procesamiento. El sistema de procesamiento electrónico controla el espectrómetro (por ejemplo, el disparo) y procesa los datos brutos del detector. Una técnica de procesamiento (el denominado procesamiento OCT estándar) consiste en la sustracción inversa, la interpolación spline cúbica para la conversión del número de píxeles de la cámara a una etapa de frecuencia constante y la transformada rápida de Fourier para producir un gráfico de retrodispersión en función de la profundidad. Si solo hay una interfaz altamente reflectante en el brazo de muestra, el gráfico resultante tendrá un pico fuerte con su anchura determinada por la resolución axial del sistema. La resolución axial es inversamente proporcional al ancho de banda de la longitud de onda medida por el espectrómetro (de ahí la necesidad de una fuente de banda ancha para lograr una alta resolución). De manera alternativa, puede utilizarse el enfoque de filtrado homodino descrito anteriormente para tiempos de procesamiento más rápidos y calidad de imagen mejorada. En algunas realizaciones, un controlador de retroalimentación (parte o separado del procesamiento electrónico 518) genera retroalimentación para controlar uno o más parámetros de procesamiento del proceso de modificación del material. Ejemplos, no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, se han proporcionado anteriormente en el marco de otros casos.

La Figura 18 es un diagrama de bloques de una aplicación de la ICI a la cirugía guiada por láser de visión frontal. Los láseres son útiles para la ablación de tejidos puesto que la luz puede enfocarse con mucha precisión, lo que permite al cirujano eliminar pequeños volúmenes de tejido. Aunque la luz puede emitirse con gran precisión en las dimensiones transversales, es difícil controlar la profundidad final de la incisión láser. El tejido puede ser muy heterogéneo con una gran variación en la tasa de eliminación, lo que hace que la energía total suministrada no sea un buen indicador de la profundidad de la incisión. La Figura 18 muestra un área de tratamiento del paciente 600 que contiene un volumen de tejido duro o blando que normalmente se eliminaría mediante procedimientos mecánicos (por ejemplo, perforación). El sistema ICI mide la profundidad de la incisión a medida que se realiza la ablación del tejido y finaliza la exposición al láser a una profundidad predeterminada. Y lo que es más importante, cuando la ICI se implementa utilizando luz infrarroja (~1300 nm), es posible obtener imágenes del tejido (más allá del frente de ablación). Esto permite terminar la exposición antes de penetrar una interfaz (y antes de que el intenso láser quirúrgico pueda dañar el delicado tejido subsuperficial).

Se proporciona un sistema de formación de imágenes coherentes en línea 602 que incluye un interferómetro, una fuente de luz de banda ancha y un espectrómetro, representándose, en la Figura 17, una implementación de ejemplo. El área de tratamiento del paciente se indica en 600. Se dispone de un láser quirúrgico 604 que genera una exposición controlada por un cirujano y modificada mediante control de retroalimentación. Se dispone de un cabezal de enfoque controlado por robot 610 (pero puede ser manual en algunas otras realizaciones) que combina el haz de formación de imágenes y el haz quirúrgico coaxialmente y recoge la luz de formación de imágenes retrodispersada desde el área de tratamiento. En algunas realizaciones, la luz láser de formación de imágenes y la luz láser quirúrgica pueden combinarse antes en la trayectoria de propagación del láser quirúrgico, de modo que la luz de formación de imágenes y la luz quirúrgica lleguen previamente combinadas al cabezal de enfoque. Los datos del interferograma espectral del sistema ICI 602 se transmiten al procesamiento electrónico 606 que genera el control de retroalimentación electrónico para el láser quirúrgico y el cabezal de enfoque controlado por robot. Además, se genera una salida para una pantalla de imágenes 608.

El haz del brazo de muestra del interferómetro ICI se ajusta para que sea coaxial con el láser quirúrgico 604. Esto puede hacerse en el espacio libre con un espejo dicróico apropiado. De este modo, se garantiza que la formación de imágenes se realiza en la misma línea que la dirección del haz quirúrgico. La longitud del brazo de referencia se ajusta de manera que el brazo de muestra y el brazo de referencia coincidan estrechamente. El cirujano puede utilizar la pantalla de imágenes para obtener imágenes del área objetivo (y por debajo) antes de iniciar el láser quirúrgico. El sistema de formación de imágenes también puede utilizarse para ajustar la posición del láser quirúrgico mediante el registro conjunto con otras modalidades de imágenes (como resonancia magnética, RM, o tomografía computarizada, TC, pregrabadas). Esto permite al cirujano observar un pequeño volumen del área de tratamiento en tiempo real utilizando la ICI en el contexto de características anatómicas más amplias. El procesamiento electrónico realiza este

registro conjunto. Además, el cirujano puede haber seleccionado los márgenes que se ha de eliminar utilizando las modalidades de formación de imágenes pregrabadas.

Una vez que el cirujano está seguro de que el láser quirúrgico se va a dirigir al área de tratamiento correcta de acuerdo con el plan de tratamiento, inicia el proceso de ablación. El sistema puede programarse para que finalice la exposición después del corte a una cierta profundidad, o para que permanezca dentro de un cierto margen preestablecido, o para que finalice la exposición cuando la ablación alcance una determinada distancia hasta una interfaz seleccionada. El sistema ICI puede utilizarse para proporcionar un registro permanente del procedimiento de tratamiento, útil para el análisis posoperatorio.

La Figura 19 es un diagrama de bloques de una aplicación de la ICI para metrología *in situ* para soldadura por láser. La soldadura por láser proporciona soldaduras estrechas y profundas, muy adecuadas para la fabricación automatizada y de gran volumen. Las diversas aplicaciones de la soldadura por láser tienen en común un proceso de calentamiento controlado mediante un láser para crear un cambio de fase localizado en la región de unión. El control de esta región de cambio de fase (PCR) puede utilizarse para controlar la calidad de la soldadura y la productividad general del sistema de soldadura. La alta coherencia espacial de la luz láser permite un excelente control transversal de la energía de soldadura. El control axial (profundidad de la PCR) y la posterior difusión térmica son más problemáticos, especialmente en materiales gruesos. En estas aplicaciones, la profundidad de la PCR se extiende profundamente en el material (~ mm) utilizando una técnica ampliamente conocida como "soldadura de ojo de cerradura". En este caso, la intensidad del haz es suficiente para fundir la superficie y abrir un pequeño canal de vapor (también conocido como capilar u "ojo de cerradura") que permite que el haz óptico penetre profundamente en el material. Dependiendo de la aplicación específica, el ojo de la cerradura es estrecho (<mm) pero de varios milímetros de profundidad y se mantiene con la aplicación de hasta ~104 W de potencia óptica.

En la Figura 19, se proporciona un sistema de formación de imágenes coherentes en línea 702 que incluye un interferómetro, una fuente de luz de banda ancha y un espectrómetro, representándose, en la Figura 17, una implementación de ejemplo. La plataforma de soldadura se indica en 700. Se dispone de un láser de soldadura 704 que genera un haz de soldadura controlado por un controlador de soldadura 705, teniendo en cuenta el control de retroalimentación. Un objetivo de enfoque 703 combina el haz de formación de imágenes con el haz de soldadura para enviarlo a la pieza de trabajo de soldadura 701 y recoge la luz de formación de imágenes retrodispersada desde el área de soldadura. Puede haber entradas de soldadura adicionales tales como gas de asistencia, un arco eléctrico, material aditivo, etc. Los datos del interferograma espectral del sistema ICI 702 se transmiten al procesamiento electrónico 706 que genera el control de retroalimentación electrónico para el controlador de soldadura 704. Además, se genera una salida para la pantalla de imágenes 708. En este caso, el sistema ICI 702 está conectado a un puerto de cámara de plataforma de soldadura 718 a través de un acoplador de fibra a espacio libre 720.

Según la presente invención, tal como se reivindica, para medir la formación de un ojo de cerradura en tiempo real, el brazo de muestra del sistema de formación de imágenes ICI 702 se ajusta de tal manera que sea coaxial y/o casi coaxial con el haz láser de soldadura, para ser enfocado en la PCR. Esto puede hacerse colimando el haz de imagen y dirigiéndolo hacia el puerto de la cámara de la plataforma de soldadura. El sistema ICI se utiliza para monitorizar la profundidad del ojo de cerradura formado, garantizando que es la profundidad adecuada para soldar todas las piezas de trabajo. En la soldadura por láser pulsado, el sistema ICI puede ejecutarse a un múltiplo de la frecuencia de repetición del láser de soldadura, proporcionando imágenes antes, durante y después de la exposición al láser. Esto proporciona información directa sobre la creación del canal de vapor y su posterior llenado. Con fuentes de soldadura de onda continua, el sistema ICI puede monitorizar directamente la estabilidad del ojo de cerradura. La retroalimentación de esta información puede utilizarse para optimizar los parámetros de soldadura (tales como la intensidad del láser, la velocidad de alimentación y el gas de asistencia), con el fin de aumentar la estabilidad del ojo de cerradura.

La pantalla de imágenes 708 muestra al operador información en tiempo real sobre la penetración y la estabilidad del ojo de cerradura durante el proceso de soldadura, y proporciona un registro permanente de la creación de la soldadura, situado en la región exacta de la pieza de trabajo. Esto puede ser importante para el posterior control de calidad.

Otro caso proporciona una ICI basada en fibra en la que se usa un objetivo dieléctrico común para combinar la luz de formación de imágenes y la luz láser. Una realización de este tipo incluye, de manera opcional, un controlador de retroalimentación tal como se define, por ejemplo, en cualquiera de las otras realizaciones descritas anteriormente.

Otros casos que combinan, mezclan o intercambian los elementos de diseño fundamentales descritos en el presente documento pueden ser posibles y resultarán evidentes para el experto en la materia. Estos incluyen, entre otros, formación de imágenes desde otras direcciones (es decir, no en línea con el haz de modificación), incluyendo la parte inferior del material que está siendo modificado.

INGENIERÍA DE LA SENSIBILIDAD FRENTE A LA PROFUNDIDAD PARA LA GESTIÓN DEL RANGO DINÁMICO

La ICI se diferencia de otras formas de formación de imágenes coherentes (como la OCT) en la forma en que se utiliza la información de la intensidad de la luz reflejada. En aplicaciones de formación de imágenes OCT, puede ser deseable

tener una relación muy plana de sensibilidad frente a profundidad para mantener un contraste y una visibilidad uniformes en toda la imagen. En la ICI, el contraste en toda la imagen no es tan importante como en el caso de la OCT, ya que la principal preocupación es la localización de superficies ópticamente reflectivas (por ejemplo, metálicas).

- 5 En algunos casos, se toman medidas para diseñar la función de sensibilidad frente a profundidad del sistema de formación de imágenes con el fin de atenuar las reflexiones brillantes en relación con las más débiles y ampliar el rango dinámico general. La ICI puede beneficiarse de tal rango dinámico extendido debido a la reflectividad altamente variable de los materiales en diferentes orientaciones. Las reflexiones pueden generarse fuertemente desde una interfaz o pueden generarse débilmente. Puede haber múltiples reflexiones superficiales e internas, a diferentes alturas.
10 Es posible configurar el funcionamiento de un sistema basado en ICI para que sea más sensible en regiones de interés donde se espera que las reflexiones sean más débiles.

Por ejemplo, cuando se utiliza un sistema ICI como el que se muestra en la Figura 5, la periferia de una característica mecanizada puede reflejar naturalmente más luz en el sistema de formación de imágenes que el fondo de un orificio.
15 Por lo tanto, pueden preverse señales más intensas desde profundidades menores. Si el sistema de formación de imágenes está configurado para una máxima sensibilidad (con el fin de optimizar su capacidad de detectar el fondo del orificio), entonces puede existir el riesgo de saturar el detector con señales mucho más fuertes que se originan en la parte superior del orificio.

- 20 En algunos casos, la sensibilidad frente a la profundidad se gestiona ubicando el punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero debajo del área de interés en la muestra en lugar de encima de ella. Esto puede lograrse aumentando la longitud del brazo de referencia y actualizando la salida del sistema de formación de imágenes para reflejar el hecho de que profundidades menores son ahora indicadas por frecuencias de franja crecientes. La ubicación del punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero dentro del material se muestra gráficamente en las Figuras 21 y 23. En la Figura 21, el punto D de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero se ajusta de manera que esté por debajo de la muestra y, en particular, por debajo de los reflectores A, B y C. Del mismo modo, en la Figura 23, el punto B de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero está situado por debajo del baño de soldadura. En otras implementaciones, el punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero está configurado para estar situado a una profundidad que está por debajo del material que está siendo medido.
25

- 30 Este enfoque utiliza la sensibilidad inherente frente al comportamiento de profundidad del sistema (que, debido a la resolución espectral finita del detector, tiende a disminuir con el aumento de la diferencia de longitud de trayectoria) para contrarrestar la reflectividad natural de la muestra (que tiende a disminuir con la profundidad). De esta manera, las estructuras más profundas de la muestra (que tienden a reflejar menos) se detectan con mayor sensibilidad que las estructuras superficiales (que tienden a reflejar más). Una ventaja adicional de esta práctica es que el humo, el plasma, los residuos y otras fuentes de dispersión de la luz próximas al sistema de formación de imágenes aparecen a mayor profundidad en la imagen, se atenúan y no se introducen en la región de interés debido a la ambigüedad conjugada compleja. Esto difiere de las enseñanzas de la técnica en el campo de la formación de imágenes médicas (por ejemplo, tomografía de coherencia óptica), donde la ambigüedad conjugada compleja hace que no sea deseable colocar el punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero dentro o, en algunos casos, debajo de la muestra.
35 En algunos casos, el punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero se encuentra por encima del área de interés. En algunos casos, la sensibilidad frente a la profundidad se gestiona utilizando técnicas de banda de Talbot para adaptar la curva de sensibilidad frente a la profundidad, por ejemplo, como demuestran Woods y Podoleanu. Véase Daniel Woods y Adrian Podoleanu, "Controlling the shape of Talbot bands' visibility", Opt. Express 16, 9654-9670 (2008); Adrián Gh. Podoleanu, "Unique interpretation of Talbot Bands and Fourier domain white light interferometry", Opt. Express 15, 9867-9876 (2007); Adrian Podoleanu y Daniel Woods, "Power-efficient Fourier domain optical coherence tomography setup for selection in the optical path difference sign using Talbot bands", Opt. Lett. 32, 2300-2302 (2007). Este enfoque permite una atenuación fuerte y ajustable de los reflectores superficiales y puede utilizarse para disminuir las reflexiones superficiales brillantes que pueden saturar el detector.
40

- 50 En algunos casos, la sensibilidad frente a la profundidad se gestiona mediante el uso de sincronización temporal no lineal, por ejemplo, como demuestran Muller y col. (Matthew S. Muller, Paul J. L. Webster y James M. Fraser, Optics Letters 32, 3336 [2007]).

- 55 Este enfoque utiliza la generación no lineal de frecuencias de suma para definir una ventana de profundidad de alta sensibilidad con sensibilidad reducida fuera de ella. Con la ventana colocada cerca de sitios de reflexiones débiles, las reflexiones superficiales disminuyen y se evita que saturan el detector. En algunos casos, la sensibilidad frente a la profundidad se gestiona accediendo a la señal de franja analógica antes de la digitalización final, por ejemplo, en un sistema de formación de imágenes de fuente barrida, y luego utilizando demodulación de hardware directa y/o filtrado para atenuar ciertas frecuencias de franja que corresponden a profundidades en las que se espera una alta reflectividad mientras se conserva la sensibilidad a profundidades en las que la señal es más débil. Esto puede lograrse añadiendo elementos de filtro digitales y/o analógicos a la línea de señalización entre el detector y el procesador de imágenes.
60

- 65 Se han descrito cuatro enfoques específicos para gestionar la sensibilidad frente a la profundidad. En algunas realizaciones, se implementa una combinación de dos, tres o los cuatro enfoques. Además, aunque se describen en

el marco de la realización de la Figura 5, debe entenderse que cualquiera o cualquier combinación de dos o más de estos enfoques puede aplicarse junto con cualquiera de las otras realizaciones descritas o reivindicadas en el presente documento.

5 OBSERVACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS DE SOLDADURA POR LÁSER

En algunos ejemplos, no cubiertos por la presente invención tal como se reivindica, un aparato como el que se muestra en la Figura 14 se interconecta a través del puerto de la cámara o algún otro acceso óptico adecuado a la línea del haz dentro de un sistema de suministro de haz de soldadura por láser. Los haces láser de formación de imágenes y de soldadura se combinan con un espejo dicróico y se enfocan a través de un objetivo común.

Este aparato se aplica a la observación de procesos de soldadura por láser, tales como procesos de soldadura de ojo de cerradura, en algunas realizaciones con retroalimentación de los procesos de soldadura, y en algunas realizaciones sin ninguna retroalimentación de los procesos de soldadura.

En cualquier configuración de ICI descrita en el presente documento que presente retroalimentación, la operación de retroalimentación de bucle cerrado puede lograrse utilizando un principio de control de retroalimentación, o un principio seleccionado de entre una pluralidad de principios de control de retroalimentación.

En cualquier configuración de ICI descrita en el presente documento que presente retroalimentación, el proceso de modificación de material puede configurarse de tal manera que pueda funcionar utilizando un principio seleccionado de entre una pluralidad de principios de control, al menos algunos de los cuales son principios de control de retroalimentación, y al menos uno de los cuales es un principio de control de bucle abierto. Puede utilizarse un principio de control híbrido que sea de bucle abierto durante una parte del tiempo y de bucle cerrado durante otra parte. El modo de bucle abierto puede lograrse, por ejemplo, seleccionando un principio de control que estipule datos de retroalimentación cero. El operador puede desear no efectuar el control de bucle cerrado por diversas razones. Se entiende, en la técnica, que un principio de control para lograr un resultado deseado puede ser modificado significativamente dependiendo de los objetivos del funcionamiento. Por ejemplo, puede ser deseable utilizar ICI para medir el grado de defectos de soldadura causados por una soldadura por láser no controlada. Seleccionando un principio de control que estipule datos de retroalimentación cero, el sistema se ve obligado a funcionar como si no hubiera control. Así, la ICI puede utilizarse para caracterizar y medir el rendimiento de un sistema de soldadura por láser estándar en el que, de otro modo, no se dispone de un control basado en ICI.

Puede ser deseable aplicar un principio de control mediante el cual la profundidad de la soldadura se module entre un nivel de penetración más profundo y un nivel de penetración más superficial. Puede ser deseable aplicar un principio de control mediante el cual solo se limiten los límites del peor caso de profundidad de penetración de la soldadura, permitiendo así, en ocasiones, el funcionamiento en bucle abierto y el funcionamiento del control de profundidad solo cuando la profundidad de penetración se aproxime a los límites del intervalo de control.

Midiendo la reflectividad de localización desde el fondo del ojo de cerradura (u otro resultado de soldadura) producida por el haz de soldadura, puede obtenerse una medida de la profundidad del ojo de cerradura láser (u otro resultado de soldadura). En algunas implementaciones, esto puede lograrse a velocidades de hasta 300 kHz y superiores. Se trata de una aproximación a la profundidad total de la soldadura por láser. Se realizaron experimentos de soldadura por láser pulsado mientras se realizaban observaciones con un sistema de formación de imágenes coherentes en línea como el que se muestra en la Figura 5, pero con el controlador de retroalimentación desactivado. Se comprobó que la profundidad indicada por el sistema ICI durante el proceso coincide estrechamente con la profundidad del cordón de soldadura que se revela mediante corte transversal, pulido y grabado (los procedimientos de análisis que utilizan los expertos en la materia). Por lo tanto, los datos de ICI pueden reducir o eliminar la necesidad de esta etapa de análisis costoso y destructivo. Además, dichos datos de ICI también pueden acelerar el desarrollo del proceso y proporcionar una inspección del 100 % de la soldadura y un registro de diagnóstico permanente de la soldadura al almacenar los datos de formación de imágenes en un medio de almacenamiento tal como una unidad de disco duro o un disco de estado sólido. La retroalimentación de ICI permite equipos de soldadura más productivos y posibilita la soldadura por láser donde antes no era posible ni económica.

Esto se debe a que la retroalimentación en tiempo real proporcionada por el sistema de formación de imágenes puede utilizarse para cambiar las variables del proceso de una manera que se compensen las variaciones en la materia prima (por ejemplo, un mal ajuste) y las inestabilidades (por ejemplo, una profundidad de soldadura variable) en el proceso a medida que se acelera a velocidades más altas y/o se empuja a mayores profundidades. Esto puede ampliar las posibilidades de uso de los sistemas de soldadura por láser para incluir materias primas de menor coste, mayores velocidades de procesamiento y/o una penetración más profunda, manteniendo al mismo tiempo una calidad aceptable.

Los efectos transitorios durante el inicio o el final de un procedimiento de soldadura pueden tener un efecto negativo en el resultado de la soldadura (por ejemplo, una profundidad de cordón inconsistente o un relleno insuficiente). En una realización, la retroalimentación proporcionada por el sistema de formación de imágenes puede utilizarse para reducir estos defectos controlando uno o más parámetros del proceso para compensar el comportamiento transitorio de la soldadura al inicio, al final o en ambos. En un ejemplo concreto, el sistema descrito en la Figura 5 mide la

profundidad del ojo de cerradura de soldadura a lo largo de una soldadura solapada de dos chapas de acero. Al inicio de la soldadura, los datos de formación de imágenes indican que el ojo de cerradura no ha penetrado hasta la profundidad de soldadura seleccionada. Estos datos son procesados por el controlador de retroalimentación con el resultado de disminuir la velocidad de alimentación del material con respecto al haz de procesamiento. Esto permite que el ojo de la cerradura penetre más cerca de la profundidad seleccionada que si no se hubiera realizado ningún ajuste en la velocidad.

MULTIPLEXACIÓN DEL SISTEMA DE FORMACIÓN DE IMÁGENES

En algunos casos, se utiliza un único láser de mecanizado (más generalmente una única fuente de haz de procesamiento) para procesar múltiples muestras en múltiples ubicaciones de procesamiento, y el láser de mecanizado puede combinarse con uno o más sistemas ICI. Esto permite un uso más eficaz del láser de mecanizado, relativamente costoso, y un mejor aprovechamiento de las capacidades del sistema ICI. En estas situaciones, los datos muestreados del conjunto de muestras se coordinan con la direccionalidad del láser de mecanizado, de modo que los datos muestreados pueden asociarse con una muestra específica.

En algunos casos, se utiliza un único brazo de referencia y un brazo de muestra respectivo con un retardo de propagación coincidente con precisión. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 25A. Sin embargo, un desafío único en términos de funcionalidad ICI multiplexada, es la capacidad de hacer coincidir el retardo de propagación general entre el conjunto de ubicaciones de procesamiento de tal manera que pueda utilizarse un único brazo de referencia fijo. Este desafío se deriva del hecho de que los tramos de fibra óptica pueden ser largos y el multiplexor puede añadir un retardo diferente (por ejemplo, variable) para cada canal multiplexado.

En algunos casos, en lugar de utilizar trayectorias de brazo de muestra coincidentes, se realiza un cambio dinámico de trayectoria óptica en la trayectoria de referencia al mismo tiempo que se conmuta la trayectoria del haz de procesamiento principal. Este enfoque permite una trayectoria de referencia optimizada para cada muestra y la libertad de ubicar los brazos de referencia lejos de cualquier vibración en la ubicación de procesamiento (por ejemplo, en el robot). Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 25B. En este caso, el multiplexor de referencia se utiliza para conmutar entre varios brazos de referencia fijos. De manera alternativa, puede emplearse algún otro tipo de brazo de referencia variable. En algunos casos, se proporcionan brazos de referencia separados en cada ubicación de procesamiento. Los brazos de muestra y de referencia están conectados a un lado de un acoplador de modo evanescente 2x2 y las conexiones del otro lado se multiplexan (es decir, conmutador o selector) desde cada ubicación de procesamiento a los canales comunes de iluminación y detección. Estos canales no son sensibles a la longitud de la trayectoria óptica en la mayoría de los casos prácticos. Este enfoque también minimiza las pérdidas ópticas. También pueden utilizarse obturadores ópticos en los brazos de muestra y de referencia como alternativa, o además de, un conmutador, selector o multiplexor óptico. El funcionamiento de todos los elementos dinámicos se coordina con la temporización de la direccionalidad del haz de procesamiento principal para aislar adecuadamente cualquier señal óptica de reflexión no deseada. Un ejemplo de este enfoque se muestra en la Figura 25C.

En algunos casos, los canales de iluminación y detección están conectados a un lado de un acoplador de modo evanescente 2x1, cuya salida se multiplexa a las diferentes ubicaciones de procesamiento, donde se conecta a un lado de un acoplador de modo evanescente 1x2 cuyas dos salidas se conectan a un brazo de referencia y al brazo de muestra por separado. Este enfoque elimina la complejidad y el gasto de necesitar dos multiplexores ópticos. También pueden utilizarse obturadores ópticos en los brazos de muestra y de referencia como alternativa, o además de, un conmutador óptico, selector o multiplexor. El funcionamiento de todos los elementos dinámicos se coordina con la temporización de la direccionalidad del haz de procesamiento principal para aislar adecuadamente cualquier señal óptica de reflexión no deseada. Un ejemplo de este enfoque se muestra en la Figura 25D.

En las Figuras 25A, 25B, 25C y 25D, cada célula es una ubicación de procesamiento láser diferente. La expresión "célula láser" es de uso común en la industria y describe un área cerrada en la que se procesa el material. En este caso, se muestran divisores 50:50, pero pueden utilizarse otras relaciones de división para ajustar el rango dinámico y la sensibilidad del sistema.

En algunos casos de la invención, el brazo de referencia está configurado de tal manera que la longitud de la trayectoria del brazo de referencia es ajustable, en algunos casos durante el funcionamiento del sistema o, de manera alternativa, mientras el sistema no está funcionando. Un brazo de referencia ajustable permite un funcionamiento más sencillo del sistema, ya que la longitud de la trayectoria del brazo de referencia puede ajustarse según sea necesario. Por consiguiente, en algunos casos, se proporciona la capacidad de ajustar la longitud de la trayectoria principal. Puede utilizarse un brazo de referencia ajustable, por ejemplo, para uno o más de los siguientes fines:

- compensar el movimiento de la muestra;
- ajustar el área de interés en la muestra a un área mayor o menor;
- medir múltiples muestras en un sistema ICI conmutado o de múltiples brazos;

configurar fácil y rápidamente el sistema ICI en un contexto quirúrgico.

5 Un brazo de referencia óptico ajustable puede lograrse utilizando un medio óptico extensible, un reflector de espacio libre motorizado y un aparato de acoplamiento, o utilizando un mecanismo de espejo de reflexión múltiple, por citar algunos ejemplos específicos.

10 El ajuste manual o automático de los elementos de longitud de trayectoria óptica ajustable puede realizarse durante el funcionamiento del sistema ICI. Tal ajuste es beneficioso para permitir una capacidad de ajuste del modo en que se capturan las imágenes de ICI durante el tiempo de ejecución del sistema.

15 En algunos casos, el sistema ICI se utiliza para realizar el seguimiento de la ubicación de una interfaz reflectiva interna, o algún otro punto de interés que puede cambiar con el tiempo. En este caso, la longitud de la trayectoria óptica en el brazo de referencia o de muestra se ajusta de modo que la ubicación de la interfaz reflectiva interna (o algún otro punto de interés) se convierte en el punto de diferencia de la longitud de trayectoria óptica cero, de modo que el punto de diferencia de la longitud de trayectoria óptica cero se determina dinámicamente. De manera alternativa, el punto de diferencia de la longitud de trayectoria óptica cero puede seleccionarse de tal manera que tenga una posición relativa deseada con respecto a la ubicación de la interfaz reflectiva interna (u otro punto de interés).

20 FORMACIÓN DE IMÁGENES DE ROTURA/RELLENO TRAS LA ROTURA

Los láseres se utilizan habitualmente para perforar metales, polímeros, tejidos, materiales cerámicos y de otro tipo en procesos como la perforación por percusión y la perforación con trépano. En algunos casos, los sistemas ICI se utilizan para realizar una o una combinación de las siguientes acciones:

- 25 a) rastrear el fondo de un orificio durante la perforación;
- b) controlar la velocidad de perforación;
- 30 c) observar el punto de perforación del material;
- d) anticipar el momento en el que el láser perforará el material;
- e) ajustar el proceso láser para evitar daños en las superficies situadas por debajo del nuevo orificio; y
- 35 f) confirmar que el orificio no se vuelve a rellenar después de apagar el láser;
- g) controlar la perforación, el corte o la soldadura hasta una profundidad seleccionada; y
- 40 h) controlar la perforación, el corte o la soldadura hasta una profundidad seleccionada con respecto a una interfaz de material seleccionada; y
- i) generar una indicación de rotura inminente en un proceso de perforación, corte o soldadura por láser.

45 De manera ventajosa, los sistemas ICI son capaces de realizar estas funciones sin acceso físico al lado distal de la pieza que está siendo perforada. Esta es una ventaja considerable sobre muchas técnicas de detección de rotura existentes.

50 A modo de ejemplo, el sistema ICI mostrado en la Figura 14 puede interconectarse a un sistema de perforación por láser a través de un puerto de cámara u otro acceso óptico adecuado a la línea de haz donde se combina con el haz de procesamiento mediante un espejo dicróico. Para demostrar su capacidad de rastrear el fondo del orificio durante la perforación y observar la rotura, se aplicaron pulsos individuales de 5 ms de luz de 1070 nm a láminas de acero con un espesor de 102 micrómetros. Los focos de formación de imágenes y de perforación se alinearon previamente utilizando una matriz de detectores CMOS. La perforación pudo controlarse con la energía de pulso aplicada y la presión del gas de oxígeno de asistencia. En la Figura 22 se muestran imágenes en modo M de tres experimentos de ejemplo. La Figura 22 muestra imágenes de ICI de perforación por percusión asistida por oxígeno de pulso único (duración de 5 ms indicada por las líneas rojas verticales) en láminas de acero inoxidable. La línea discontinua horizontal indica el grosor de la lámina. En la casilla "a" de la Figura 22, un pulso de 77 mJ no logra perforar la lámina, pero la lámina está casi perforada (aproximadamente 15 μm) antes de que finalice el pulso de perforación y el orificio se rellene con material fundido. En la casilla "b", un pulso de 77 mJ perfora brevemente la lámina muy cerca del final del pulso de perforación. En este punto, el gas de asistencia comienza a limpiar el orificio, dejando varios cientos de microsegundos después del pulso en los que el sistema ICI registra poca señal. Después de este período, el orificio se rellena, como indica la marca de una única interfaz en o cerca de la profundidad original de la superficie. En la casilla "c", se utiliza un pulso de perforación más fuerte que provoca la perforación del orificio en unos pocos milisegundos. Más concretamente, el aumento de la energía del pulso a 100 mJ crea un orificio en $\sim 3,5$ ms que permanece abierto después del pulso. Dado que el pulso de perforación ha mantenido el orificio abierto el tiempo suficiente para que el gas de asistencia elimine el material fundido periférico, el orificio no se rellena y esto se indica

en la imagen ICI, lo que confirma que se ha realizado una perforación con éxito. Estas interpretaciones se confirman mediante mediciones de la potencia óptica transmitida a través de la lámina y detectada con un fotodiodo de alta velocidad. La presencia de una señal que se origina en la profundidad de la pared distal del material que está siendo perforado una vez finalizada la perforación puede indicar la presencia de escoria y/o que el diámetro del orificio de salida es comparable al del foco del haz de formación de imágenes.

Con el uso de un procesador de retroalimentación como el que se detalla en la Figura 5, un sistema ICI puede controlar la velocidad de perforación señalando un cambio en los parámetros del proceso (por ejemplo, la energía del pulso) basándose en las señales de interferometría procesadas que mide. Del mismo modo, cuando se detecta una rotura, el procesador de retroalimentación puede indicar que se detenga el láser de perforación, opcionalmente después de un periodo de sobreperforación seleccionado. Esto presenta la importante característica de reducir la probabilidad de que se produzcan daños de tipo "golpe en la pared posterior" en los materiales presentes en el lado distal del material que está siendo perforado. Esta capacidad es una ventaja considerable que ofrecen los sistemas ICI en áreas de aplicación tales como la fabricación de orificios de refrigeración en turbinas de gas.

La marca de rotura es diferente en diferentes materiales. En metales, puede observarse que inmediatamente antes de la perforación, se produce una aparente aceleración en la velocidad de penetración del láser de perforación.

Esto puede utilizarse como una marca para indicar una perforación inminente y permitir que se realicen preparativos para detener o cambiar de otro modo el proceso cerca del punto de perforación. Si el proceso se detiene inmediatamente antes de la perforación, puede utilizarse un procedimiento químico (por ejemplo, grabado ácido ligero) u otro procedimiento para completar el orificio. Además, puede observarse el flujo de líquido y la posterior obstrucción del orificio tras la fusión. Los sistemas ICI pueden utilizarse para generar un registro de estos eventos y/o para generar una alarma, un aviso, una advertencia y/o para solicitar un procesamiento adicional para limpiar el orificio.

En otro ejemplo no cubierto por la presente invención tal como se reivindica, se utiliza un sistema ICI para controlar la perforación por láser de vías de placas de circuito impreso y/o el corte de ranuras en placas de circuito impreso. Los expertos en la materia saben que estas estructuras a menudo se forman mediante la perforación de una o más capas compuestas de materiales conductores y/o aislantes. Los procesadores de imágenes ICI son capaces de determinar la profundidad que los materiales han sido penetrados por el proceso y la proximidad del proceso a las distintas capas de material. Concretamente, en los datos de formación de imágenes, las capas subsuperficiales pueden identificarse durante la perforación por su tendencia a parecer que se elevan en la imagen, tal como indica la etiqueta AI en la Figura 11B. Simultáneamente, el fondo del orificio parece caer (MF). La capa subsuperficial se perfora cuando estas dos marcas se encuentran como se demuestra en la Figura 11A en el punto P. Esta característica (a la que se hace referencia en el presente documento como "característica de tijera") y sus precursores (como las características resaltadas por MF y AI en la Figura 11B) tienen una utilidad sustancial para el control de retroalimentación en muchas aplicaciones que, en diversas realizaciones incluyen, entre otras, corte, perforación, cirugía láser y cualquier otra técnica de eliminación de material en medios semitransparentes y/o totalmente transparentes. La detección de características de tijera y sus precursores permite que el procesador de imágenes y/o el controlador de retroalimentación inicien, detengan, ralenticen y/o aceleren el proceso de perforación efectuando cambios en una o más variables del proceso y/o guíen el proceso de modificación del material hacia ubicaciones relativas a características subsuperficiales en el material que está siendo modificado, incluso si dichas características no se caracterizaron antes del inicio del procesamiento. Estas capacidades son ventajosas porque permiten un procesamiento general más rápido y/o más preciso de un material. En algunas realizaciones, los datos de formación de imágenes de ICI proporcionan orientación a márgenes quirúrgicos seleccionados sobre tejido(s) que son sensibles al daño del láser, por lo que permiten procedimientos quirúrgicos con láser más seguros que no podrían realizarse fácilmente sin estas ventajas.

En otro ejemplo no cubierto por la presente invención tal como se reivindica, se utiliza un sistema ICI para detectar la rotura de un haz de soldadura y la separación entre los dos materiales en tiempo real durante un proceso de soldadura. Esta información es interpretada por los componentes electrónicos. En algunos casos, se genera una salida de señal para que la reciba un operador y/o un sistema electrónico de control del proceso adicional. Por ejemplo, el sistema ICI que se muestra en la Figura 14 puede interconectarse con el subsistema de suministro del haz (a través de un puerto de cámara/otro acceso óptico y un espejo dicróico) de una máquina de soldadura por láser de ojo de cerradura aplicada para soldar por solapamiento dos láminas de metal juntas (véase la Figura 22). En este proceso de ejemplo, se desea determinar el momento en que la soldadura penetra el primer material (F), el ajuste de las dos superficies (A) en el punto de penetración y la penetración adicional de la soldadura en el segundo material (D). Al ajustar la longitud del brazo de referencia (416), el punto B de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero se sitúa ligeramente por debajo (una distancia suficiente por debajo como que no se produzcan artefactos de ambigüedad conjugada compleja en la imagen) de la profundidad de penetración máxima esperada de la soldadura. Esto resulta útil para resaltar las señales más profundas desde el interior del material puesto que las características más profundas reflejan naturalmente menos luz en el sistema de formación de imágenes y el sistema es más sensible a diferencias de trayectoria óptica más cortas.

El sistema de formación de imágenes dispone de un campo de visión unilateral representado por "E". A medida que se penetra el material, comienza a registrarse una señal cuando el material proximal es penetrado hasta la profundidad

C y entra en el campo de visión. A medida que el proceso alcanza la profundidad F, el sistema de formación de imágenes puede registrar una aceleración de la penetración cuando la pared distal del material proximal pierde su resistencia mecánica y se deforma. A medida que se penetra la pared distal a una profundidad F, su señal se atenúa o desaparece por completo, lo que indica una rotura. En este punto, el sistema de formación de imágenes registra una reflexión de la pared proximal del material distal. La diferencia en la posición axial de estas dos reflexiones indica la separación/ajuste de soldadura de las dos piezas (A) de material, que es una salida que puede visualizarse, almacenarse y/o transmitirse a un controlador de retroalimentación. A medida que el haz de proceso continúa penetrando en el material distal, la profundidad puede visualizarse como antes y, de este modo, la profundidad final de la soldadura dentro del material distal también puede medirse, visualizarse, registrarse en un medio de almacenamiento y/o transmitirse a un controlador de retroalimentación.

HAZ DE FORMACIÓN IMÁGENES INTENCIONADAMENTE DESENFOCADO/GRANDE PARA DETERMINAR LA PROFUNDIDAD MÁS BAJA O MÁS ALTA DENTRO DE UNA REGIÓN

En algunos casos, el sistema ICI está configurado de tal manera que el haz de formación de imágenes ilumina un área o volumen de la muestra que abarca múltiples características reflectivas de la muestra que están a diferentes alturas axiales, o diferentes desplazamientos transversales con respecto al eje central del haz de formación de imágenes, o cualquier combinación de los mismos. En algunos casos, las características reflectivas de la muestra pueden estar completamente en la superficie de la muestra. En otros casos, las características reflectivas pueden estar relacionadas con estructuras internas, interfaces, objetos u otros elementos reflectivos de la muestra. Esto permite la detección simultánea de múltiples alturas de características dentro del área o volumen iluminado del haz de formación de imágenes que pueden medirse sin la necesidad de un escaneado transversal o una etapa de control de calidad adicional después del procesamiento. En algunas realizaciones de la invención, puede obtenerse una eficiencia considerable cuando el haz de formación de imágenes se suministra coaxialmente con un haz de procesamiento de muestra opcional.

Como ejemplo específico, un sistema ICI como el que se muestra en la Figura 14 está conectado a un puerto de acceso óptico en el sistema de suministro del haz láser para un dispositivo que produce hoyuelos en metales. En este caso, la longitud focal del colimador del brazo de muestra (407 en la Figura 14) se selecciona de tal manera que sea corta con el fin de producir un diámetro de haz de formación de imágenes pequeño dentro del cabezal de suministro antes de que alcance el objetivo de enfoque (no mostrado). Los haces de formación de imágenes y procesamiento se combinan mediante un espejo dicróico. En este ejemplo, el haz de procesamiento puede ser, por ejemplo, un láser de dióxido de carbono, un láser de Nd:YAG, un láser de fibra o cualquier otro láser capaz de producir hoyuelos en metales. Para este ejemplo, se supone que el brazo de muestra dispone de una lente colimadora del brazo de muestra y un objetivo del brazo de muestra (que también funciona como objetivo para el láser de modificación) tal como se muestra en la Figura 5 (véanse los elementos 351 y 314). En la muestra, el haz de formación de imágenes tiene un diámetro aproximado igual al producto del diámetro del campo modal de la fibra de imágenes (la fibra entre los elementos 402 y el colimador de fibra 409 del brazo de referencia 416) y la relación de las longitudes focales de la lente del objetivo de la muestra y la lente del colimador del brazo de muestra (lente 314, 353 de la Figura 5). Para un diámetro de campo modal típico de 5 μm y una longitud focal del objetivo de muestra de 100 mm, una longitud focal del colimador del brazo de muestra de 5 mm produciría un punto de 100 μm de diámetro en la muestra. Además, el diámetro del punto de muestra puede modificarse aún más variando la distancia entre la lente colimadora del brazo de muestra y la punta de la fibra, pero esto puede no traducirse en una eficiencia óptima de recogida de la luz. Cuando el haz de formación de imágenes alcanza la muestra, partes del haz se retroreflejan desde una pluralidad de profundidades. Estas reflexiones son recibidas por el sistema de formación de imágenes y crean una salida de interferometría basada en la longitud de su trayectoria óptica. Esta salida es detectada y procesada electrónicamente por un dispositivo procesador de señales mediante algoritmos tales como el algoritmo de filtro homodino, o alguna combinación de transformadas de Fourier con remodelación espectral según sea necesario, remuestreo interpolativo según sea necesario, filtrado de Kaiser-Bessel (por ejemplo, Vergnole y col., véase Sébastien Vergnole, Daniel Lévesque y Guy Lamouche, Optics Express 18, 10446-61 (2010)) y genera una representación de la reflectividad de la muestra en función de una o más profundidades. Esta medición puede adquirirse a velocidades superiores a 300 kHz utilizando la tecnología de detectores disponible. Se han logrado velocidades de procesamiento de imágenes superiores a 600 kHz procesando los datos de la imagen en unidades de procesamiento gráfico. En algunas realizaciones, esta técnica se aplica al control de procesos en tiempo real. En el caso específico de los hoyuelos creados con láser, estas estructuras se utilizan para crear un espacio entre dos placas que posteriormente se sueldan entre sí. La altura del hoyuelo sobre la superficie original es un indicador importante del espacio que cabe esperar durante el proceso de soldadura posterior. Los hoyuelos suelen crearse en grupos de 2 o más. En algunas realizaciones, utilizando la medición *in situ* de la geometría de los hoyuelos finales, las insuficiencias detectadas en las alturas de los hoyuelos son alimentadas desde el sistema de procesamiento de imágenes a un controlador de retroalimentación (tal como en la Figura 5) para provocar un cambio en los parámetros del proceso de formación de hoyuelos.

La Figura 21 muestra un haz de formación de imágenes que se aplica a la muestra de tal manera que su diámetro sea mayor que una característica de interés. Las reflexiones se miden desde varias profundidades en la muestra (A-C). Estas profundidades pueden medirse simultáneamente en una única adquisición óptica (barrido axial también llamado escaneado A). Cuando el haz de formación de imágenes se suministra coaxialmente con el haz utilizado para procesar estas características, puede medir rápidamente la altura y profundidad de las características sin la necesidad de un

etapa de medición adicional. La representación de la reflectividad de la muestra en función de una o más profundidades se representa esquemáticamente en el lado derecho de la Figura 21. Puede observarse un pico respectivo en la intensidad del escaneado A que representa cada uno de los siguientes valores: A, altura de la punta del hoyuelo, B, altura de la superficie virgen y C, altura del valle del hoyuelo. La altura del hoyuelo antes mencionada está representada por A-B. Otras superficies a otras alturas en la característica pueden generar una marca en el escaneado A, pero se han omitido en la Figura 21 para mayor claridad.

En la Figura 21, también se demuestra la práctica previamente introducida de colocar el punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero (D) dentro del material que está siendo medida. Si la reflexión desde la profundidad A es mucho más brillante que la de la profundidad C, entonces esta configuración mejora la calidad de la imagen, ya que los sistemas de formación de imágenes coherentes de dominio espectral generalmente registran reflexiones desde diferencias de trayectoria óptica más grandes con menos sensibilidad, desplazando así el rango dinámico del sistema de formación de imágenes y reduciendo la saturación potencial.

Los procedimientos descritos en el presente documento para medir las alturas de las características de la superficie en una muestra también pueden utilizarse para medir las alturas de las características por debajo de la superficie de la muestra, tal como se ilustra, a modo de ejemplo, en la Figura 26. En algunos casos, esta puede ser una forma efectiva de caracterizar el material en la región inmediata del haz de procesamiento. En algunos casos, este procedimiento puede utilizarse para alinear un haz de procesamiento.

Ejemplo de implementación que muestra la verificación del control de perforación

Utilizando el control de profundidad totalmente automático proporcionado por el sistema de formación de imágenes coherentes en línea mostrado en la Figura 5, se perforaron 14 orificios a profundidades que varían constantemente en 30 micrómetros de un orificio a otro. El algoritmo de filtro homodino que se ejecuta en un PC (ejemplo de un componente electrónico de procesamiento de imágenes, 332) se utilizó para procesar eficientemente los datos de formación de imágenes brutos de la cámara lineal de silicio (330) y determinar si se requería más exposición al láser de mecanizado para lograr la profundidad deseada. Un usuario programó la(s) profundidad(es) deseada(s) para la serie de orificios en el PC. El PC leyó la programación y sintetizó las formas de onda homodinas apropiadas para mezclarlas con los datos de formación de imágenes brutos y obtener la reflectividad de la muestra a la profundidad objetivo. Durante el proceso de perforación del orificio, cuando se alcanzó un umbral seleccionado de la salida homodina (en este caso, 5 veces la intensidad RMS del ruido de fondo), el PC envió una señal al controlador de retroalimentación (334) para detener el proceso. En esta realización, el controlador de retroalimentación consistía en un subsistema de salida digital del PC (National Instruments PCI-6229) y un generador de funciones (Tektronix AFG3022B). Este controlador de retroalimentación dirige un láser de fibra CW modulado (320) para emitir pulsos (de una duración del orden de 100 microsegundos) que perforan la muestra. Este sistema es capaz de producir un tiempo de respuesta de retroalimentación de bucle abierto superior a 300 microsegundos.

Para confirmar el resultado, se utilizó un sistema separado de tomografía de coherencia óptica de barrido para medir la topología de la muestra procesada. Alineado para escanear dentro del plano en el que se perforaron los orificios, el sistema mide la profundidad de los orificios perforados. La imagen resultante se muestra en la Figura 24 y muestra 14 orificios con profundidades que varían constantemente en 30 micrómetros de un orificio a otro.

CORRECCIÓN DEL ESCÁNER

Los haces de formación de imágenes y de procesamiento pueden ser dirigidos a la muestra usando ópticas y lentes de escaneado activas. Como apreciarán los expertos en la materia, el escaneado del haz de procesamiento permite un movimiento rápido y preciso del foco óptico, lo cual es deseable para muchas aplicaciones de procesamiento de materiales (por ejemplo, soldadura de automóviles). La inclusión de escáneres en los subsistemas de procesamiento de materiales ICI aumenta el procesamiento de materiales escaneados con algunas o todas las muchas ventajas de los sistemas ICI descritos en el presente documento. La combinación de ópticas/lentes de escaneado puede provocar modulaciones en la longitud de la trayectoria óptica hacia el material a medida que los haces se escanean de una ubicación a otra, haciendo que, en un ejemplo, una superficie plana aparezca curvada. La gestión óptica de estas modulaciones puede relajar los requisitos de diseño para el campo de visión de profundidad y/o para cálculos de retroalimentación más eficientes desde el punto de vista computacional dentro del sistema ICI. En algunas aplicaciones, las modulaciones pueden gestionarse digitalmente aplicando un desplazamiento de profundidad (por ejemplo, dentro de los procesadores de imagen y/o retroalimentación) que se correlaciona con la posición óptica de escaneado.

En un caso, las modulaciones de la longitud de la trayectoria se compensan sustancialmente ajustando la longitud del brazo de referencia en una cantidad igual o aproximada a la modulación esperada y/o medida generada por la posición de escaneado. Tal ajuste podría realizarse mediante una etapa de traslación motorizada, un elemento piezoeléctrico, estirando la muestra o fibra de referencia, un solenoide electromagnético o una bobina de voz y/o incluyendo varios espejos de referencia que puedan introducirse o retirarse de la trayectoria del haz del brazo de referencia. Pueden incluirse ajustes adicionales en el etapa de procesamiento de imágenes añadiendo un desplazamiento digital a la medición de profundidad notificada igual a la corrección deseada. En algunos casos, las modulaciones de la longitud de la trayectoria presentes se miden directamente para toda el área y/o trayecto que se va a procesar en la muestra

mediante los componentes de formación de imágenes de ICI. Esto puede lograrse, por ejemplo, colocando material virgen en el sistema de procesamiento y registrando los datos de ICI a medida que las ópticas se escanean a través de las trayectorias de movimiento que se utilizarán al procesar el material. La diferencia entre la topología de superficie indicada y/o rastreada en estos datos y la topología de superficie conocida de la muestra puede utilizarse como una función de corrección para la gestión óptica y/o digital de las modulaciones de longitud de trayectoria óptica inducidas por el escaneado.

El sistema de formación de imágenes recopila datos durante este programa para informar sobre la ubicación de la superficie virgen. Puede ser ventajoso utilizar el hardware de ajuste de la longitud de la trayectoria en los brazos de muestra y/o de referencia para rastrear la superficie virgen si la longitud de su trayectoria cambia en más que todo el campo de visión axial del sistema. Pueden realizarse ajustes iterativos a la corrección hasta que el nivel de la superficie virgen parezca lo suficientemente plano para el uso de algoritmos de procesamiento de imágenes mientras se ejecuta el programa de escaneado.

La posición de escaneado transversal de un haz enfocado a través de una lente de escaneado se aproxima al producto de la longitud focal efectiva de la lente y el ángulo de escaneado expresado en radianes. La aberración cromática (es decir, los cambios en la longitud focal en función de la longitud de onda) de la lente puede causar una desviación espacial transversal entre los haces de formación de imágenes y de procesamiento a medida que se escanean a través del material si ambos haces se introducen en la lente con el mismo ángulo de escaneado. En algunas realizaciones, el ángulo de escaneado del haz de formación de imágenes puede corregirse previamente antes de combinarse con el haz de procesamiento añadiendo pequeñas desviaciones angulares al haz de formación de imágenes mediante el uso de galvanómetros u otros elementos activos insertados en la trayectoria del haz de formación de imágenes entre el colimador de muestras. Estos elementos activos se controlan para estén sincronizados con la óptica de barrido principal que escanea los haces combinados. La verificación de esta corrección puede realizarse enfocando ambos haces sobre un conjunto de detectores CCD o CMOS u otro equipo de perfilado de haces, tal como PRIMES FocusMonitor.

La interferometría de baja coherencia también puede realizarse con configuraciones de una fuente óptica de barrido espectral (denominada "fuente de barrido", "formación de imágenes en el dominio de la frecuencia óptica" y/o a veces "modo de bloqueo en el dominio de Fourier") en lugar de, o además de, configuraciones basadas en espectrómetros (denominadas "espectrales" o "en el dominio de Fourier"). Choma y col. (Michael Choma, Marinko Sarunic, Changhuei Yang y Joseph Izatt, *Optics Express* 11, 2183-9 [2003]) distinguen y comparan estos enfoques. Se entiende que cualquiera de estos enfoques, o ambos, pueden utilizarse con cualquiera de los sistemas de formación de imágenes coherentes en línea descritos y reivindicados en el presente documento. Aquellos con conocimientos ordinarios apreciarán también que estos dos enfoques (cuando se utilizan juntos o por separado) responden de manera diferente al movimiento presente en la muestra, como exponen Yun y col. (S. H. Yun, G. J. Tearney, J. F. de Boer y B. E. Bouma, *Optics Express* 12, 2977-2998 (2008)). El uso de una o una combinación de estas técnicas en las realizaciones de ICI se selecciona en función de la velocidad de los objetos en movimiento (véase Yun y col.), la necesidad de aislar los sensores de formación de imágenes de las emisiones ópticas del proceso (en este caso, resulta ventajosa la detección por espectrómetro), la velocidad de formación de imágenes (actualmente, las fuentes de barrido pueden generar imágenes más rápidamente que los espectrómetros, como exponen Wieser y col. Wolfgang Wieser, Benjamin R Biedermann, Thomas Klein, Christoph M Eigenwillig y Robert Huber, *Optics Express* 18, 14685-704 (2010)), y el coste y la complejidad generales del dispositivo (actualmente, las fuentes de barrido son relativamente complejas y caras y el coste de usar ambas técnicas es aditivo).

La Figura 27 es un diagrama de bloques esquemático de otro ejemplo no cubierto por la presente invención tal como se reivindica. Se muestra un láser de modificación (ML) que genera un haz de modificación que pasa a través de una fibra y una lente de camino a un espejo dicróico (DM), donde se combina con un haz de formación de imágenes procedente de un módulo óptico ICI. Los haces combinados son ahora sustancialmente coaxiales. Son reflejados por un espejo a través de una lente objetivo común en la boquilla hacia la muestra. La luz de formación de imágenes reflejada en la muestra vuelve al módulo óptico ICI. El módulo óptico ICI tiene una salida a un controlador de, procesador ICI que genera un control de retroalimentación automático para el ML y que, de manera más general, genera una señal de control para controlar al menos un parámetro de procesamiento.

En la Figura 27, el sistema ICI se compone de dos elementos: un módulo óptico ICI y un procesador/controlador ICI. El módulo óptico ICI comprende los elementos electroópticos del sistema ICI e interactúa ópticamente con la boquilla de un sistema de procesamiento de material por láser y eléctricamente con el procesador/controlador ICI. El procesador/controlador ICI es responsable del procesamiento de datos de imágenes y de la generación de señales de control para el funcionamiento del láser de mecanizado. Los módulos ICI pueden combinarse entre sí o pueden combinarse con otros elementos del sistema.

En otra configuración, el sistema ICI puede configurarse, de manera opcional, para interactuar con elementos adicionales del sistema, tal como se muestra en la Figura 28. El procesador/controlador ICI también puede interactuar eléctricamente con un controlador láser, y puede proporcionar señales de control al controlador láser para el funcionamiento del láser de mecanizado. El procesador/controlador ICI puede interactuar con otros aspectos del sistema general de procesamiento de materiales por láser, a los que se hace referencia como "control y gestión de la

mayor parte del sistema". Estos aspectos adicionales del sistema pueden incluir control de material, control de alimentación, control de posición de boquilla, control de flujo de gas y otros aspectos que puedan ser necesarios en una implementación individual.

- 5 Pueden considerarse casos similares adicionales para incorporar el funcionamiento con múltiples muestras y boquillas y/o diferentes números de espejos giratorios en la boquilla y/o diferente orden de los espejos giratorios en la boquilla. Estos se considerarían equivalentes para alguien con conocimientos ordinarios en la materia.

10 Para permitir una retroalimentación completamente automática en el mecanizado por láser pulsado, se utilizan imágenes coherentes en línea para enviar la información apropiada a un procesador de imágenes y a un controlador de retroalimentación especialmente diseñados. Por ejemplo, en algunas realizaciones, la ventana de formación de imágenes del sistema de formación de imágenes coherentes en línea está sincronizada con un retardo de tiempo específico con respecto al inicio del pulso óptico de modificación del material. El retraso óptimo depende del tipo de retroalimentación que se desee, así como de los objetivos del proceso de modificación del material. La retroalimentación de las mediciones intrapulso (es decir, mientras la luz de la fuente de modificación del material incide sobre el material) produce un resultado diferente al que se obtiene después de que el material se haya relajado. La retroalimentación intrapulso puede utilizarse para controlar la profundidad total de penetración del proceso de modificación del material. En particular, la retroalimentación intrapulso se beneficia de una respuesta de retroalimentación muy rápida (tiempos de respuesta del orden de 1-100 microsegundos) para una buena precisión debido a la velocidad a la que el haz de procesamiento puede modificar el material. La retroalimentación de tiempos posteriores (es decir, cuando la fuente de luz de modificación del material no incide sobre la muestra) se utiliza para controlar la morfología final del orificio cuando interesa la geometría relajada de la muestra (por ejemplo, metal).

25 En los casos en que se utiliza una fuente de luz de modificación de material casi continua, la sincronización del sistema de formación de imágenes con el inicio del proceso de modificación de material es importante para la retroalimentación automática. En algunos casos, la adquisición de imágenes de la muestra antes de que comience la modificación del material es útil para permitir la retroalimentación relativa a la posición de la muestra virgen y/o las propiedades de retrodispersión óptica. Por ejemplo, la retroalimentación para controlar la modificación relativa a la parte superior de la muestra se puede realizarse sobre la marcha. Además, pueden utilizarse propiedades de retrodispersión óptica vírgenes para ajustar los parámetros de procesamiento de imágenes y/o algoritmos de control de retroalimentación con el fin de permitir una retroalimentación sólida para materiales no homogéneos.

35 En la unidad óptica de formación de imágenes coherentes en línea, la retroalimentación para los procesos prácticos de mecanizado se ve considerablemente facilitada por el uso de un objetivo focal común para suministrar a la muestra tanto la luz de formación de imágenes como la de mecanizado. Esto hace que la integración con las plataformas y tecnologías de mecanizado existentes en el mercado sea significativamente más fácil y menos costosa que si se tratara de suministrar a la muestra la luz de formación de imágenes y de mecanizado utilizando objetivos focales separados y, en algunas realizaciones, un espejo dicróico adicional entre la muestra y los objetivos. En particular, el suministro de gas de proceso, el daño al espejo dicróico debido a las eyecciones del proceso y la compensación de la dispersión se ven obstaculizados por este último enfoque. Los sistemas formación de imágenes coherentes en línea evitan este problema mediante el uso de un objetivo focal común para suministrar a la muestra tanto la luz de formación de imágenes como la de mecanizado. En algunas realizaciones, la integración en los sistemas existentes se ve considerablemente favorecida por el funcionamiento de la fuente de luz de formación de imágenes en la región espectral comprendida entre 400 y 950 nm, ya que el hardware del puerto de cámara existente a menudo es compatible con dichas longitudes de onda. Además, esta región espectral permite el uso de hardware detector basado en silicio más rápido y/o más sensible.

50 El diseño y la configuración del procesador de imágenes en realizaciones de formación de imágenes coherentes en línea difieren de los que se enseñan en otras aplicaciones de interferometría de baja coherencia (tal como la tomografía de coherencia óptica). En los sistemas de formación de imágenes ICI, no es adecuado almacenar en búfer varios miles de adquisiciones espectrales antes del procesamiento, como suele ser la práctica en OCT. En algunos casos, los sistemas ICI adquieren espectros en conjuntos de 1 a 100 para reducir el tiempo de latencia de la retroalimentación. Se requieren algoritmos de procesamiento de imágenes especializados, detección de interfaz en línea y un controlador de retroalimentación, así como algoritmos apropiados para reducir la información de imágenes sin procesar a uno o pocos parámetros de salida mediante la identificación de interfaces seleccionadas en la muestra que indican las condiciones del proceso, tales como la profundidad del material eliminado, la profundidad del material restante, los cambios en la altura del material, los cambios en las propiedades ópticas del material, los cambios en el espesor del material.

60 Cuando se procesan materiales opacos, los algoritmos de seguimiento a menudo pueden identificar positivamente la parte inferior de la característica mecanizada como la primera señal con una intensidad superior a un umbral seleccionado a medida que el algoritmo se desplaza desde la mayor profundidad a la menor profundidad. En algunos casos, el sistema de formación de imágenes recoge fotones de dispersión múltiple en cantidad suficiente como para activar falsamente esta condición. En estas circunstancias, el fondo del orificio puede ser identificado positivamente por los algoritmos de seguimiento como el primer pico por encima de un umbral seleccionado a medida que el algoritmo se desplaza desde la mayor profundidad a la menor profundidad. En algunas realizaciones, los algoritmos de

procesamiento de imágenes pueden calcular el promedio de los resultados de una o más adquisiciones para mejorar la relación señal-ruido. Un etapa posterior en el procesamiento de imágenes ICI para la retroalimentación es la aplicación de algoritmos para reducir la información de imágenes sin procesar a uno o pocos parámetros de salida mediante la identificación de interfaces seleccionadas en la muestra que indican las condiciones del proceso, tales como la profundidad del material eliminado, la profundidad del material restante, los cambios en la altura del material, los cambios en las propiedades ópticas del material, los cambios en el espesor del material. Dependiendo de la retroalimentación deseada, una o más de estas mediciones se transmiten a un controlador de retroalimentación que puede ajustar los parámetros del proceso basándose en estas mediciones. En algunas realizaciones, este algoritmo utiliza procedimientos de retroalimentación proporcional-integral-derivada. Uno o más de un parámetro de salida pueden interconectarse con la fuente de luz de mecanizado y/u otros subsistemas dentro de la plataforma de modificación de material.

Los parámetros de control dentro de la plataforma de modificación de material que se controlan pueden incluir, por ejemplo, entre otros, la posición de la muestra, la dirección y/o el enfoque del haz de modificación de material, la duración del pulso de la fuente de luz de modificación de material, la intensidad, la energía del pulso, la fluencia del pulso y/o la frecuencia de la luz, la presión del gas de asistencia y/o el tipo de gas.

El procesador de imágenes puede almacenar los datos presentes en uno o más puntos de la cadena de procesamiento para su uso en la resolución de problemas y la garantía de calidad.

La alta reflectividad de algunos materiales puede provocar la saturación del detector o elevar las características distantes de la función de dispersión de puntos del sistema (a veces denominadas "hombros") por encima del ruido de fondo. Cualquiera de estas situaciones puede reducir la calidad de la imagen y dificultar el procesamiento automático de la retroalimentación. Algunas realizaciones de detectores ICI y/o procesadores de imágenes son capaces de detectar estas condiciones adversas y adoptar medidas correctivas sobre la marcha. Por ejemplo, la saturación del detector en las franjas de interferencia constructiva del interferograma tiende a recortar la parte superior de las franjas, produciendo una potencia de componente de frecuencia adicional repartida en varias profundidades, generando así artefactos de imagen. En este ejemplo, algunas realizaciones de controladores ICI pueden detectar que uno o más píxeles del detector están en niveles de saturación y cambiar a un algoritmo de procesamiento diferente que sea adecuado para la saturación. Incluso con un espectro recortado, la mayor parte de la potencia de la señal se sigue suministrando en la frecuencia fundamental y, por lo tanto, en algunas realizaciones, puede utilizarse un procedimiento de búsqueda del valor máximo para localizar la profundidad del reflector brillante. Algunas realizaciones de la invención pueden ajustar dinámicamente o estáticamente la ganancia del detector, ajustar la sensibilidad del detector, ajustar el tiempo de integración del detector, modular la potencia del brazo de referencia y/o modular la intensidad de la iluminación, al igual que otros procedimientos de gestión de la saturación. En los casos en los que el detector no se ha saturado, pero los hombros de la función de dispersión de puntos se han elevado sustancialmente por encima del ruido de fondo, algunas realizaciones de la invención emplearán compresión de rango dinámico digital para disminuir la intensidad de los hombros por debajo de niveles aceptables (generalmente por debajo del ruido de fondo).

En algunos casos, una o más de las salidas del controlador de retroalimentación están interconectadas con la unidad de formación de imágenes coherentes en línea o la unidad de procesamiento de imágenes, para permitir el ajuste sobre la marcha de los parámetros dentro de estas unidades a fin de lograr un control de retroalimentación sólido. Ejemplos de dichos parámetros incluyen, entre otros, potencia del brazo de referencia, longitud del brazo de referencia, polarización del haz de imagen, obstrucción de la muestra o de la referencia (es decir, bloqueo del haz), tiempo de adquisición de imágenes (tiempo de integración y número de imágenes por promediar), ganancia del detector y/o rango dinámico.

Las técnicas de retroalimentación más avanzadas que pueden ser empleadas en algunas realizaciones incluyen:

- Seleccionar una ventana de ~10 profundidades alrededor del frente de mecanizado primario y rastrear el frente dentro de esas profundidades.
- Seleccionar otra ventana de ~10 profundidades a cierta distancia (esto depende del grado de antelación con que se desee conocer la rotura) por debajo de la profundidad del frente de mecanizado primario y buscar señales de interfaz dentro de esa profundidad.
- Cuando se encuentre una interfaz subsuperficial, verificar la marca con las características conocidas para asegurarse de que se trata de la interfaz objetivo seleccionada.
- Informar de la profundidad del margen al controlador de retroalimentación.
- El controlador de retroalimentación decide si el proceso debe ralentizarse o detenerse y efectúa dicho control en el equipo de proceso. Algunos casos presentan uno o más de los siguientes:

- Óptica configurada para colocar el enfoque de la imagen lo más cerca posible de la profundidad objetivo a fin de maximizar la SNR. Esto puede significar que los focos de formación de imágenes y de mecanizado estén desplazados axialmente entre sí.
- 5 - Óptica configurada para evitar reflexiones en las paredes laterales que puedan confundir al sistema de retroalimentación de procesamiento de imágenes;
- Temporización del sistema para controlar el momento de activación del sistema de formación de imágenes;
- 10 - Procesamiento de imágenes optimizado, incluyendo el algoritmo de filtro homodino, que procesa la intensidad de reflexión a partir de un subconjunto reducido de profundidades de muestra. Además, este algoritmo proporciona una función de dispersión de puntos de mayor calidad que las técnicas estándar (véase la Figura 20);
- 15 - Utilización de una FPGA o ASIC en el procesador de imágenes para reducir la latencia de procesamiento, lo que permite aumentar la velocidad de procesamiento;
- Algoritmos de interconexión y/o seguimiento de la tendencia de la señal que pueden ejecutarse en tiempo real.

20 Los términos "retroalimentación" y "control de retroalimentación", cuando se utilizan para describir la función de la invención descrita en el presente documento, se refieren a un control por retroalimentación electrónico y/o electroóptico automático, en el que los datos generados por el subsistema de formación de imágenes ICI son procesados posteriormente por un controlador para proporcionar una señal de control a un subsistema de procesamiento de material.

25 Cabe señalar que cualquiera de los casos y/o configuraciones descritos en el presente documento puede implementarse con una lente objetivo común para el haz de modificación y el haz de formación de imágenes. La longitud de la trayectoria óptica en la presente solicitud se refiere a todo el espacio y la materia atravesados por la luz de formación de imágenes que contribuyen al retardo de la trayectoria óptica, incluyendo la longitud del camino físico, así como la dispersión óptica y otras variaciones de fase dependientes de la frecuencia óptica, medios ópticos con
30 velocidades de fase y/o de grupo variadas.

REIVINDICACIONES

1.Procedimiento de control de al menos un parámetro de procesamiento de un proceso de modificación de material, en donde el proceso de modificación de material es un proceso de soldadura de ojo de cerradura, comprendiendo el procedimiento las siguientes etapas:

generar una luz de formación de imágenes (20) con una fuente óptica de formación de imágenes; producir una salida de interferometría (24) utilizando al menos un componente de la luz de formación de imágenes (20) que se suministra a una muestra, basándose la salida de interferometría (24) en al menos una longitud de trayectoria óptica hacia la muestra en comparación con otra longitud de trayectoria óptica; y controlar automáticamente al menos un parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material basándose en la salida de interferometría (24); en donde el proceso de modificación de material comprende la aplicación de un haz de procesamiento de material (14) a la muestra

caracterizado por que

en donde la al menos una longitud de trayectoria corresponde al menos a dos longitudes de trayectoria hasta los respectivos reflectores en la ubicación de muestra (16), y la otra longitud de trayectoria se extiende a lo largo de un brazo de referencia, en donde las al menos dos longitudes de trayectoria hasta los respectivos reflectores en la ubicación de muestra (16) comparten componentes ópticos comunes en el suministro de reflexiones de la ubicación de muestra (16) a un combinador y en donde las al menos dos longitudes de trayectoria son diferentes y las reflexiones correspondientes se miden a partir de varias profundidades en la muestra, midiéndose estas profundidades simultáneamente en una única adquisición óptica; y analizar la salida de interferometría (24) para producir una medición de profundidad que refleje la profundidad a la que el haz de procesamiento de material (14) penetra en la ubicación de muestra (16).

2.Procedimiento según la reivindicación 1, en donde el control automático del al menos un parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material se efectúa en tiempo real durante dicho proceso;

o

que comprende determinar el momento en que, o si, la salida de interferometría (24) realiza una transición pasando de comprender sustancialmente solo la luz reflejada a lo largo de una trayectoria de referencia a basarse en la longitud de la trayectoria de muestra en comparación con la longitud de la trayectoria de referencia; y generar una retroalimentación para influir en al menos un parámetro de procesamiento del proceso de modificación de material basándose en la salida de interferometría (24) teniendo en cuenta la transición.

3.Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende, además:

generar un registro del proceso de modificación de material basándose en la salida de interferometría (24) en una pluralidad de momentos; y almacenar el registro; comprendiendo, además, de manera opcional, procesar múltiples instancias de la salida de interferometría (24) para identificar un cambio en la salida de interferometría (24) con respecto a un material que está siendo procesado, y en donde el control de retroalimentación es una función de dicho cambio.

4.Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde el haz de procesamiento de material (14) es al menos uno de entre un haz láser, un haz de iones y un haz de electrones; en donde, de manera opcional, la ubicación de muestra (16) está situada en o sobre al menos un material seleccionado de entre:

- un metal;
- un semiconductor;
- un tejido biológico duro dieléctrico;
- un tejido biológico blando;
- un polímero;
- un plástico;
- madera;
- un compuesto.

5.Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 4, en donde la producción de una salida de interferometría (24) comprende:

aplicar un primer componente de la luz de formación de imágenes (20) a una entrada de un brazo de referencia dando lugar a una señal de salida del brazo de referencia, teniendo el brazo de referencia dicha otra longitud de trayectoria óptica; aplicar un segundo componente de la luz de formación de imágenes (20) a un brazo de muestra dando lugar a una señal de salida del brazo de muestra, comprendiendo al menos un componente de la señal de salida del brazo de muestra reflexiones del componente de la luz de formación de imágenes (20) procedentes de la ubicación de muestra (16), teniendo el brazo de muestra dicha al menos una longitud de trayectoria óptica; y

combinar la señal de salida del brazo de referencia y la señal de salida del brazo de muestra para producir una señal combinada como dicha salida de interferometría (24);

comprendiendo el procedimiento, además, realizar una detección de señales para producir un interferograma medido a partir de la salida de interferometría (24); y comprendiendo, además, de manera opcional, al menos una de las etapas siguientes:

generar un interferograma respectivo para cada una de una pluralidad de combinaciones de brazos de muestra y brazos de referencia, en donde se dispone de múltiples brazos de muestra;

generar un interferograma respectivo para cada una de una pluralidad de combinaciones de brazos de muestra y brazos de referencia, en donde se dispone de múltiples brazos de referencia; y

generar un interferograma respectivo para cada una de una pluralidad de combinaciones de brazos de muestra y brazos de referencia, en donde se dispone de múltiples brazos de referencia y múltiples brazos de muestra;

o

que comprende realizar un análisis basándose en la salida de interferometría (24) y generar al menos uno de los siguientes:

un control de retroalimentación que controla la profundidad de procesamiento con respecto a la interfaz que está más cerca del haz de procesamiento de material (14); y

un control de retroalimentación que controla la profundidad de procesamiento con respecto a la interfaz que está más allá de la profundidad de procesamiento actual.

6.Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde el al menos un parámetro de procesamiento del proceso de soldadura que se controla comprende al menos uno de los siguientes:

el estado de encendido/apagado del haz de procesamiento de material;

la potencia media del haz de procesamiento de material;

la duración del pulso del haz de procesamiento de material;

la intensidad máxima del haz de procesamiento de material;

la densidad del haz de procesamiento de material;

la energía del haz de procesamiento de material;

las especies de partículas del haz de procesamiento de material;

la longitud de onda del haz de procesamiento de material;

la frecuencia de repetición de pulsos del haz de procesamiento de material;

la energía del pulso del haz de procesamiento de material;

la forma del pulso del haz de procesamiento de material;

la velocidad de escaneado del haz de procesamiento de material;

el diámetro focal del haz de procesamiento de material;

la posición focal del haz de procesamiento de material;

el patrón espacial del haz de procesamiento de material en la muestra;

el caudal de alimentación de material;

el caudal del medio refrigerante;

el caudal del gas de protección/asistencia;

la presión del gas de protección/asistencia;

la mezcla de gas protección/asistencia;

los parámetros del proceso de soldadura por arco tales como la tensión, la corriente y la velocidad de alimentación del hilo, cuando la soldadura es soldadura por arco/láser híbrida; y

el caudal de alimentación del material aditivo.

7.Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que comprende, además, las etapas siguientes:

almacenar en una memoria un interferograma sintetizado precalculado para un resultado objetivo;

producir un interferograma medido a partir de la salida de interferometría (24); y

procesar el interferograma medido junto con el interferograma sintetizado precalculado para producir un resultado de correlación;

en donde el control de al menos un parámetro de procesamiento del proceso de soldadura se basa en el resultado de correlación;

en donde, de manera opcional, el interferograma sintetizado precalculado para un resultado objetivo es una estimación de lo que se espera cuando las reflexiones regresan desde una profundidad especificada; y

la producción del resultado de correlación comprende multiplicar el interferograma medido por el interferograma precalculado sobre la base de cada elemento detectado y luego sumar;

comprendiendo el procedimiento, además, de manera opcional, conformar al menos uno del interferograma sintetizado precalculado y el interferograma medido para compensar al menos uno de:

la desalineación del espectrómetro;

la no linealidad del ángulo de rejilla del espectrómetro;

la distorsión de la formación de imágenes debido a la óptica de formación de imágenes del espectrómetro;

el remuestreo de la longitud de onda en términos de número de onda/frecuencia;

el tamaño finito del área activa del detector;

la forma de la envolvente espectral;
el desajuste de la dispersión; y
una otra no idealidad contenida en el interferograma que degrada la calidad de la imagen;

5 comprendiendo el procedimiento, además, de manera opcional, procesar el resultado de la correlación para
identificar aproximadamente el momento en que el volumen modificado por el haz de procesamiento de material
(14) ha alcanzado la profundidad especificada;
comprendiendo el procedimiento, además, de manera opcional, identificar aproximadamente el momento en que
10 se ha alcanzado la profundidad especificada cuando el resultado de correlación alcanza un umbral.

8.Procedimiento según la reivindicación 7, que comprende, además:
sintetizar el interferograma sintetizado precalculado.

9.Procedimiento para generar un registro de un proceso de modificación de material, estando el procedimiento
15 **caracterizado por que:**

comprende el procedimiento definido en la reivindicación 3, en donde el haz de procesamiento de material (14) y
la luz de formación de imágenes (20) son sustancialmente coaxiales cuando se suministran a la muestra;
20 en donde el registro comprende una o más indicaciones de la calidad de una soldadura por láser;
un elemento del baño de fusión en el proceso de soldadura por láser;
una indicación de una inminente rotura del material;
la estabilidad del ojo de cerradura;
y la profundidad de penetración.

25 10.Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, que comprende, además:

seleccionar una ubicación de un punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero (D) por debajo de un
área de interés de la muestra;
30 en donde, de manera opcional, el punto de diferencia de longitud de trayectoria óptica cero (D) se selecciona para
que esté en la muestra que está siendo medida o se selecciona para que esté por debajo de la muestra que está
siendo medida;

comprendiendo, además, de manera opcional, realizar al menos una de las acciones siguientes:

35 a) controlar la soldadura a una profundidad determinada; y
b) controlar la soldadura a una profundidad seleccionada con respecto a una interfaz de material seleccionada;

40 en donde, de manera opcional, la fuente óptica de formación de imágenes (18) ilumina un área o volumen de la
muestra que abarca múltiples características reflectivas de la muestra que tienen diferentes alturas axiales, o
diferentes desplazamientos transversales con respecto al eje central del haz de formación de imágenes, o cualquier
combinación de los mismos.

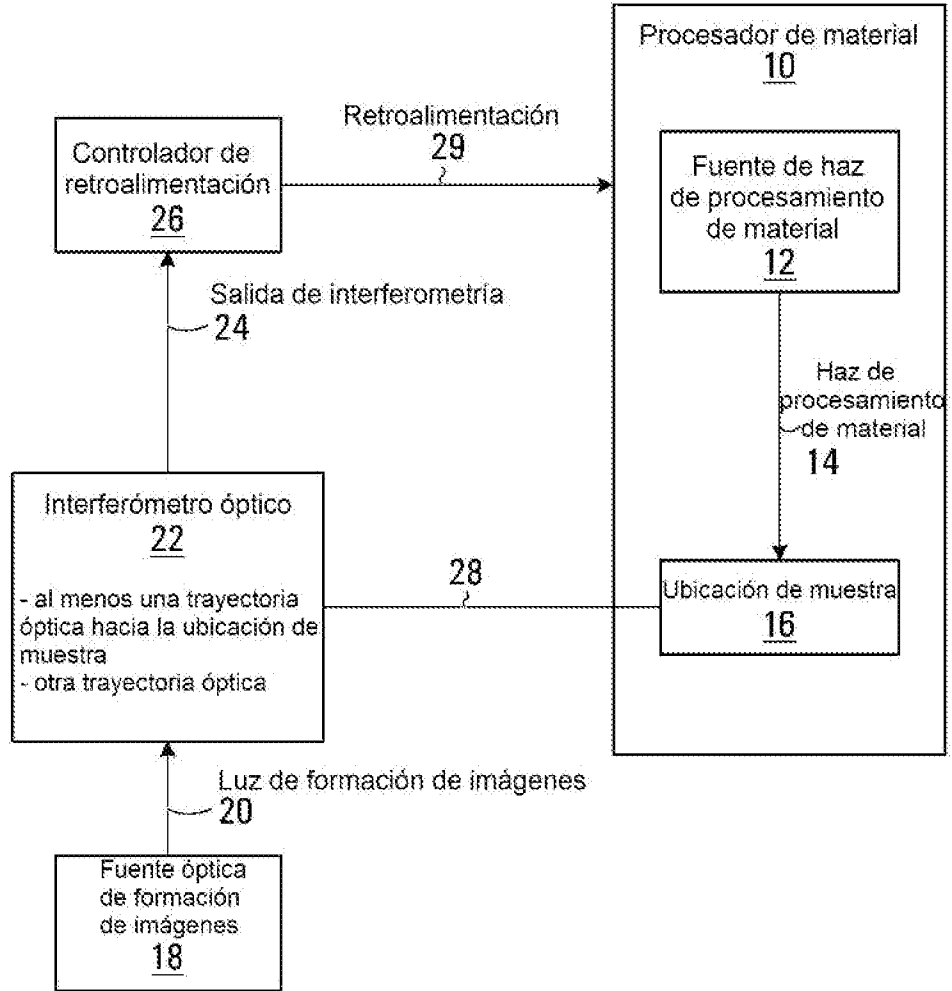


FIG. 1

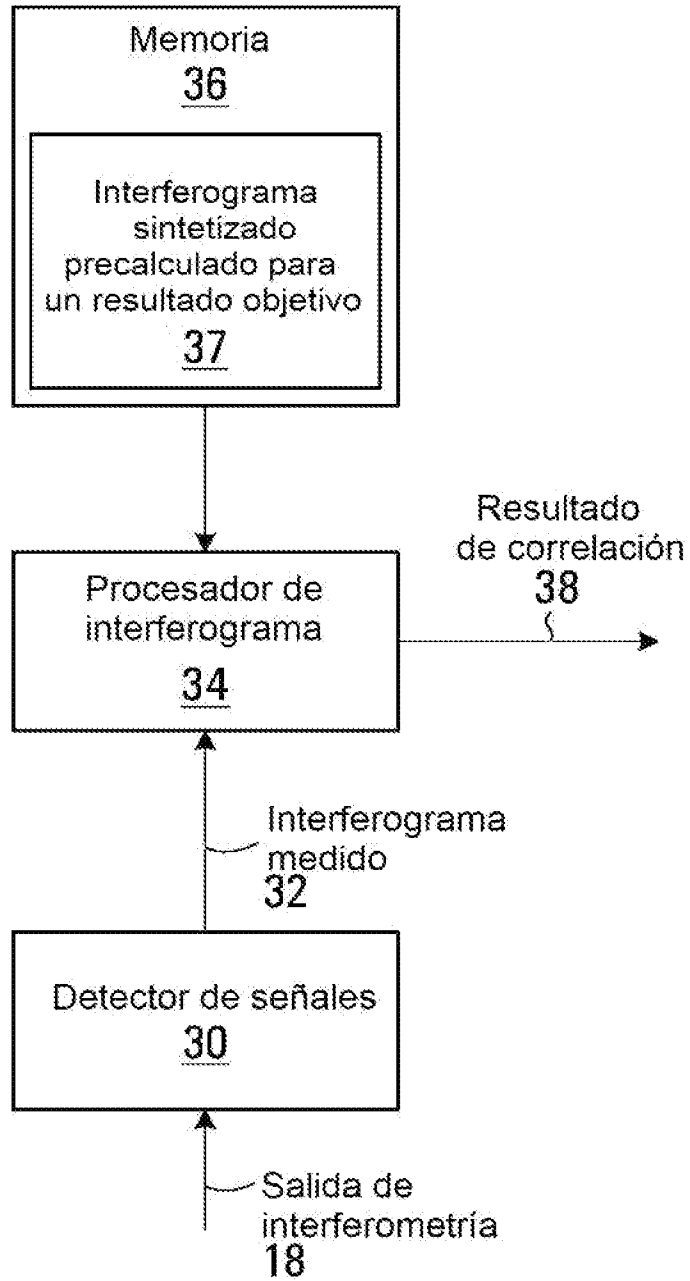


FIG. 2

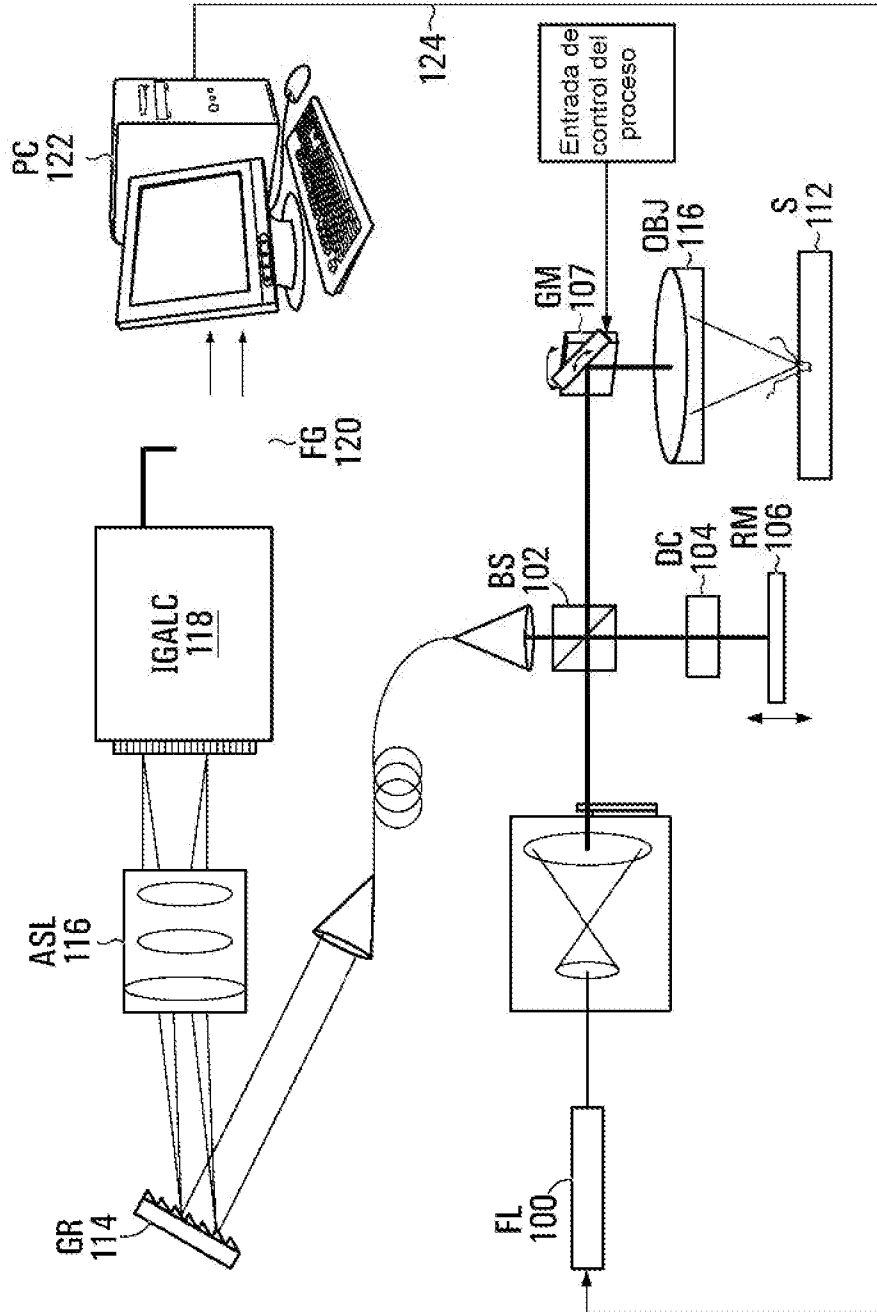


FIG. 3

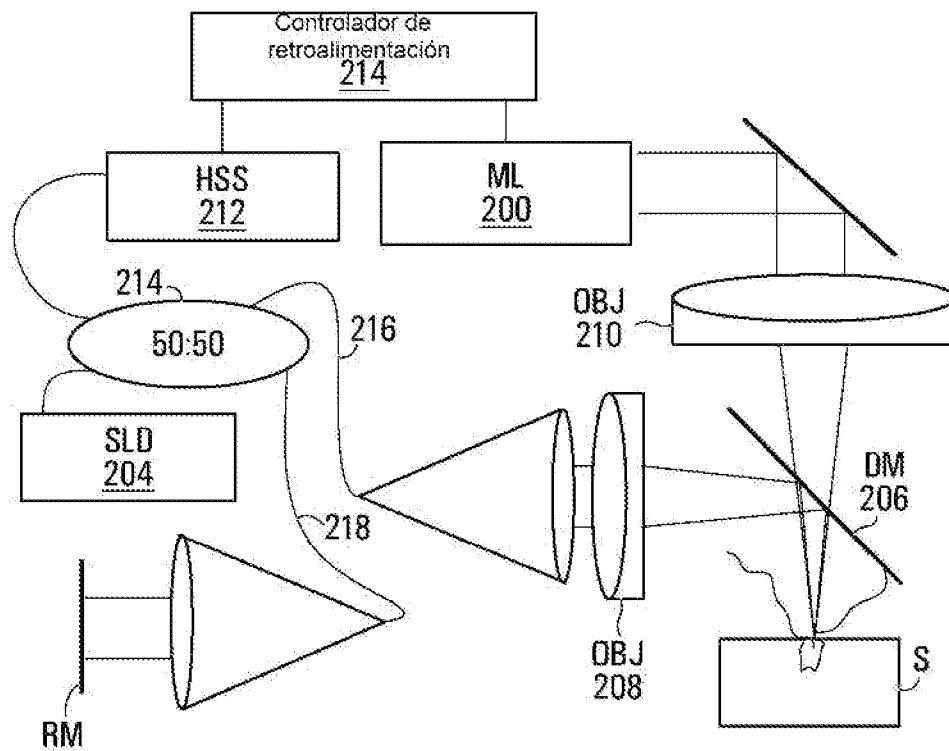


FIG. 4

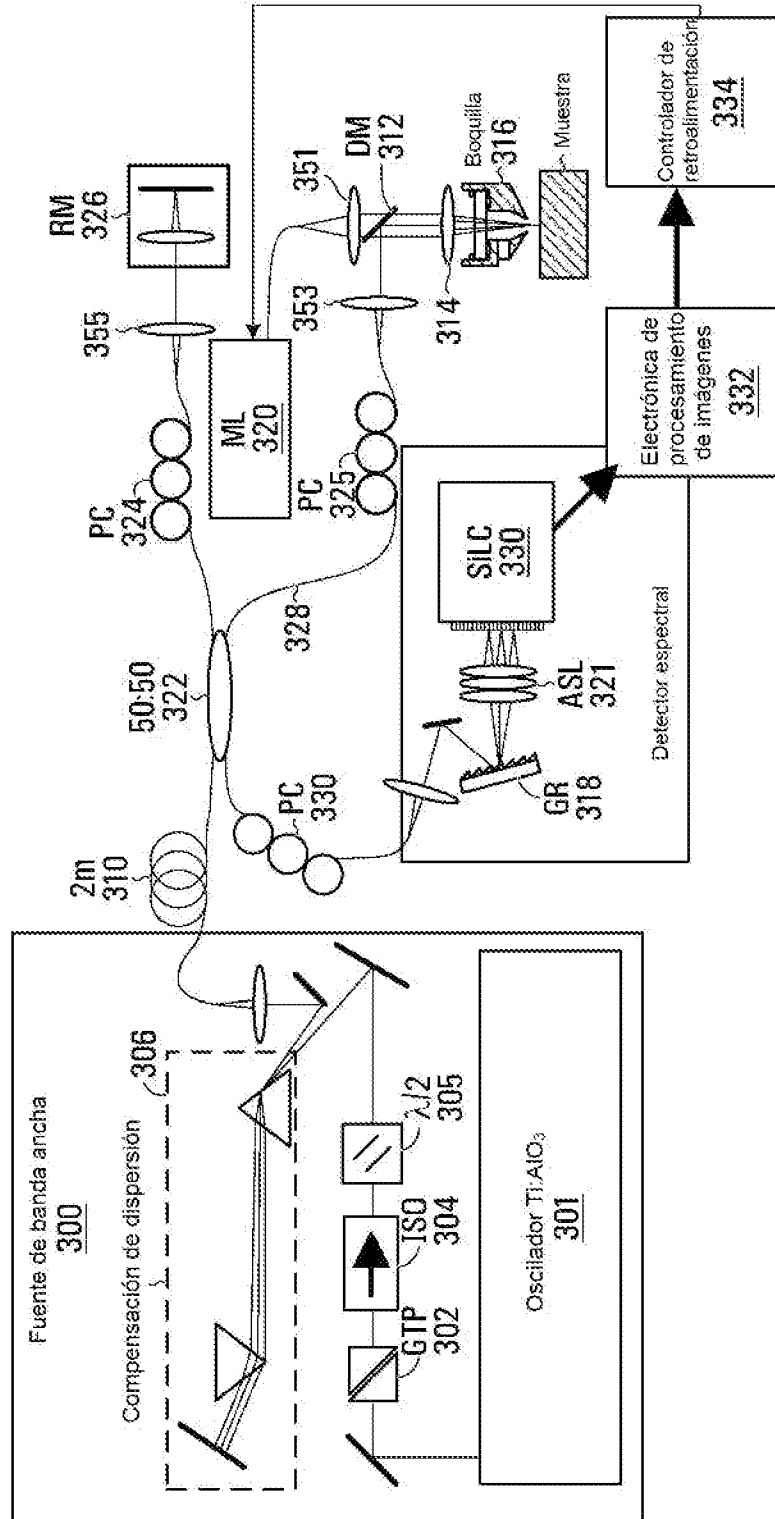


FIG. 5

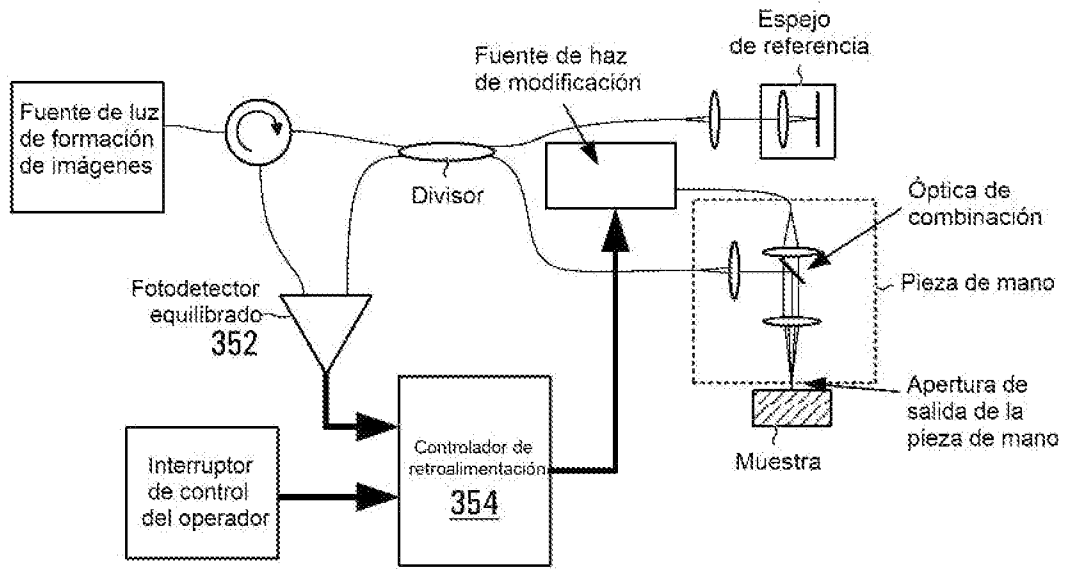


FIG. 6

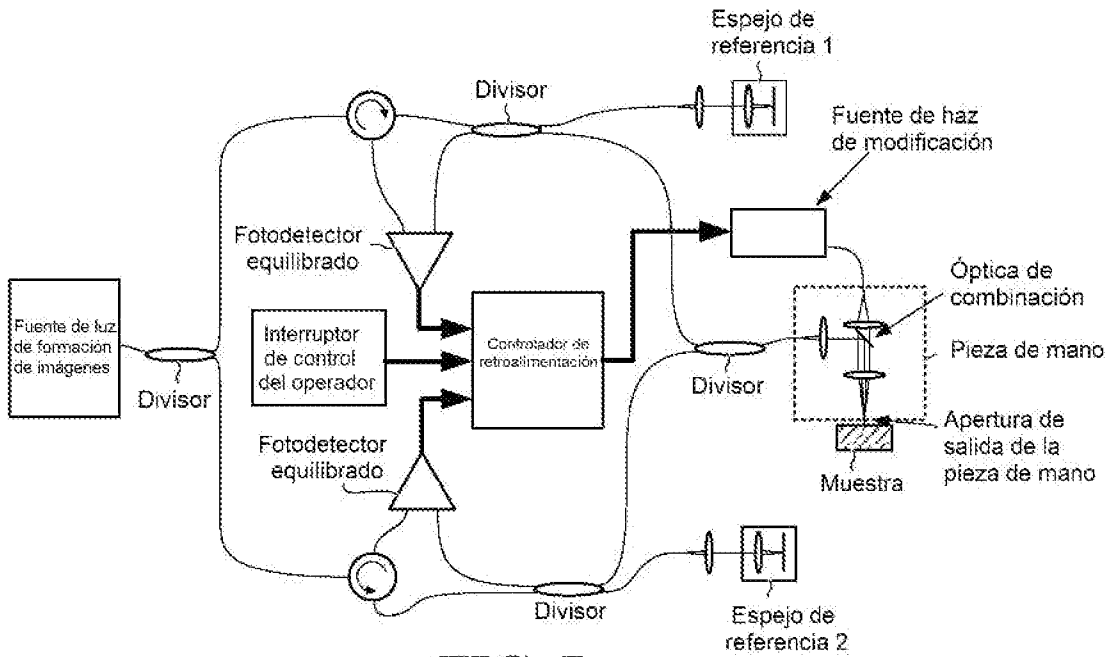


FIG. 7

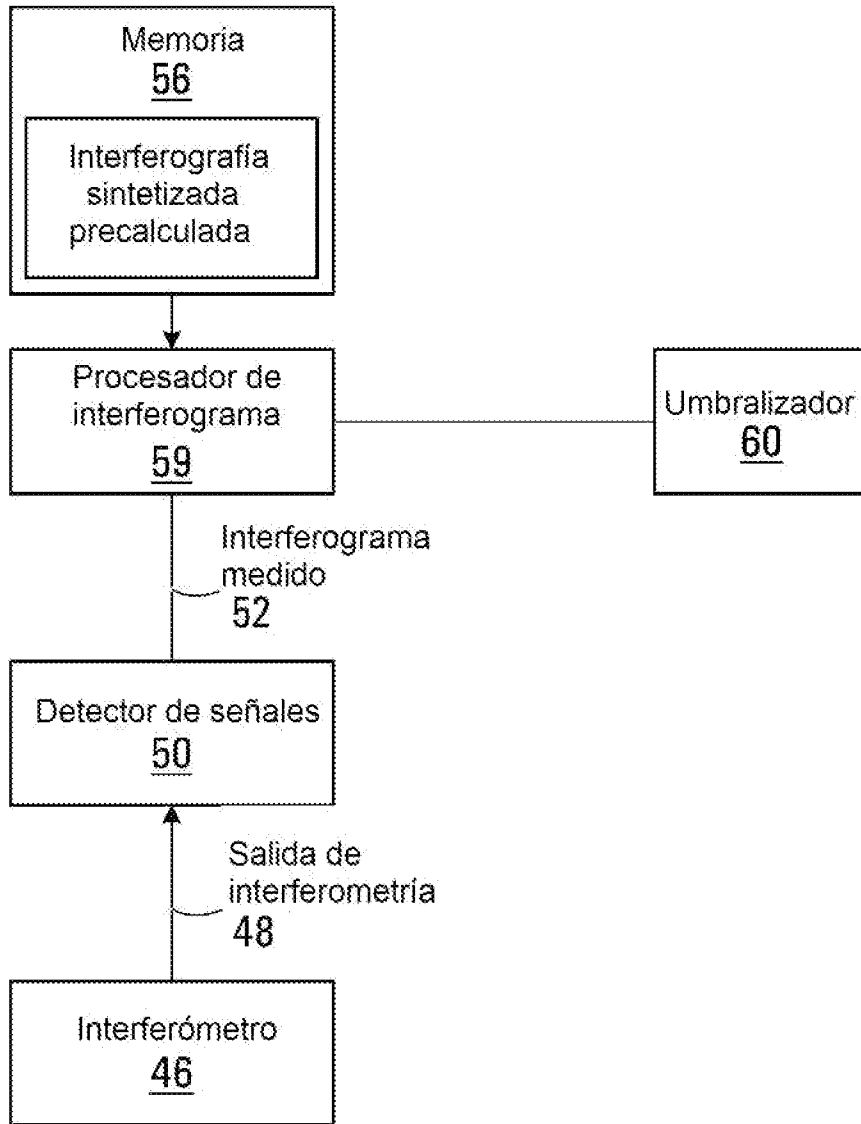


FIG. 8

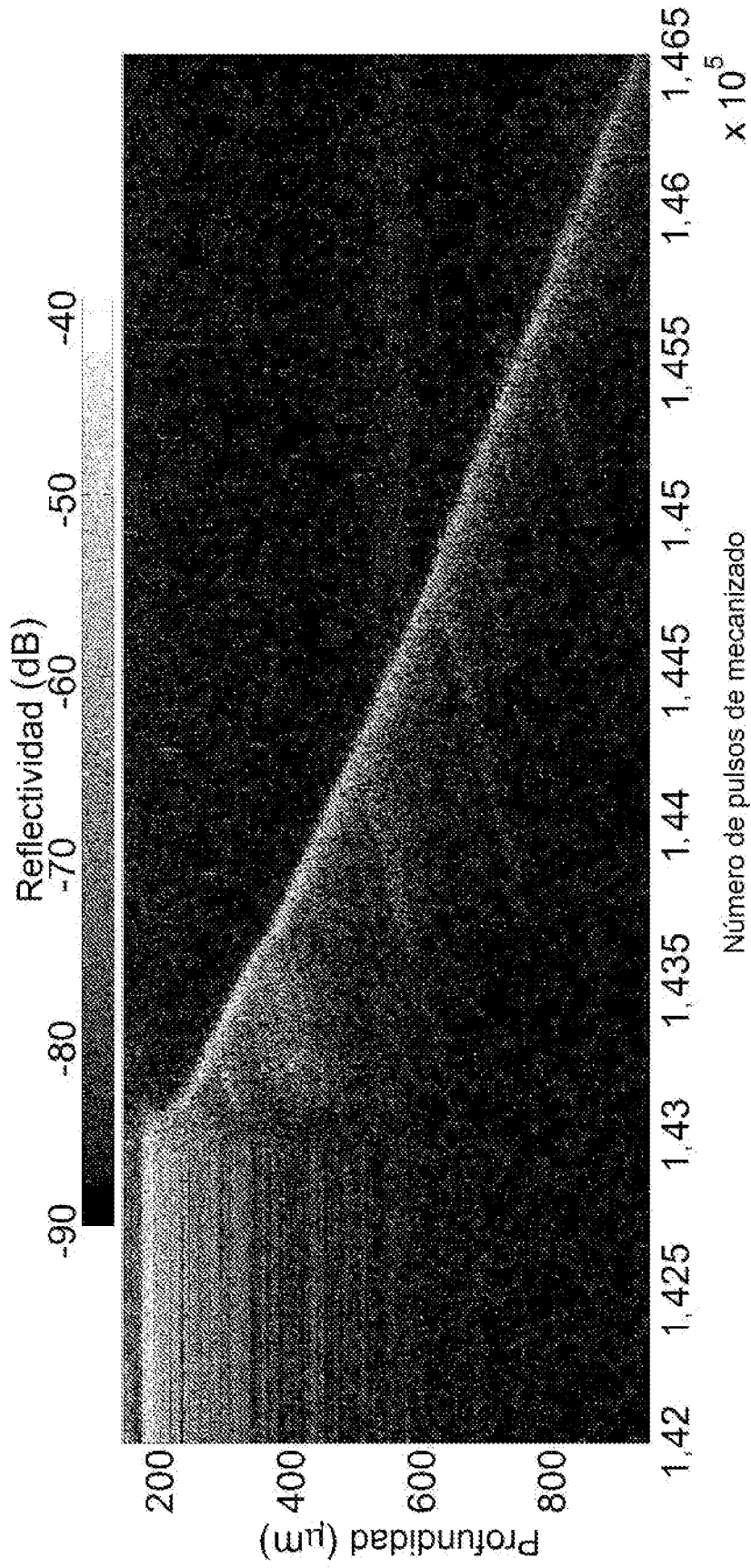


FIG. 9

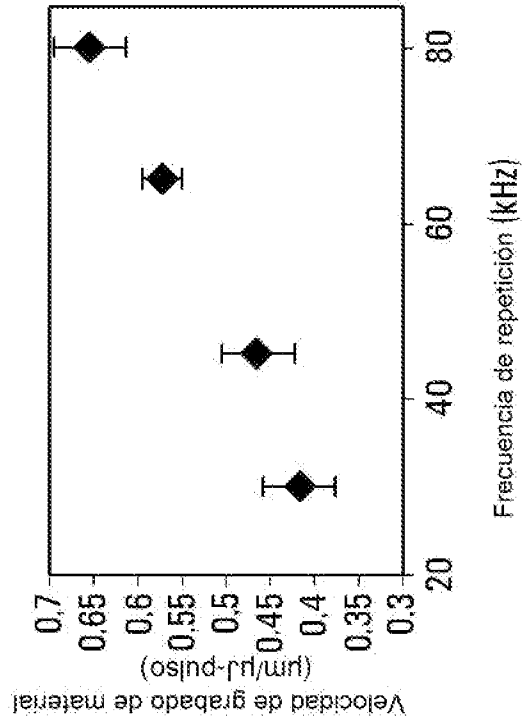


FIG. 10A

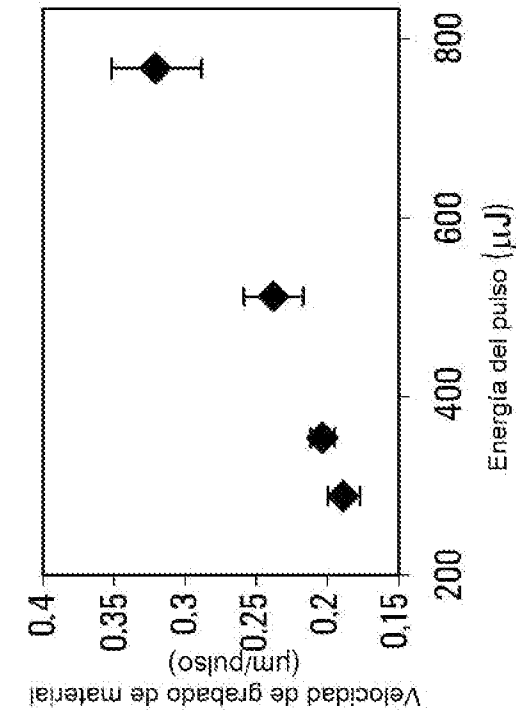


FIG. 10B

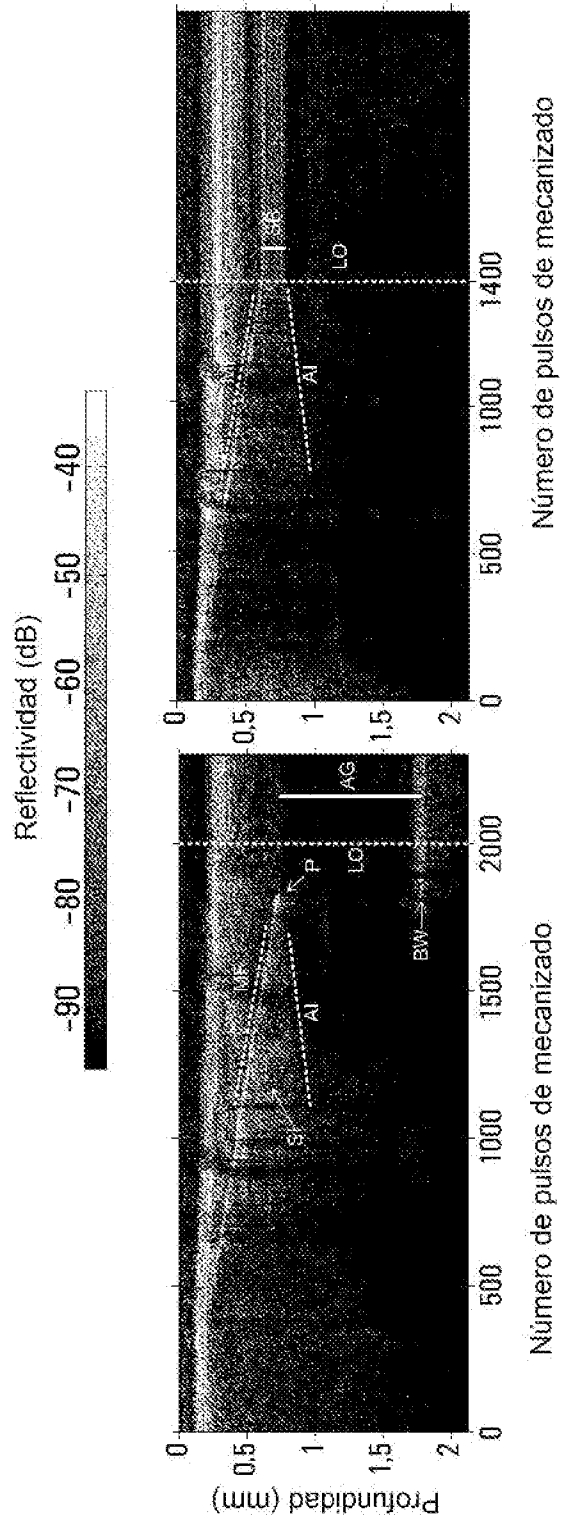


FIG. 11B

FIG. 11A

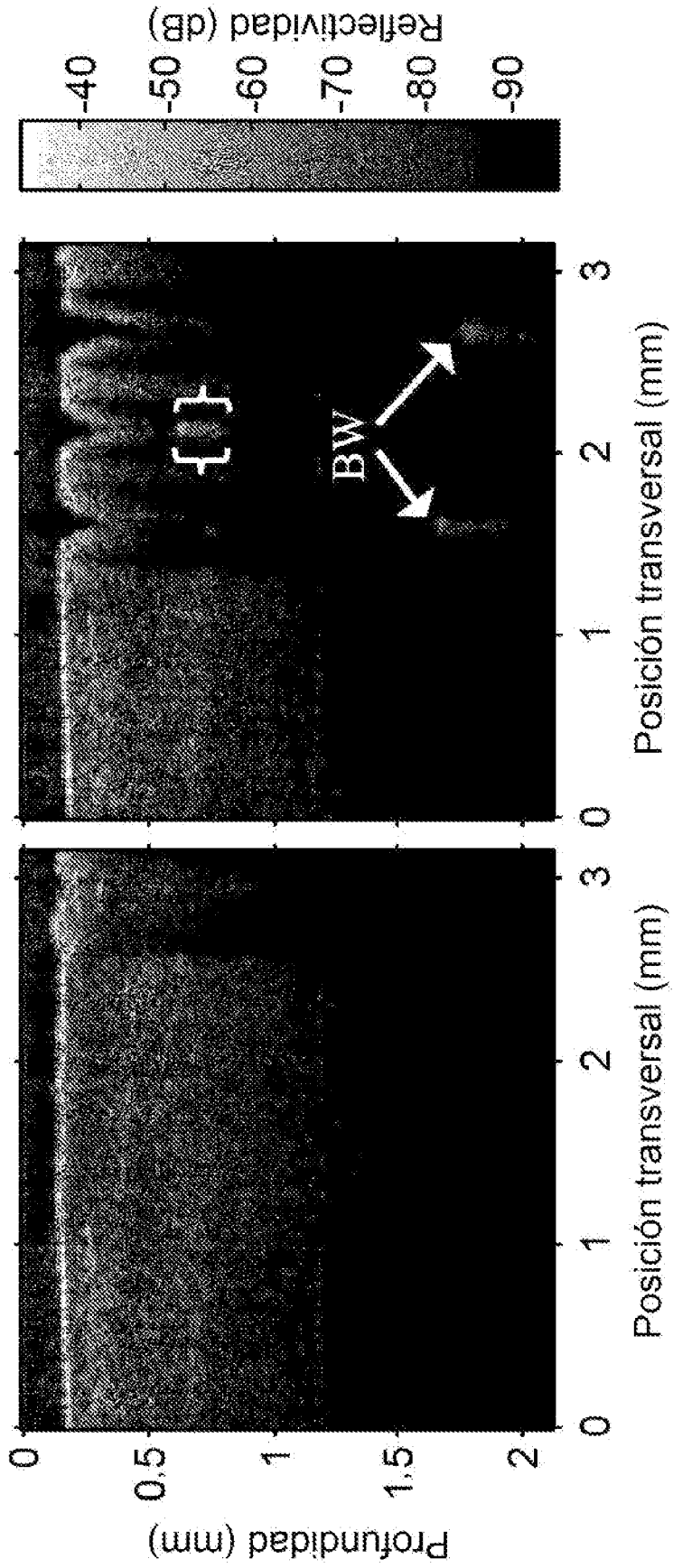


FIG. 12

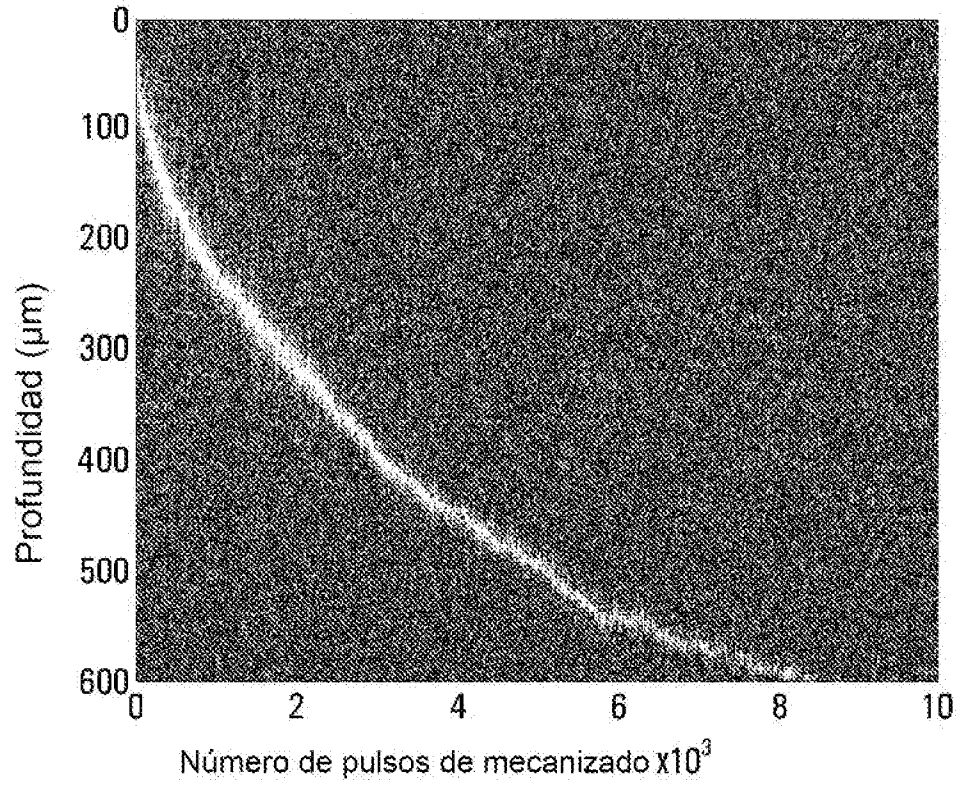


FIG. 13

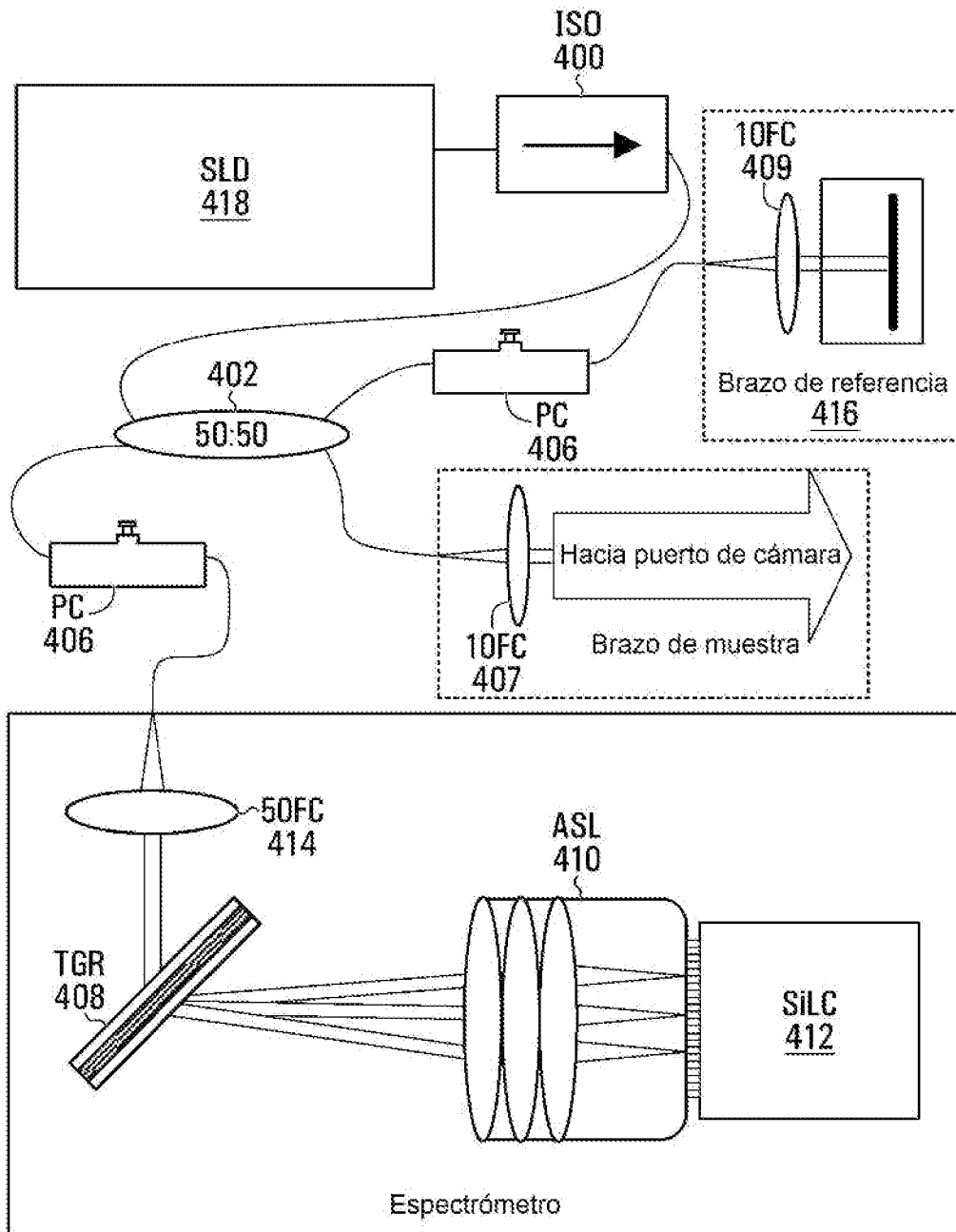


FIG. 14

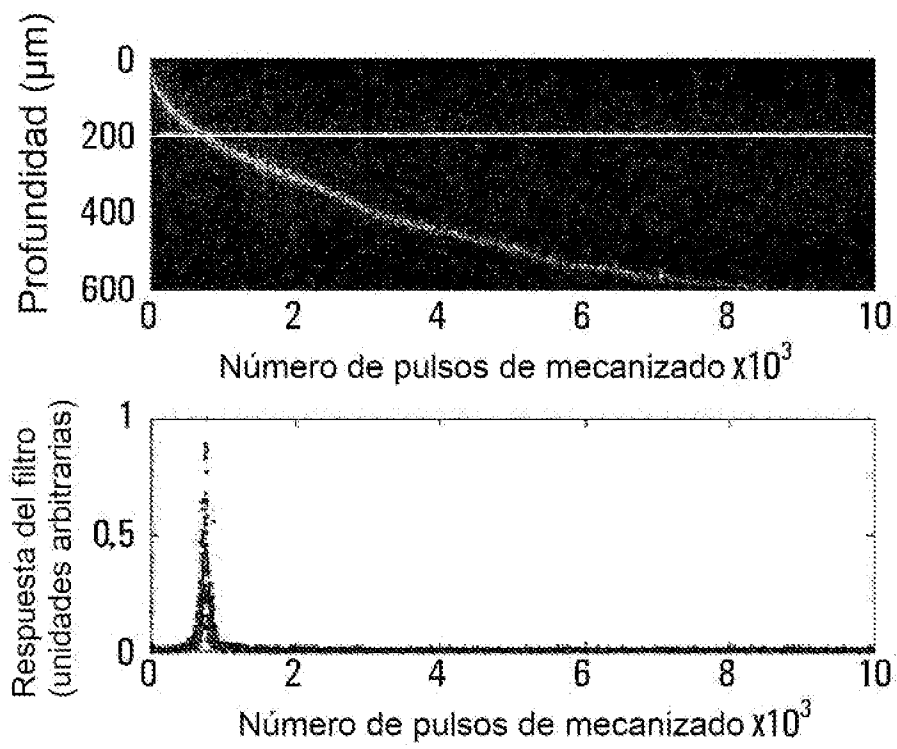


FIG. 15

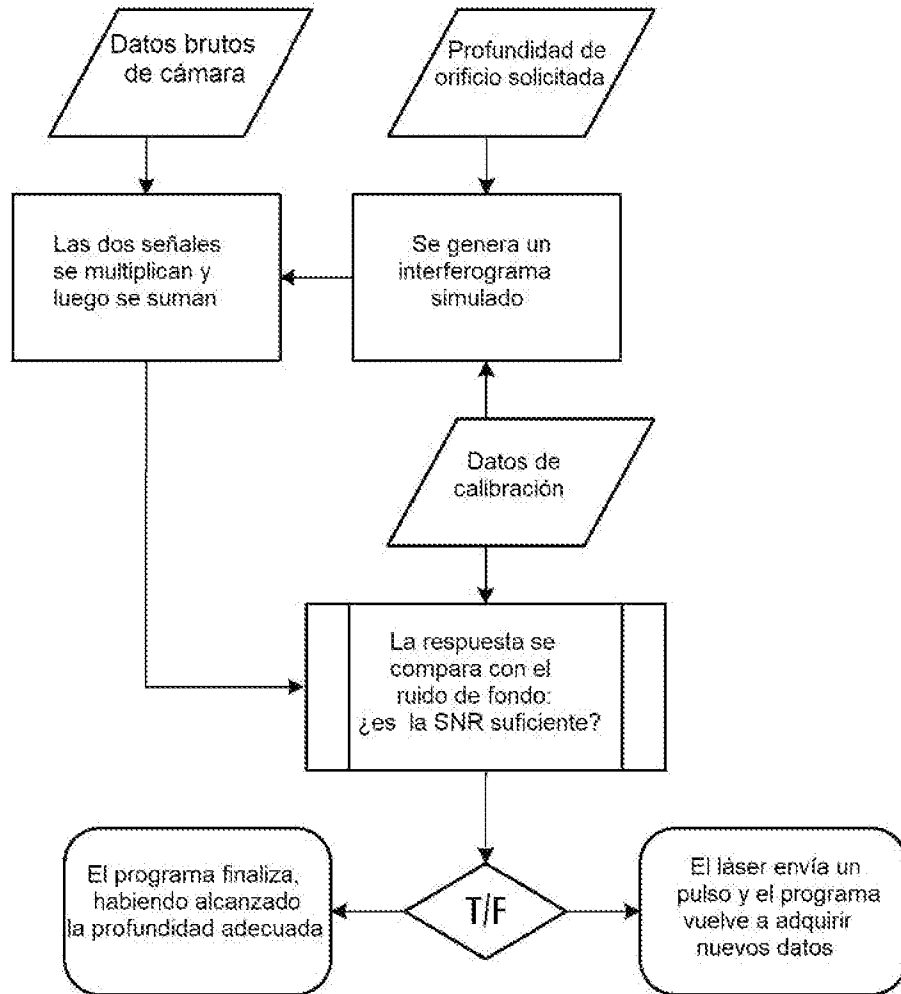


FIG. 16

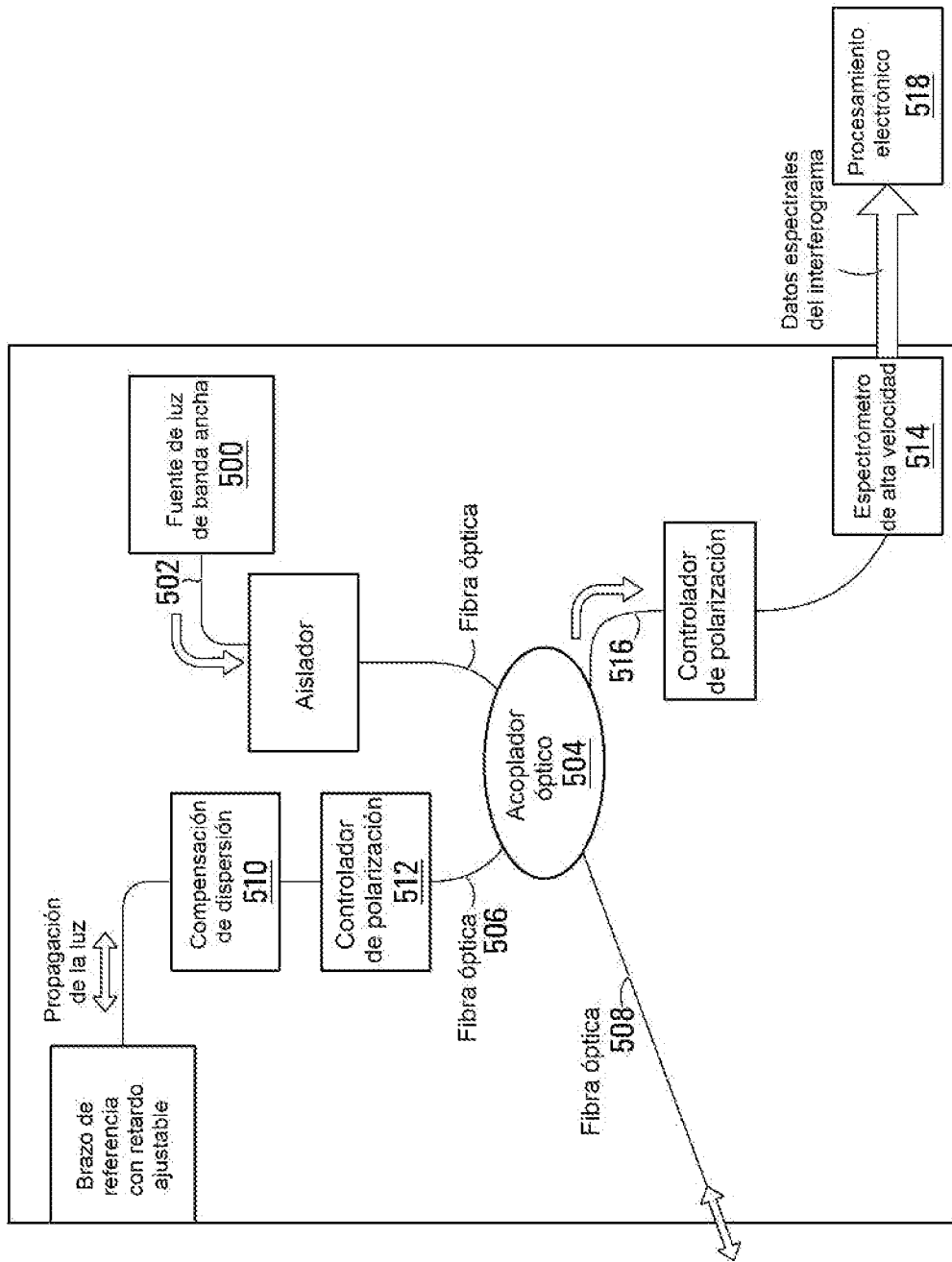


FIG. 17

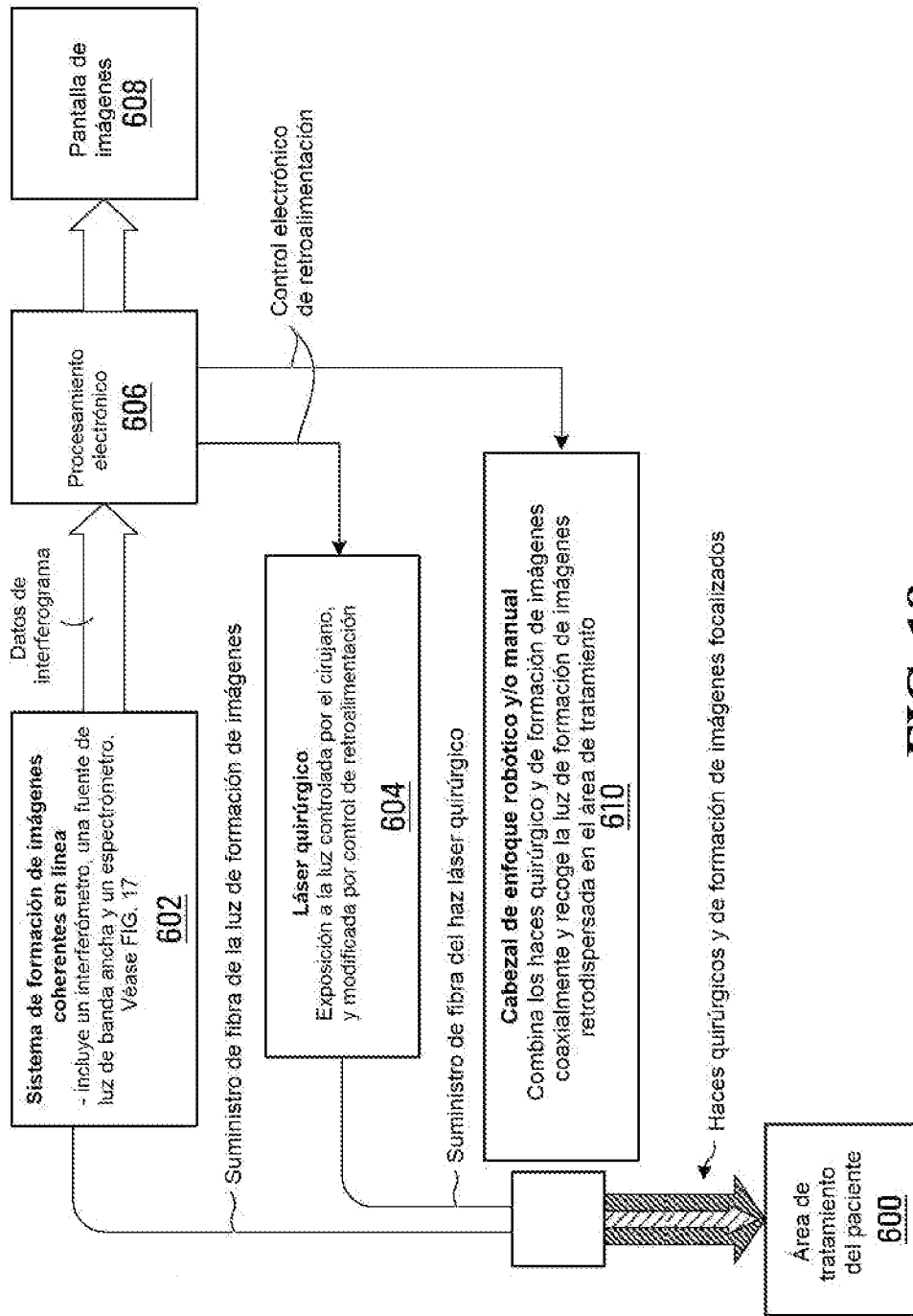


FIG. 18

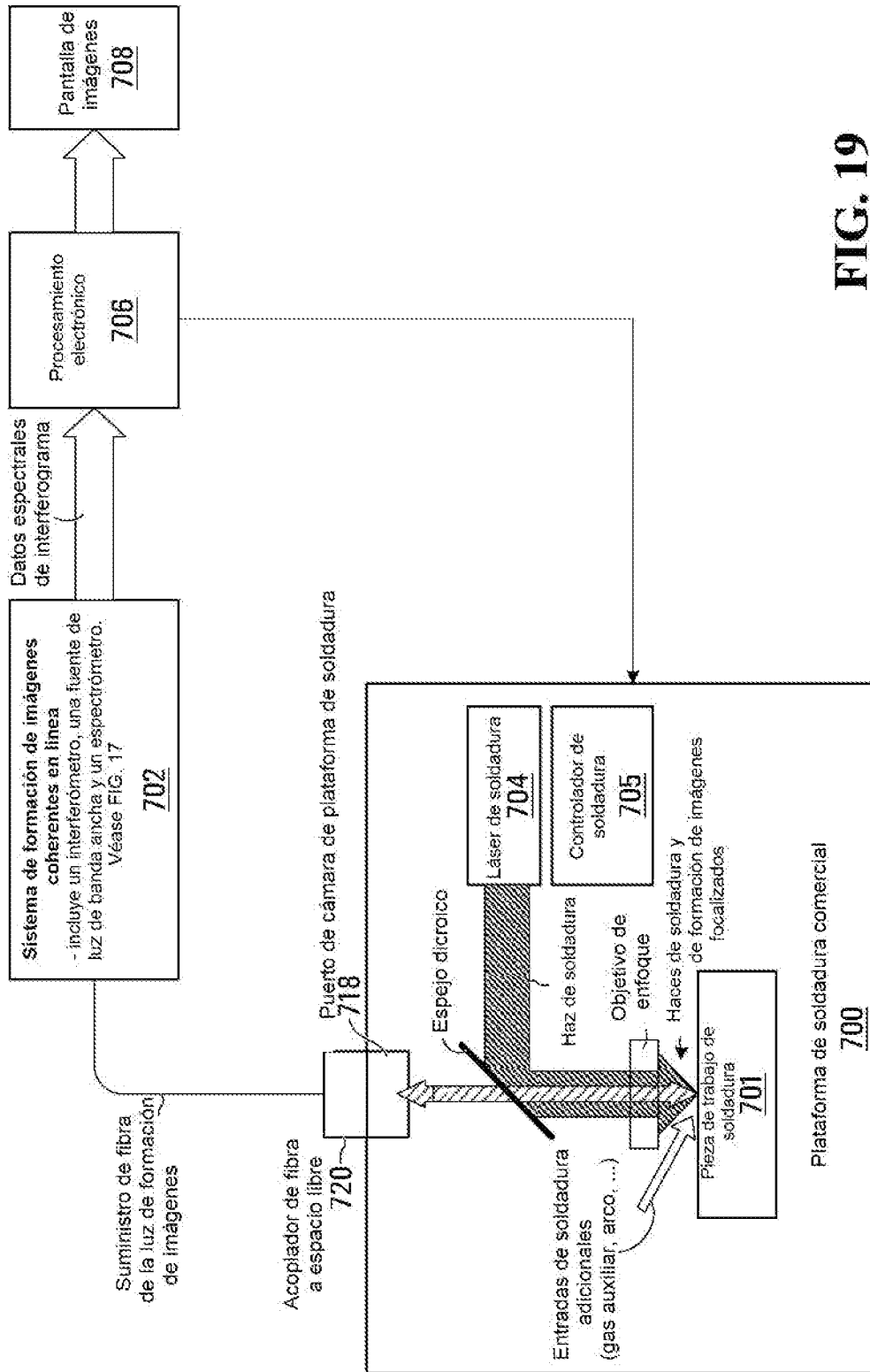


FIG. 19

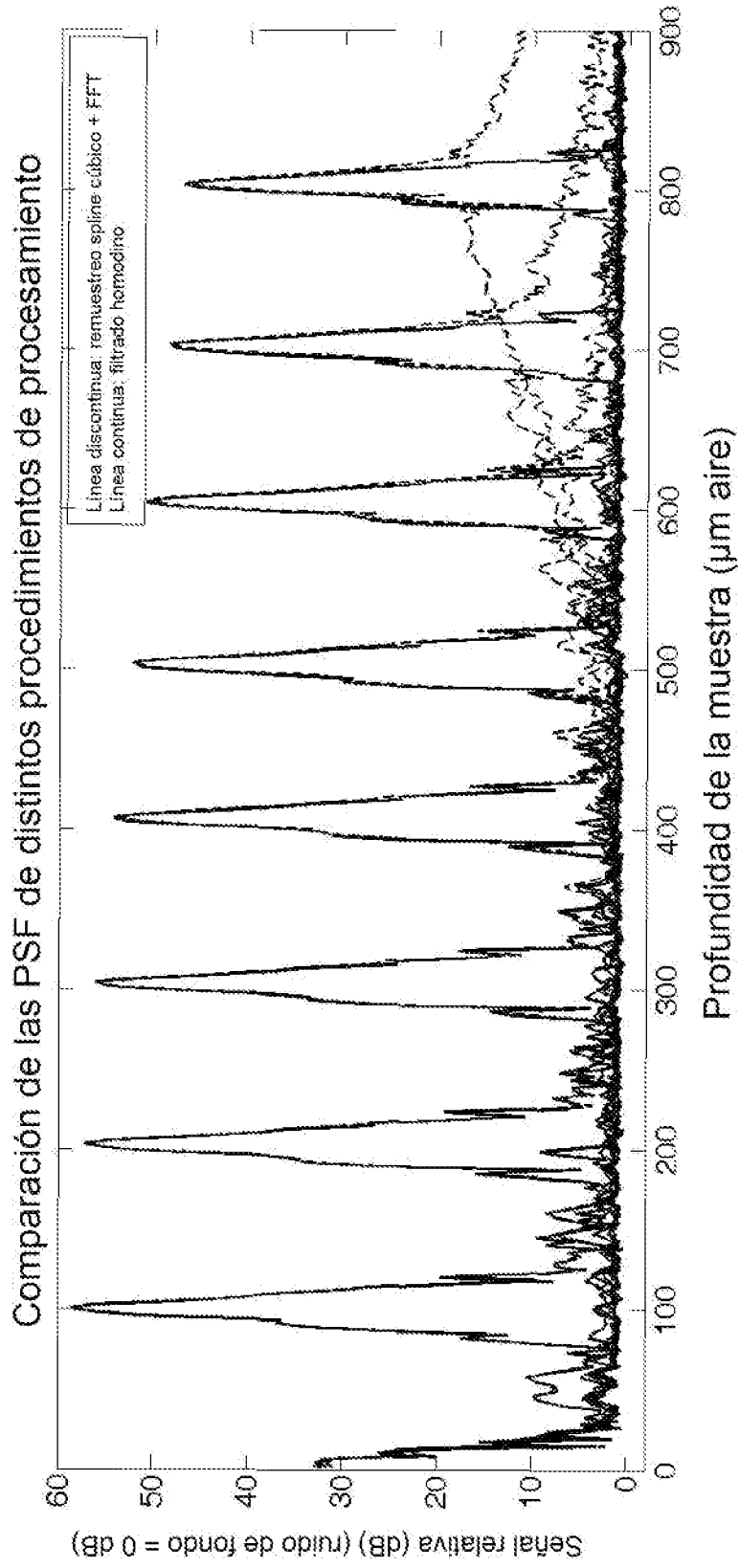


FIG. 20

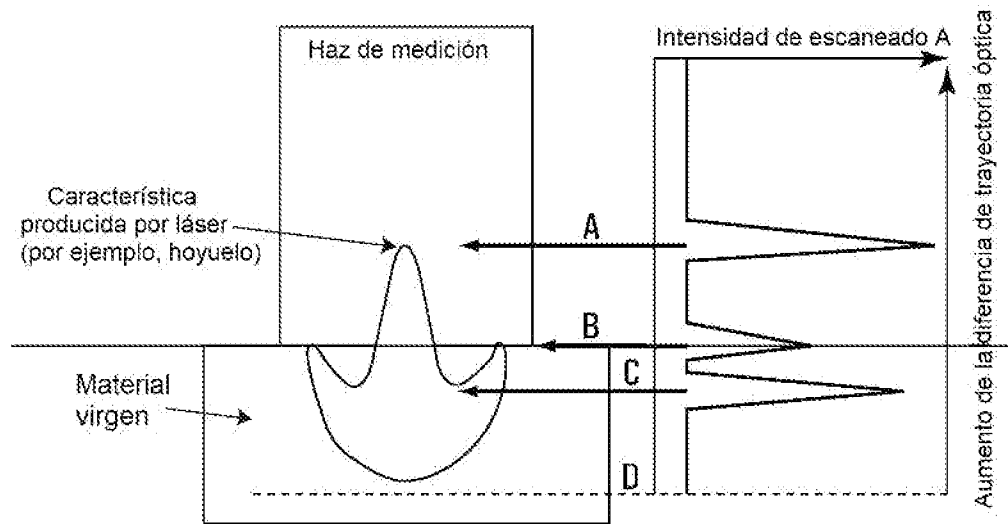


FIG. 21

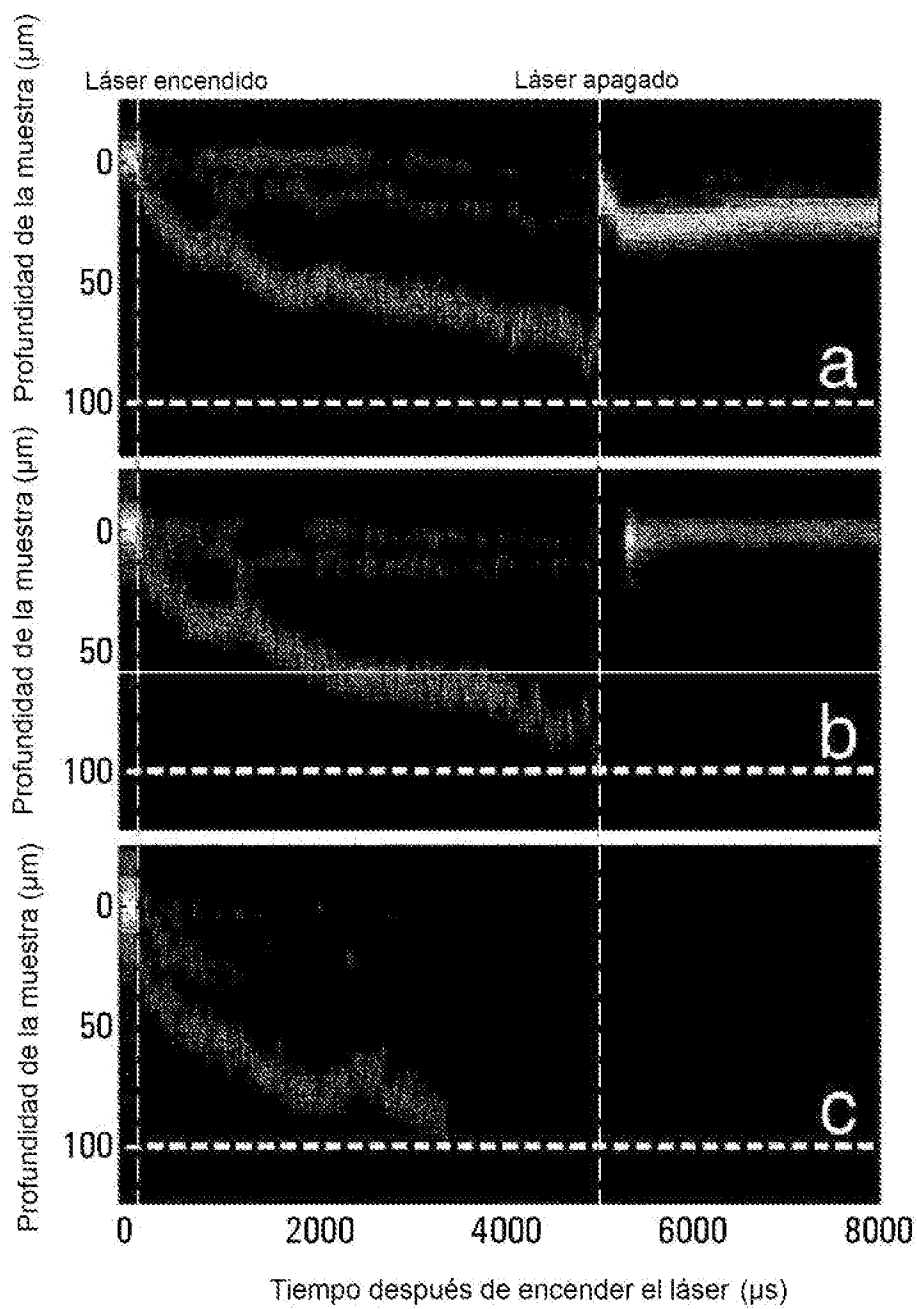


FIG. 22

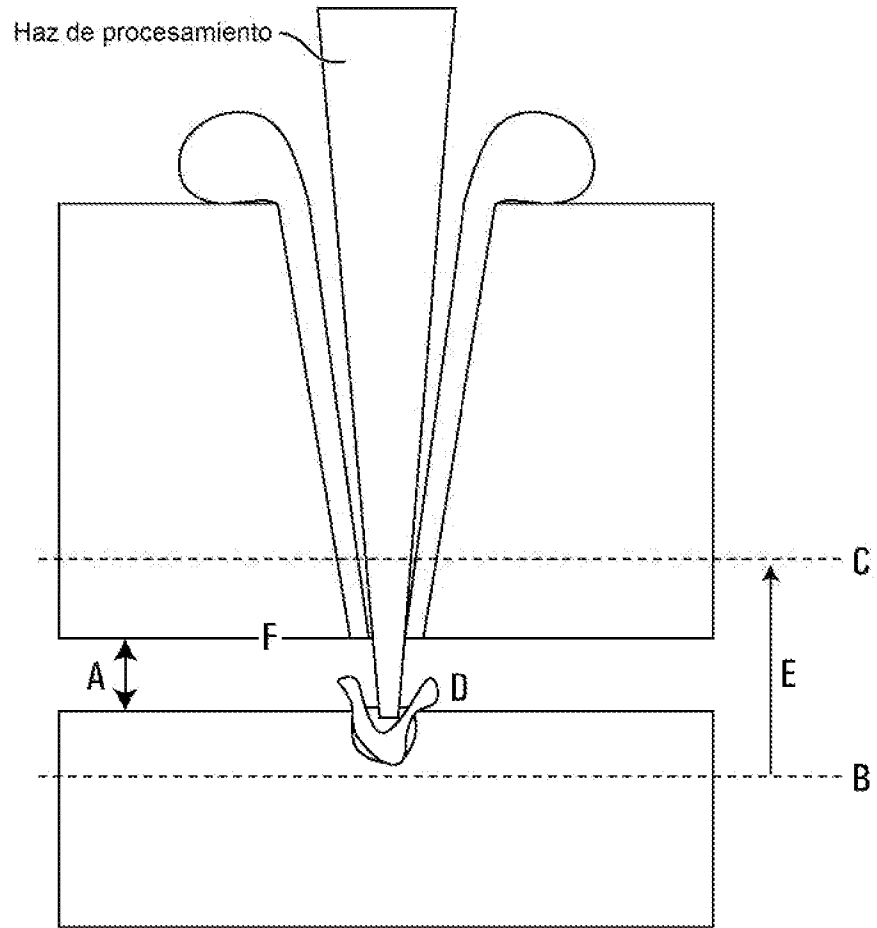


FIG. 23

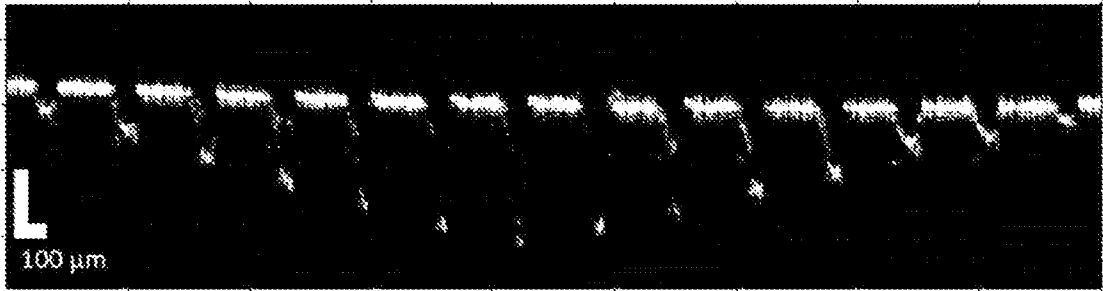


FIG. 24

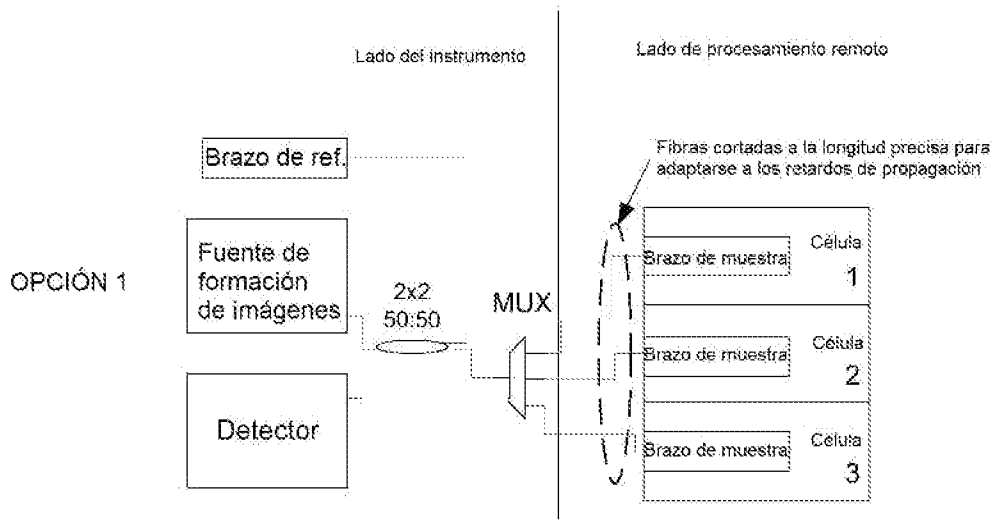


FIG. 25A

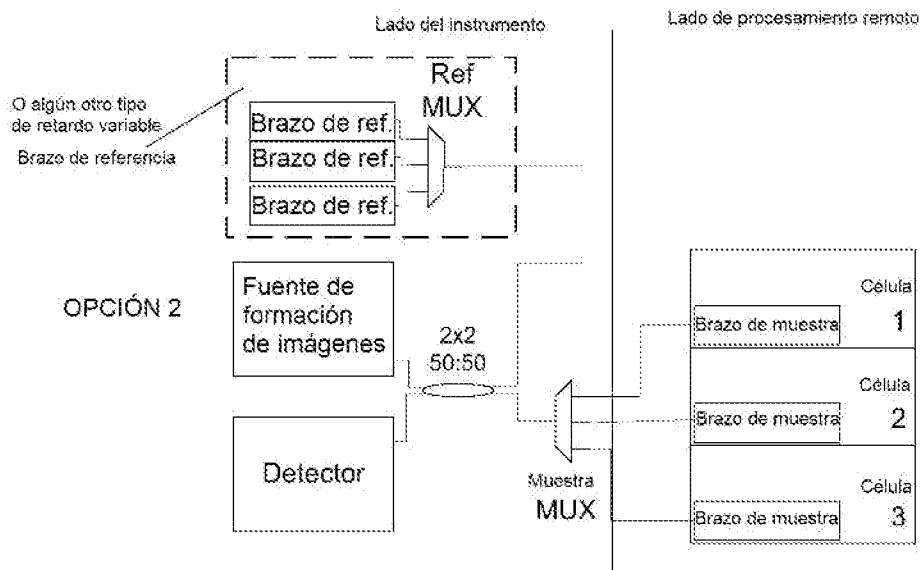


FIG. 25B

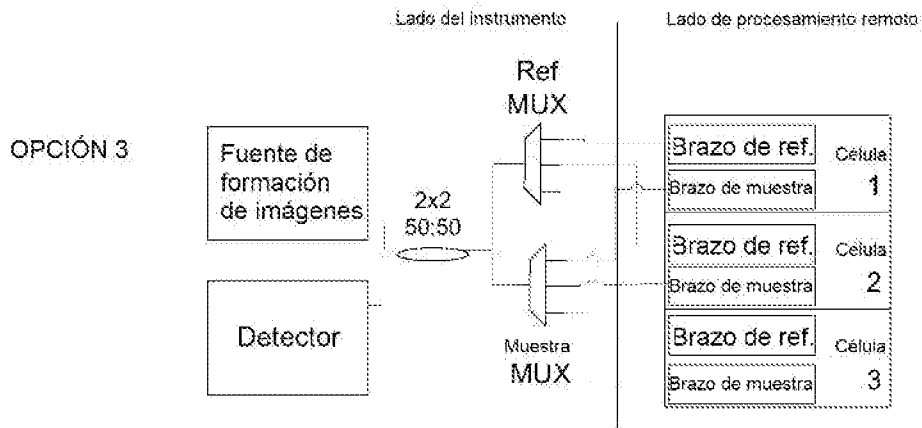


FIG. 25C

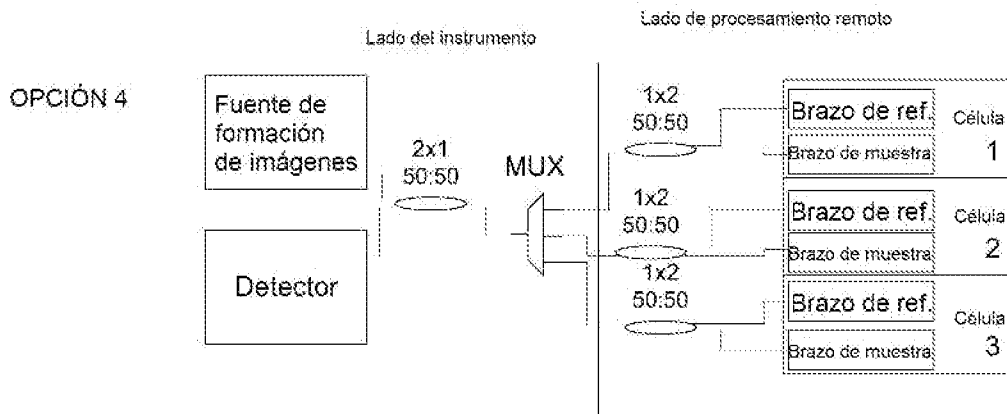
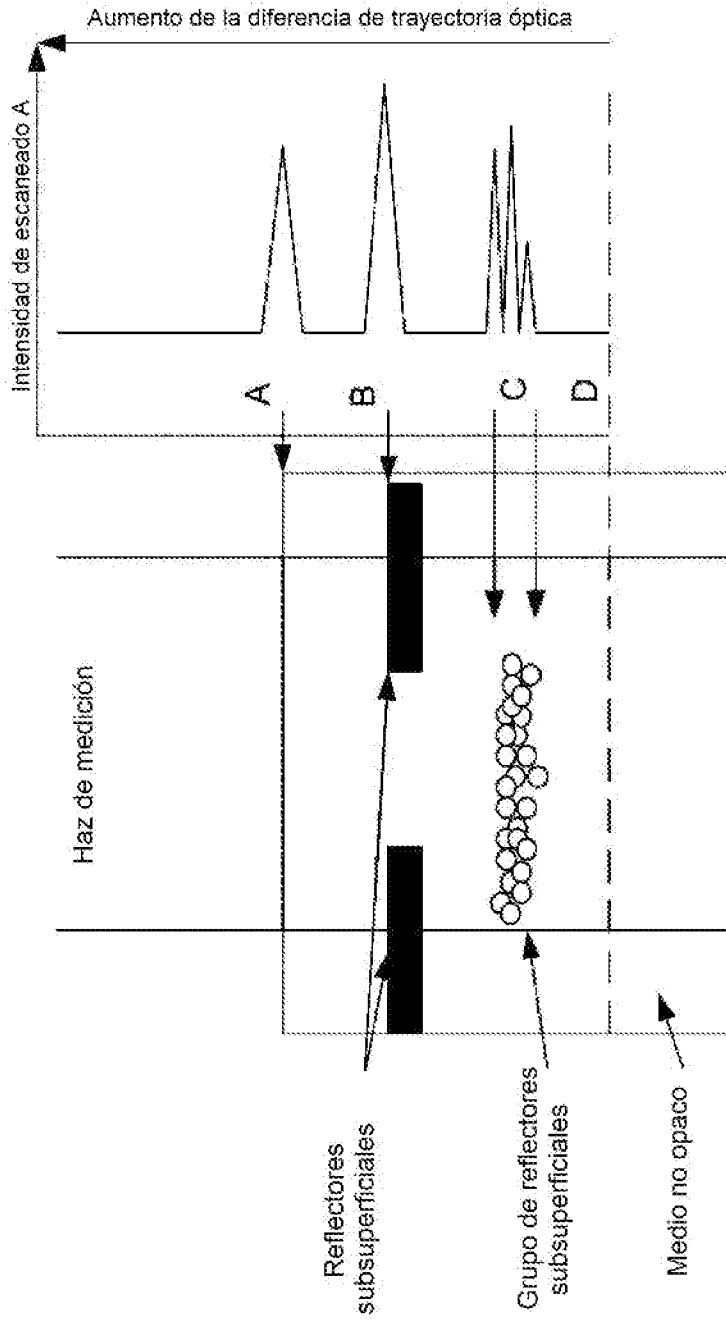


FIG. 25D



- A: altura de la superficie del medio
- B: altura de los reflectores de subsuperficie
- C: alturaS de los reflectores de subsuperficie
- D: trayectorias de diferencia de trayectoria óptica cero

FIG. 26

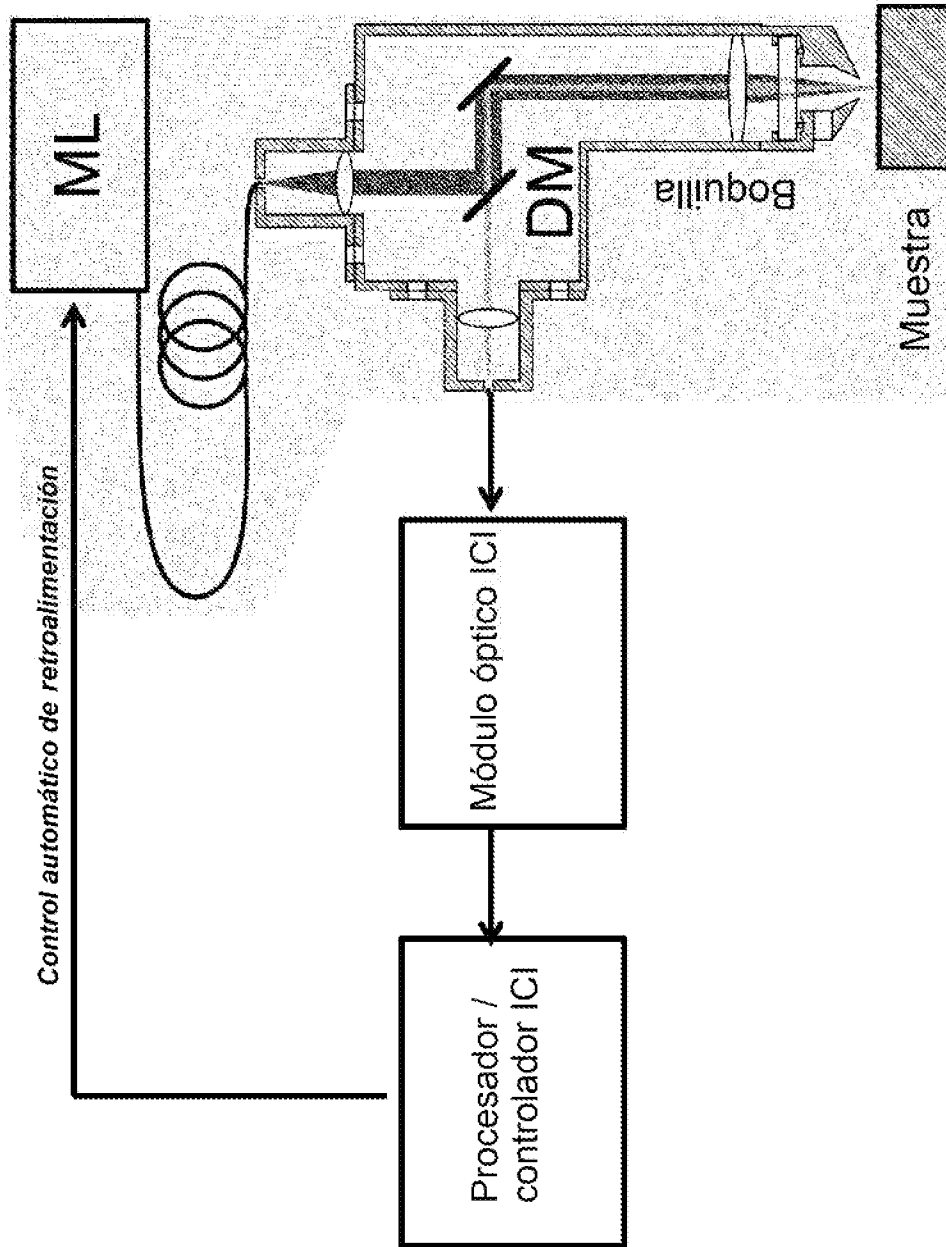


FIG. 27

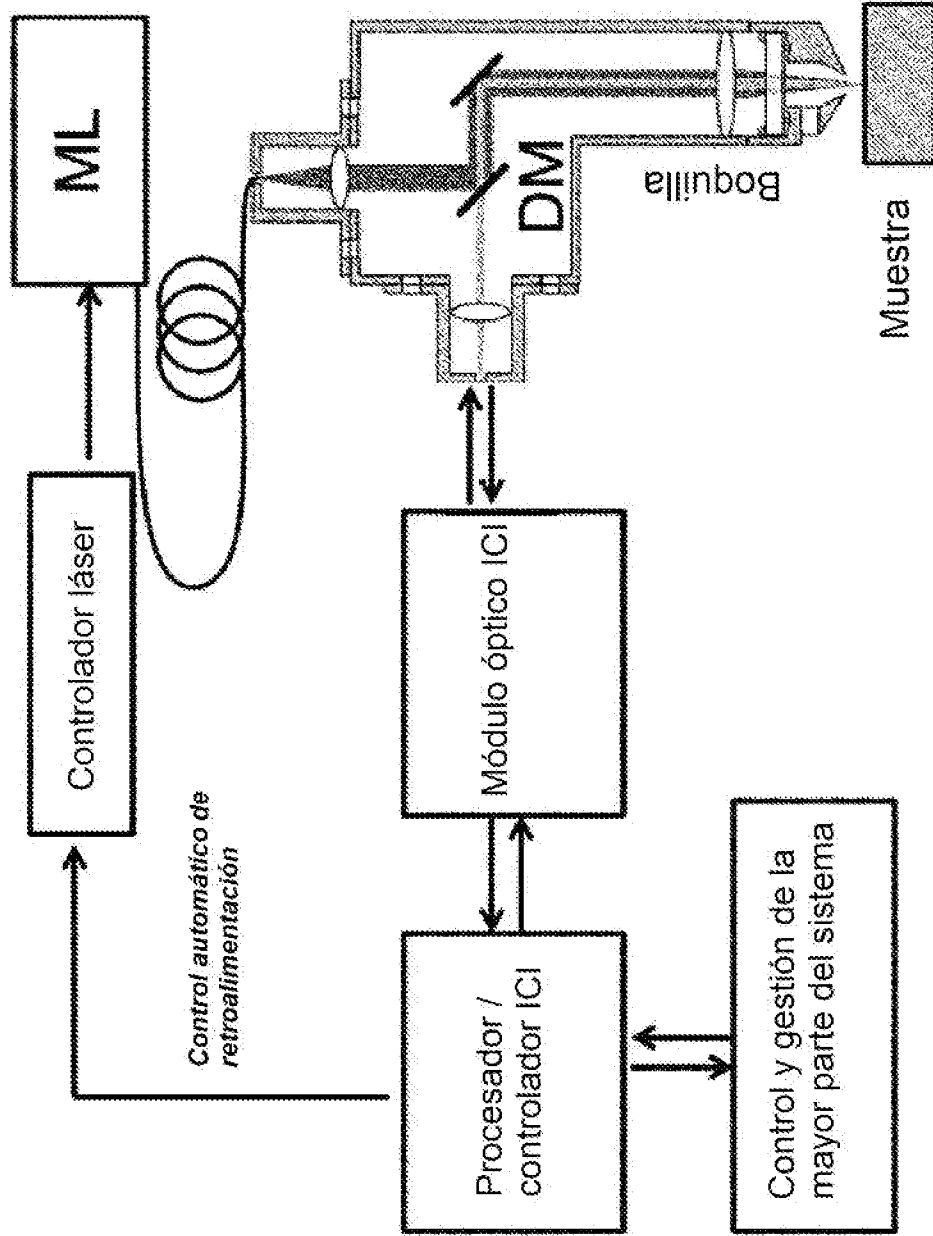


FIG. 28