

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 912 116**

51 Int. Cl.:

G01J 9/02 (2006.01)

G01J 4/00 (2006.01)

G01J 3/02 (2006.01)

H01S 5/0687 (2006.01)

G01J 1/42 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.10.2014** **E 17167609 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.02.2022** **EP 3225962**

54 Título: **Sistema de estabilización para una fuente de luz**

30 Prioridad:

29.10.2013 GB 201319079

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

24.05.2022

73 Titular/es:

**UNIVERSITY COURT OF THE UNIVERSITY OF ST ANDREWS (100.0%)
College Gate, North Street, St Andrews
Fife KY16 9AJ, GB**

72 Inventor/es:

**DHOLAKIA, KISHAN;
MAZILU, MICHAEL y
METZGER, KLAUS**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 912 116 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistema de estabilización para una fuente de luz

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un sistema de estabilización para estabilizar una salida de una fuente de luz y, en particular, aunque no exclusivamente, para estabilizar una salida de un láser. La presente invención también se refiere a un láser que incluye dicho sistema de estabilización.

10

Antecedentes de la invención

La propagación de la luz a través de medios desordenados o aleatorios dependientes del tiempo se considera, en general, como un proceso de aleatorización del campo óptico que destruye toda la información del haz inicial. Sin embargo, un haz coherente que se propaga en un medio aleatorio estacionario produce un patrón de moteado determinista, manteniendo su coherencia espacial y temporal inicial. Tal comportamiento se aprovecha en el diseño de varios dispositivos ópticos novedosos, por ejemplo, para crear puntos focales usando hologramas generados por ordenador, para atrapar micropartículas y abordar de manera coherente las nanoestructuras plasmónicas.

15

20

La clave de los dispositivos basados en medios desordenados o aleatorios dependientes del tiempo es que el contenido de información del campo óptico se mantiene cuando se transmite a través de un medio aleatorio. Por lo tanto, el proceso de aleatorización de frente de onda estacionario puede usarse para detectar el estado del campo de luz antes de la dispersión.

25

El uso de medidores de longitud de onda es omnipresente en fotónica. La miniaturización de tales dispositivos sería muy ventajosa. Puede usarse una fibra multimodo para crear una aleatorización de frente de onda para actuar como un espectrómetro, como se describe en B. Redding, S. M. Popoff y H. Cao, Opt. Express 21, 6584 (2013), y B. Redding y H. Cao, Opt. Lett. 37, 3384 (2012). Sin embargo, lograr una resolución de 8 pm entre dos líneas láser adyacentes requeriría 20 m de fibra libre de perturbaciones, que sería difícil de obtener en la práctica. También se ha reconocido por separado que las mediciones polarimétricas espectrales pueden realizarse usando la matriz de transmisión de medios aleatorios, véase T. W. Kohlgraf-Owens y A. Dogariu, Opt. Lett. 35, 2236 (2010).

30

35

Las aplicaciones de laboratorio en chip requieren pequeños detectores de longitud de onda integrados. Una forma de lograr esto es propagando la luz a través de estructuras periódicas, tal como un súper prisma fabricado de cristales fotónicos especialmente diseñados. La dispersión óptica de estos cristales puede ofrecer una resolución de 0,4 nm a una longitud de onda de 1,5 μm . Sin embargo, estos dispositivos se basan en la detección fuera del plano y la propagación en el espacio libre, por lo que no son dispositivos en chip totalmente integrados. La estabilización de una fuente de láser con un medidor de longitud de onda se conoce por los documentos US6393037B1 and US2002/0122444A, en donde el medidor de longitud de onda se basa en una red de difracción o filtros de longitud de onda.

40

Sumario de la invención

45

De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se proporciona un sistema de estabilización para estabilizar una salida de una fuente de luz o láser coherente controlable, comprendiendo el sistema de estabilización un aleatorizador que comprende una pluralidad de dispersores colocados aleatoriamente configurados para aleatorizar salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable para generar un patrón de moteado; un detector configurado para detectar el patrón de moteado; un procesador o analizador configurado para analizar el patrón de moteado detectado para determinar una o más propiedades de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable; y un controlador configurado para controlar la fuente de luz o láser coherente controlable basándose en la una o más propiedades determinadas de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.

50

55

De acuerdo con un aspecto de la presente invención se proporciona un sistema de láser que comprende una fuente de láser y el sistema de estabilización.

El aleatorizador puede incluir partículas colocadas aleatoriamente para aleatorizar luz para proporcionar un patrón de moteado. Preferentemente, el aleatorizador es transmisivo.

60

El detector puede comprender el procesador o analizador configurado para analizar el patrón de moteado detectado. La una o más propiedades de la luz pueden seleccionarse a partir de: parámetros de longitud de onda, polarización, coherencia y forma de haz.

65

El sistema de estabilización puede ser un medidor de longitud de onda o un espectrómetro o un interferómetro.

Preferentemente, el aleatorizador comprende una capa o una película delgada. El espesor de la capa o película

delgada puede ser menor de 100 μm , e idealmente menor de 50 μm .

El sistema de estabilización puede proporcionar un proceso de mezcla de frente de onda que actúa como un interferómetro generalizado, entregando un patrón de moteado diferente para cada haz incidente diferente. Esta propiedad puede usarse, por ejemplo, para medir simultáneamente los modos azimutal y radial de los haces de Laguerre-Gaussian. El mismo enfoque puede usarse para medir otras propiedades clave del campo de luz, tal como el estado de polarización o la longitud de onda.

El aleatorizador puede comprender una capa de película de partículas colocadas aleatoriamente, por ejemplo, partículas de aluminio, que hacen que se forme un patrón de moteado.

El aleatorizador puede comprender partículas colocadas aleatoriamente suspendidas en una matriz. La matriz puede comprender material grueso o puede ser una capa plana delgada.

El aleatorizador puede comprender una capa de partículas colocadas aleatoriamente, por ejemplo, partículas de aluminio. El aleatorizador puede proporcionarse como una película delgada que puede colocarse delante de o sobre una trayectoria óptica desde la fuente de luz o láser coherente controlable.

El aleatorizador puede colocarse en una cavidad óptica, por ejemplo, una cavidad de Fabry Perot.

El aleatorizador puede ser reflectante. El aleatorizador puede comprender un elemento hueco para reflejar internamente y aleatorizar luz con el fin de generar el patrón de moteado. El aleatorizador puede comprender una esfera hueca, por ejemplo, una esfera integradora, o un tubo hueco.

Puede proporcionarse una fibra monomodo para transmitir luz monomodo al aleatorizador. Esto evita problemas con la coincidencia de tamaño de haz y las dimensiones de haz incidente.

El análisis de componentes principales (PCA) puede usarse para analizar la luz aleatoria para determinar la longitud de onda de la luz.

Puede proporcionarse un elemento o dispositivo óptico variable delante del aleatorizador para variar la luz que incide sobre el aleatorizador.

El elemento o dispositivo óptico variable puede operarse para variar la amplitud y/o la fase de la luz. El elemento o dispositivo óptico variable puede comprender al menos uno de un espejo deformable, un modulador de luz espacial, por ejemplo, un modulador de luz espacial de cristal líquido, y un microespejo digital.

Pueden proporcionarse múltiples aleatorizadores. Los aleatorizadores pueden espaciarse periódicamente. Los aleatorizadores puede colocarse para ofrecer un patrón de moteado que sea más eficiente en una longitud de onda específica.

Pueden proporcionarse múltiples detectores y al menos parte del patrón de moteado incide sobre los múltiples detectores. Diferentes partes del patrón de moteado pueden incidir sobre diferentes detectores. Pueden operarse diferentes detectores para determinar diferentes propiedades de la luz. Los diferentes detectores pueden operarse para determinar simultáneamente las diferentes propiedades de la luz.

Pueden proporcionarse múltiples detectores y medios para desviar o dirigir el patrón de moteado a los múltiples detectores. Los medios para desviar o dirigir pueden operarse para desviar diferentes partes del patrón de moteado a diferentes detectores. Los medios para desviar o dirigir pueden comprender uno o más dispositivos o elementos ópticos. Por ejemplo, los medios para desviar o dirigir pueden comprender un dispositivo de conformación de haz controlable, tal como un espejo deformable, un modulador de luz espacial, un microespejo digital.

Usando las propiedades de dispersión de un difusor delgado notablemente simple, es posible detectar la longitud de onda de un haz monocromático con precisión de picómetro. Este enfoque puede extenderse a una resolución aún mayor a través del uso de una cavidad óptica colocada alrededor del medio de aleatorización. Esto permite un espectrómetro ultracompacto y nuevos métodos para la estabilización del láser/haz basados en el análisis de los campos de moteado.

Breve descripción de los dibujos

A continuación, se describirán diversos aspectos de la presente divulgación solo a modo de ejemplo y con referencia a los dibujos adjuntos, de los que:

la figura 1 es una vista esquemática de un espectrómetro de patrón de moteado;

la figura 2(a) muestra una descomposición PCA de un patrón de moteado detectado en función de la longitud de

onda de láser que varía entre 785,1 nm y 785,6 nm;

la figura 2(b) muestra un ejemplo de un patrón de moteado de campo lejano observado a 785,234 nm;

5 las figuras 2(c) a (d) muestran los tres primeros componentes principales PC1, PC2 y PC3 que corresponden a los tres primeros grados de libertad detectables por el patrón de moteado;

la figura 3 muestra la distribución del error de longitud de onda medida en el caso de la alúmina;

10 la figura 4 muestra la variabilidad del patrón de moteado modelado para un difusor aleatorio dentro de una cavidad de Fabry Perot;

la figura 5 es un diagrama esquemático de un sistema de estabilización de láser que usa la detección de patrón de moteado para controlar los parámetros de láser;

15 la figura 6 es un diagrama esquemático de un espectrómetro de longitud de onda que incluye una esfera integradora;

la figura 7 es un diagrama esquemático de un conjunto basado en tubos de un espectrómetro de longitud de onda;

20 la figura 8 es un diagrama esquemático de diversas etapas de operación de un espectrómetro de patrón de moteado;

la figura 9 es un diagrama esquemático de otro sistema de estabilización por láser;

25 la figura 10 muestra el entrenamiento y la validación de alta resolución de un sistema láser que usa un primer método, y

30 la figura 11 muestra el entrenamiento y la validación de alta resolución de un sistema láser que usa un segundo método.

Descripción detallada de los dibujos

35 La presente divulgación describe el uso de dispersores aleatorios para generar patrones de moteado a partir de luz coherente, de manera que puedan medirse las propiedades de la luz, tal como la longitud de onda, la polarización y la coherencia. La luz que ha pasado a través de los dispersores aleatorios se analiza usando el análisis de componentes principales. Antes de los dispersores aleatorios, un haz coherente puede verse como una superposición de muchos pequeños haces. Después de su propagación a través de los dispersores aleatorios, se observa un patrón de interferencia entre los pequeños haces constituyentes, habiendo cada uno cambiado de dirección, tamaños de puntos y fases relativas.

40 La figura 1 muestra un espectrómetro que tiene una fuente de láser sintonizable que emite luz de longitud de onda variable en una fibra monomodo. La luz emitida por la fibra incide en un aleatorizador transmisivo que forma un patrón de moteado. La luz que ha pasado a través del aleatorizador incide sobre una cámara CCD (Pike, Allied Vision Technologies, tamaño de píxel: 7,4 μm x 7,4 μm).

45 El patrón de moteado detectado en el detector depende de la longitud de onda y puede usarse para determinar la longitud de onda de la luz procedente de la fuente. Se usaron dos fuentes de láser para probar el espectrómetro de la figura 1: un sistema de láser de diodo de cavidad Littman de ancho de línea estrecho sintonizable (Sacher Lasertechnik, 785 nm, ancho de línea < 1MHz, TEC-510-0780-100) y un láser Ti:sapphire (Spectra-Physics, ancho de línea 0,5 GHz, sintonizable 700 nm 1000 nm, modelo 3900S). Se usó un medidor de longitud de onda de superprecisión HighFinesse/Angstrom WS7 para una calibración independiente de cada fuente de láser sintonizable. La fuente de láser de diodo se usó en el estudio de intervalo de longitud de onda estrecho ($\sim 0,5$ nm), mientras que la fuente de láser Ti:sapphire permitió realizar pruebas en un intervalo de longitud de onda mayor. Para excluir la variabilidad de haz láser al sintonizar el láser, ambos haces láser se filtraron acoplado sus salidas en fibras monomodo.

50 Se consideraron dos geometrías diferentes para el aleatorizador. En un primer enfoque, se usó una capa delgada de partículas de aluminio aleatorias. Esta se formó usando una pequeña gota (~ 5 μl) de una solución disponible en el mercado de partículas de alúmina con un tamaño medio de 5 μm y agua desionizada sobre un sustrato de vidrio. El portaobjetos de vidrio tenía un espesor de 1 160 μm y se limpió con inmersiones de 5 minutos de duración en acetona e isopropanol en un baño ultrasónico, seguido de incineración de plasma a base de oxígeno a 100 W. Se tuvo cuidado de dejar que el agua desionizada se evaporara lentamente para minimizar la ondulación de la superficie de la gota de secado (véase la figura 1(a-b)). Se midió que la gota seca tenía un espesor de 40 $\mu\text{m} \pm 10$ μm . En un segundo enfoque, se usaron dos espejos de cavidad láser altamente reflectantes dentro de los cuales se insertó un difusor aleatorio para

65 crear una cavidad de Fabry-Perot aleatoria.

Para determinar la longitud de onda correspondiente a un patrón de moteado dado hay que calibrar el medidor de longitud de onda aleatoria. Esto se hace registrando el patrón de moteado para cada longitud de onda a detectar. Más precisamente, se mide un número N de patrones, donde cada patrón de moteado está definido por una agrupación bidimensional correspondiente a las intensidades medidas por la cámara CCD. Esto genera una agrupación de orden superior correspondiente a las intensidades medidas por la cámara Aijk, donde los subíndices i y j son las coordenadas de píxel de la cámara y k un índice que distingue entre diferentes mediciones. Estas diferentes mediciones corresponden a diferentes longitudes de onda λ o a múltiples exposiciones que tienen la misma longitud de onda pero que prueban las fluctuaciones del sistema óptico. La figura 2(b) muestra un patrón de moteado a modo de ejemplo usado en la parte de calibración del experimento.

Una vez completada la calibración, las mayores variaciones entre los diferentes patrones de moteado se miden usando el análisis de componentes principales (PCA) multivariado. En una primera etapa, la imagen de moteado promedio se resta de cada imagen medida $A_{ijk} = A_{ijk} - \langle A \rangle_{ij}$ donde $\langle \cdot \rangle$ representan el promedio sobre el índice k. La parte de coordenadas de píxeles de la agrupación de intensidades se aplanan (por ejemplo, se aplanan a 2 por imagen como: píxel (1,1) \rightarrow 1, píxel (1,2) \rightarrow 2, píxel (2,1) \rightarrow 3 y píxel (2,2) \rightarrow 4). Este proceso de aplanamiento transforma la agrupación de orden superior en una agrupación normal $a_{mk} = A_{ijk}$ donde el índice $m = 1..N$ corresponde a un mapeo único del par (i, j) al índice lineal m. Los componentes principales se obtienen calculando los vectores propios de la matriz

$$M = aa^T$$

donde el superíndice T representa la transposición de matriz. La matriz de covarianza M tiene un tamaño de N por N. Cada vector propio tiene N elementos y puede reformularse en forma de imagen intercambiando el índice lineal m por el índice de par (i, j). El vector propio con el valor propio más grande se denomina primer componente principal (PC), el segundo más grande segundo componente principal y así sucesivamente.

La distribución de valores propios permite determinar el número de grados de libertad a los que puede acceder el patrón de moteado a medida que se varía la longitud de onda. Un método para calcular este número es determinar el número de valores propios cuya suma es igual al 90 % o un umbral similar de la suma de todos los valores propios. Cuanto mayor sea este número, mayor será la variabilidad del patrón de moteado para una variación de longitud de onda dada. La resolución de longitud de onda del espectrómetro aleatorio es mayor cuanto mayor es el número de grados de libertad.

La determinación del PC permite la representación de los patrones de moteado en el espacio de PC. Cada patrón de moteado medido puede descomponerse en un fondo estático (el patrón de moteado promedio) y la suma ponderada de algunos componentes principales que representan la mayoría de las variaciones. La figura 2(c-d) muestra los tres primeros componentes principales PC1, PC2 y PC3, que corresponden a los tres primeros grados de libertad detectables por el patrón de moteado. Los tres patrones se parecen entre sí. Sin embargo, debido a su origen de vector propio, estos patrones son ortogonales entre sí y cada uno corresponde a un grado de libertad independiente. De hecho, por construcción, la matriz M es una matriz simétrica semidefinida positiva cuyos vectores propios son ortogonales entre sí.

Después de la descomposición, cada patrón de moteado puede representarse mediante un pequeño número de amplitudes correspondientes a las coordenadas de un punto en el espacio de PC. En este caso, los ocho primeros PC se usaron para representar cada patrón. La figura 2 muestra la longitud de onda medida experimentalmente usando el aleatorizador de alúmina en iluminación directa. La figura 2(a) muestra una descomposición PCA del patrón de moteado detectado en función de la longitud de onda de láser que varía entre 785,1 nm y 785,6 nm. La figura 2(b) muestra un ejemplo de un patrón de moteado de campo lejano observado a 785,234 nm.

La figura 2a muestra la curva paramétrica descrita en el espacio de PC (subespacio definido por los tres primeros PC) por el patrón de moteado a medida que la longitud de onda varía en un intervalo de 0,5 nm. En esto, la curva paramétrica no tiene una variación de longitud uniforme en función de la longitud de onda. Este efecto tendría un efecto adverso sobre la uniformidad de la resolución de longitud de onda del presente enfoque. En la figura 2a, solo se representan los tres primeros PC de la descomposición. Las figuras 2(c) a (e) muestran los tres primeros componentes principales usados en la descomposición. Hay otros cinco coeficientes de descomposición para cada patrón de moteado. Tener en cuenta los ocho coeficientes de descomposición de PC disminuye en gran medida este efecto y explica cómo el método PCA puede ofrecer una alta resolución.

Una vez calibrado el medidor de onda, se registra el patrón de moteado de una longitud de onda desconocida. Este patrón se descompone en el espacio de PC previamente calibrado. La longitud de onda puede establecerse usando, por ejemplo, el vecino más cercano, la distancia de Mahalanobis o el método de clasificación de regresión lineal. Todos estos métodos de clasificación ofrecen resultados perfectos (sin errores) si la longitud de onda detectada es parte del conjunto de calibración.

La figura 3 muestra la distribución del error de longitud de onda medida en el caso de la gota de alúmina en iluminación directa. El gráfico de barras muestra la distribución de error (gráfico de barras) para la regresión de mínimos cuadrados parciales y (curva roja) para la clasificación del vecino más cercano. La regresión tiene una desviación de error

estándar de 13 pm. La clasificación del vecino más cercano fue sin error. Este resultado perfecto puede entenderse considerando el enfoque en el contexto de la clasificación de longitudes de onda. De hecho, para fluctuaciones del patrón de moteado más pequeñas que el tamaño de paso usado para el conjunto de entrenamiento del patrón de moteado, el enfoque de clasificación siempre ofrecerá la longitud de onda de clasificación nominal sin ningún error.

5 Siempre que la curva paramétrica en el espacio de PC sea suave, continua y localmente lineal, también es posible medir una longitud de onda desconocida usando, por ejemplo, la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) en el espacio de PC. La PLS se usa para detectar la longitud de onda y determinar su desviación de error estándar cuando la longitud de onda desconocida no es necesariamente parte del conjunto de calibración. La figura 3 muestra que la desviación estándar del error es de aproximadamente 13 pm. Esto puede mejorar considerando pasos de longitud de onda más pequeños en el conjunto de entrenamiento que producen desviaciones localmente más pequeñas de la variación lineal entre cada etapa de entrenamiento.

15 Hay rutas para mejorar la sensibilidad del aleatorizador al incluir un mecanismo de retroalimentación óptica. Esto puede lograrse incorporando el medio de dispersión aleatoria dentro de una cavidad de Fabry Perot. La principal diferencia entre los dos dispositivos fue la intensidad de transmisión mucho más baja a través del dispositivo basado en Fabry Perot y la necesidad resultante de un mayor tiempo de exposición del detector CCD. No se observó ninguna mejora en la resolución al usar la cavidad de Fabry Perot específica.

20 La figura 4 muestra la variabilidad del patrón de moteado modelado para un difusor aleatorio dentro de una cavidad de Fabry Perot compuesta por dos reflectores Bragg distribuidos que tienen un número creciente de períodos, es decir, una reflectividad creciente. Los diferentes colores corresponden a diferentes longitudes de onda incidentes. La figura 4 muestra una ventaja potencial de esta configuración, es decir, la variabilidad del patrón de moteado frente al cambio de longitud de onda aumenta a medida que la cavidad proporciona más retroalimentación. Esta mejora está finalmente limitada por la pérdida en la eficiencia de transmisión.

30 Es posible generalizar el método de entrenamiento para ir más allá de la detección de un solo parámetro, de manera que puedan medirse múltiples parámetros al mismo tiempo. Esto incluye no solo los parámetros de forma de haz, sino también la polarización y múltiples longitudes de onda simultáneas. Este último caso permite la construcción de espectrómetros de diseño compacto. Además, la detección simultánea de cambios en múltiples parámetros de haz puede dar una idea de una serie de fenómenos ópticos que tienen un efecto en la transmisión de haces ópticos. Los cambios mínimos en estos parámetros pueden, en efecto, amplificarse por la dispersión múltiple en el difusor aleatorio y detectarse con alta sensibilidad.

35 Aunque el sistema óptico de la figura 1 muestra un solo aleatorizador, pueden proporcionarse múltiples aleatorizadores de este tipo. Esto ayuda a mejorar la sensibilidad a longitudes de onda específicas. La posición de cada capa se elige para generar el patrón de interferencia que sea más eficiente en una longitud de onda específica. Las múltiples capas son, en efecto, periódicas en una dirección y aleatorias en dos direcciones, de manera que se comportan como un cristal fotónico en una dirección y como un dispersor aleatorio en las otras dos direcciones.

40 La sensibilidad, el contraste y la precisión del sistema óptico pueden ajustarse a través del uso de al menos un dispositivo controlable que pueda controlar la amplitud o la fase de un campo de luz. Dichos dispositivos controlables incluyen espejos deformables, moduladores de luz espacial de cristal líquido y dispositivos de microespejos digitales. El dispositivo controlable se coloca en la entrada del aleatorizador. Usando tales dispositivos, pueden generarse múltiples patrones a partir del mismo haz. Esto aumenta la cantidad de información que puede medirse simultáneamente.

50 El sistema óptico es genérico en el sentido de que puede usarse para detectar no solo la longitud de onda, sino también, usando un entrenamiento adecuado, el estado de polarización y/o la forma del haz incidente. Debido a esto, es importante limitar el número de grados de libertad para los que se entrena el espectrómetro aleatorio. En este caso, se ha usado una fibra monomodo (SMF) para limitar el sistema a una sola variable, la longitud de onda. En efecto, el SMF actúa como la rendija de entrada en un monocromador garantizando que a la salida del monocromador solo las variaciones en la longitud de onda generen una variación de intensidad. Sin embargo, la sustitución de la SMF por una fibra multimodo o estenopeica añadiría a la variabilidad de longitud de onda del patrón de moteado las variaciones debidas a la forma de haz.

60 El uso de un medio aleatorio simple puede proporcionar un medidor de longitud de onda con resolución picómetro, aprovechando el gran número de grados de libertad asociados a la transmisión de luz a través de este medio desordenado. Las implementaciones del medidor lograron una resolución de 13 pm y un ancho de banda de 10 nm a una longitud de onda de 800 nm. El concepto puede extenderse a medios aleatorios dentro de una cavidad. Esto puede mejorar su sensibilidad a la longitud de onda a expensas de la intensidad transmitida. Este concepto puede extenderse al desarrollo de espectrómetros especializados y para su uso en estabilización láser.

65 La figura 5 muestra un sistema de estabilización láser que usa la detección de patrón de moteado para estabilizar las características del láser. Esto tiene una fuente de luz controlada por ordenador, por ejemplo, un láser o un LED, que emite un haz de salida a lo largo de una trayectoria óptica y a través de un aleatorizador transmisivo que está dispuesto

para generar un patrón de moteado. En una salida del aleatorizador, se proporciona un detector para detectar el patrón de moteado, para determinar de este modo una o más características del haz de salida. Los datos relacionados con las características determinadas se retroalimentan al sistema de control por ordenador del láser, que varía uno o más parámetros operativos del láser para lograr una salida deseada. Por ejemplo, la rejilla de la cavidad intra/extra podría variar, al igual que la longitud de la cavidad, la temperatura operativa y la corriente de la bomba. De hecho, cualquier parámetro operativo controlable podría variar en función de la retroalimentación del detector hasta que se logre la salida deseada.

En algunas circunstancias, si la velocidad de adquisición de datos es importante, algunos de los análisis de componentes principales pueden lograrse en el dominio óptico. Para hacer esto, un dispositivo de conformación de haz controlable, tal como un espejo deformable, un modulador de luz espacial, un microespejo digital, se coloca a la salida del aleatorizador. A continuación, el dispositivo de conformación de haz controlable se dispone para dirigir ciertas partes del patrón de moteado a diferentes detectores. La intensidad de estos nuevos haces corresponderá a los componentes principales. Los detectores pueden ser fotodetectores individuales, fotodetectores cuádruples, fotodetectores equilibrados o una agrupación de uno o más de estos detectores. Sumar o restar fotocorrientes de los múltiples detectores y aplicar los factores de ponderación adecuados, proporciona el coeficiente de PC para la adquisición rápida de datos. Normalmente, esto es necesario para implementar un circuito de retroalimentación, como sería necesario para el sistema de estabilización láser de la figura 5.

La figura 6 muestra otro ejemplo de un aleatorizador. Este tiene una fibra para suministrar luz láser a una esfera integradora y una cámara para capturar un patrón de moteado generado por la esfera integradora. La fibra es una fibra monomodo que garantiza que el cambio de longitud de onda no afecte la forma de haz. La esfera integradora está dispuesta para proporcionar una aleatorización espacial del campo de luz de entrada con baja pérdida.

La esfera integradora tiene un recubrimiento que es altamente reflectante en la longitud de onda de interés en su superficie interior. El recubrimiento difunde la luz de manera similar al difusor delgado descrito anteriormente, pero en la reflexión. La luz se refleja de un lado a otro dentro de la esfera hasta que finalmente se detecta en el puerto de salida con la cámara o la agrupación de detectores. Dentro de la esfera, se proporciona una serie de deflectores recubiertos (no mostrados) para bloquear una trayectoria de luz directa entre el puerto de entrada y el de salida. Idealmente, el material de la esfera debería tener una alta estabilidad térmica, con el fin de no cambiar sus propiedades ópticas como resultado de pequeñas fluctuaciones de temperatura. La esfera también puede estabilizarse en temperatura usando elementos Peltier termoeléctricos, por ejemplo. También puede lograrse una mayor estabilización de la temperatura enfriando la esfera integradora en un baño de líquido a temperatura constante. Las superficies dentro de la esfera integradora se tratan para garantizar una alta reflexión difusiva. La parte de formación de imágenes de la esfera integradora corresponde a un puerto de salida de la esfera integradora. No se requieren más ópticos en este puerto, aunque podrían usarse uno o más elementos ópticos para agrandar o encoger el patrón de moteado.

El haz láser que va a medirse o estabilizarse se acopla ópticamente a la fibra monomodo. La luz que sale de la fibra monomodo no cambia su perfil de haz a medida que cambia la longitud de onda. La luz de salida de la fibra se usa para iluminar el puerto de entrada de la esfera integradora. La esfera integradora crea patrones de moteado muy sensibles a la longitud de onda. Esto se logra a través de los muchos reflejos difusos dentro de la esfera que hace el campo de luz antes de llegar al puerto de salida y la cámara. En efecto, la cámara mide el patrón de moteado creado a partir de la interferencia entre las muchas trayectorias que toma la luz dentro de la esfera. Como las distancias entre los reflejos difusivos sucesivos dentro de la esfera son grandes, este patrón de moteado tiene una alta sensibilidad a los pequeños cambios de longitud de onda. En general, la resolución/sensibilidad de la longitud de onda del moteado es proporcional a la longitud de trayectoria óptica dentro del dispositivo generador de moteado.

La figura 7 muestra otro ejemplo de un aleatorizador reflectante hueco. En este caso, el aleatorizador es un tubo reflectante con múltiples difusores paralelos (por ejemplo, como se describió anteriormente) en su interior para crear una disposición óptica de baja pérdida y alta estabilidad. La figura 7 muestra dos difusores, pero se apreciará que podrían usarse más para formar una serie en cascada. Opcionalmente, una superficie interior del tubo puede recubrirse con un material difusivo altamente reflectante, como se ha descrito con referencia a la esfera integradora. Como antes, se usa una fibra para suministrar luz láser al aleatorizador reflectante y se proporciona una cámara para capturar un patrón de moteado generado por el aleatorizador reflectante. La fibra es una fibra monomodo que garantiza que el cambio de longitud de onda no afecte la forma de haz. El aleatorizador de tubo está dispuesto para proporcionar una aleatorización espacial del campo de luz de entrada con baja pérdida y alta estabilidad.

En los ejemplos mostrados en las figuras 6 y 7, el detector usado es una cámara. Sin embargo, podría usarse cualquier detector adecuado, por ejemplo, una agrupación de detectores, tal como una agrupación de detectores de fotodiodos de cuadrante (QPD). Además, cabe señalar que la forma y el tamaño del reflector hueco, por ejemplo, la esfera o el tubo, pueden cambiarse o diseñarse para lograr diferentes sensibilidades de longitud de onda y estabilidad ambiental (temperatura, etc.).

La figura 8 muestra un método para medir los cambios de longitud de onda promedio de un haz láser cuya longitud de onda se modula periódicamente. La primera mitad del período se usa para entrenar (calibrar) el patrón de moteado usando el método de componentes principales y, a continuación, las mitades de los períodos subsiguientes se usan

para validar (comprobar dos veces) el entrenamiento. En este caso, las etapas de calibración y validación necesitan un medidor de longitud de onda externo para ofrecer una medición de longitud de onda absoluta que pueda usarse para calibrar el patrón de moteado. En la etapa de validación, el medidor de longitud de onda externo se usa para verificar la longitud de onda detectada por el medidor de longitud de onda moteado. La figura de la izquierda muestra los cambios de longitud de onda en función del tiempo medidos por un medidor de longitud de onda estándar superpuesto por la longitud de onda detectada por el espectrómetro de moteado. La figura de la derecha muestra las representaciones esquemáticas de la configuración que consiste en el haz láser, el aleatorizador, la cámara y el patrón de moteado detectado. La parte inferior de la figura 8 ilustra el enfoque de entrenamiento de componentes principales. Los cuatro paneles corresponden a las proyecciones de los patrones de moteado detectados sobre los componentes principales. En orden, estos son: el primer componente principal frente al segundo componente principal; el primer componente principal frente al tercer componente principal; el segundo componente principal frente al tercer componente principal y el segundo componente principal frente al cuarto componente principal.

El método descrito con referencia a la figura 8 requiere el uso de un medidor de longitud de onda externo para la calibración. En otro enfoque, puede evitarse la necesidad de un medidor externo. En este caso, uno o más componentes ópticos varían de tal manera que provocan oscilaciones periódicas en la salida de láser, por ejemplo, la longitud de onda. Estas oscilaciones periódicas pueden detectarse como oscilaciones periódicas en los primeros componentes principales. Conocer la amplitud de oscilación permite la medición y detección de cambios de longitud de onda relativos que pueden usarse para crear un circuito de retroalimentación sin calibración previa. Este enfoque puede usarse para minimizar el efecto de la deriva térmica al monitorizar las oscilaciones de longitud de onda periódicas de alta frecuencia. Si la frecuencia de la modulación de longitud de onda es mayor que el ancho de banda de las fluctuaciones térmicas, entonces es posible medir las derivas de longitud de onda del haz láser en un tiempo lo suficientemente breve como para evitar cualquier interferencia con la deriva térmica del dispositivo generador de patrones de moteado.

La figura 9 muestra un láser con un sistema de estabilización de longitud de onda de acuerdo con la invención. Tiene una cavidad láser definida por dos reflectores, uno de los cuales permite que salga algo de luz. En la cavidad, se proporciona un medio de ganancia y un elemento intracavitario. En una salida del láser hay un medidor de onda de patrón de moteado. En el ejemplo mostrado, el medidor de onda de patrón de moteado tiene una esfera integradora y una cámara/detector que está conectado a un controlador. Sin embargo, podría usarse cualquiera de los otros medidores de onda de patrón de moteado descritos en el presente documento. El controlador está conectado al primer espejo, el medio de ganancia y el elemento intracavitario. Cada uno de estos tres componentes puede controlarse por el controlador para variar la longitud de onda en la salida de láser. Por lo tanto, puede influirse en la salida de láser a través de múltiples canales. Al variar la posición del espejo, puede cambiarse la longitud de la cavidad. Al variar el potencial aplicado sobre el material de ganancia, puede variarse la ganancia del láser. Al variar los elementos activos intracavitarios (tal como filtros o conformadores de haz), por ejemplo, moviéndolos dentro o fuera de la trayectoria óptica, puede variarse de nuevo la salida de láser. Cada uno de estos canales de control de láser puede usarse para crear cambios en las propiedades de haz de láser, que puede detectarse como un cambio en el patrón de moteado después del aleatorizador.

El sistema de la figura 9 puede calibrarse para compensar los cambios de longitud de onda relativos sin usar un medidor de onda externo. Como ejemplo, los canales de entrada que controlan el láser podrían modularse a alta frecuencia (conocida) (por encima del ruido térmico). Cada canal puede modularse con una frecuencia diferente. A continuación, se determinan las variaciones del patrón de moteado en cada frecuencia de modulación. Estas variaciones pueden determinarse usando un análisis multivariante en tiempo real, tal como el análisis de componentes principales o la descomposición en valores singulares. La monitorización de estas oscilaciones permite detectar cualquier deriva en el sistema láser. Estas pueden contrarrestarse a través de los canales de control de láser.

La figura 10 y la figura 11 muestran los resultados de los dos enfoques. La figura 10 muestra el entrenamiento y la validación de alta resolución usando un medidor de longitud de onda externo que resuelve 10 pm. En la figura 10, el lado izquierdo son los datos de entrenamiento y el lado derecho es la validación. La figura 11 muestra el entrenamiento y la validación de alta resolución usando el segundo enfoque, es decir, el enfoque que usa propiedades relativas y evita la necesidad de un medidor de longitud de onda externo para la calibración. En la figura 11, los datos de entrenamiento se muestran en la representación gráfica superior. El entrenamiento es continuo, usando la descomposición en valores singulares. Esto significa que el entrenamiento olvida lentamente los viejos patrones de moteado a medida que se adquieren nuevos patrones de moteado. Los datos de validación se muestran en la representación gráfica inferior de la figura 11. En este caso, la resolución es de 20 MHz (~0,1 pm) limitada por la amplitud de modulación de láser.

En láseres, las propiedades ópticas del medio de ganancia activo dentro de la cavidad de láser dependen en gran medida de la temperatura. Normalmente, la temperatura del medio de ganancia se estabiliza a través del uso de un termostato que mide la temperatura del medio de ganancia usando, por ejemplo, un termopar. Al monitorizar las variaciones del patrón de moteado de acuerdo con la presente invención, puede monitorizarse el impacto en la salida debido a los cambios en la temperatura del material de ganancia y usarse un circuito de retroalimentación para estabilizar sus propiedades ópticas directamente (por ejemplo, variando la corriente de excitación).

Además de usarse para estabilizar láseres, la presente invención podría usarse para estabilizar otros componentes ópticos, tal como sensores ópticos. En particular, los patrones de moteado de la invención pueden usarse para estabilizar, controlar o monitorizar componentes ópticos, que tienen salidas que dependen de la temperatura. La dependencia de la temperatura podría deberse a la expansión térmica, la contracción y los cambios del índice de refracción con la temperatura. En la práctica, algunos de estos cambios son mínimos. Sin embargo, los cambios en el patrón de moteado pueden usarse para detectar estos cambios mínimos y medir un cambio de temperatura de efecto en el sistema óptico. Este cambio de temperatura puede monitorizarse o usarse en un circuito de retroalimentación adaptado para controlar uno o más parámetros que afectan a la temperatura. Los cambios ópticos dependientes de la temperatura pueden no estar asociados solo al cambio de longitud de onda, sino que también podrían cambiar la forma de haz y la polarización. En este caso, el dispositivo de patrón de moteado no incluiría la fibra monomodo en la entrada que se usa cuando solo se detectan cambios de longitud de onda.

En todos los ejemplos descritos anteriormente, el detector puede incluir un procesador o un analizador para analizar los patrones de moteado para determinar uno o más parámetros de la luz y/o cambios en dichos parámetros. Como alternativa, el procesador de análisis o analizador puede proporcionarse por separado de cualquier elemento detector. Igualmente, en todos los casos, pueden proporcionarse múltiples detectores o agrupaciones de detectores y al menos parte del patrón de moteado puede incidir en los múltiples detectores. Diferentes partes del patrón de moteado pueden incidir sobre diferentes detectores. Pueden operarse diferentes detectores para determinar diferentes propiedades de la luz. Los diferentes detectores pueden operarse para determinar simultáneamente las diferentes propiedades de la luz.

La presente invención puede proporcionar un medidor de longitud de onda de patrón de moteado de alta resolución y alta sensibilidad. Esto permite el bloqueo de una longitud de onda láser en cualquier longitud de onda elegida. Adicionalmente, permite una fuente de luz ultraestable en los regímenes operativos de onda continua y pulsada de un dispositivo láser, debido a que es posible contrarrestar las fluctuaciones temporales, espectrales, espaciales y de amplitud del dispositivo láser. Además, el patrón de moteado caracterizado puede usarse como un patrón de moteado de "marcación bajo demanda" para iluminación estructurada para aplicaciones de imágenes.

Los expertos en la materia apreciarán que son posibles variaciones de las disposiciones desveladas sin alejarse de la invención. Por ejemplo, aunque la técnica de análisis se ha descrito basándose en PCA, se apreciará que podrían usarse otros métodos de detección de patrones. En consecuencia, la descripción anterior se realiza solo a modo de ejemplo y no con fines limitantes. Será evidente para los expertos en la materia que pueden realizarse modificaciones menores sin cambios significativos en la operación descrita.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de estabilización para estabilizar una salida de una fuente de luz o láser coherente controlable, comprendiendo el sistema de estabilización un aleatorizador que comprende una pluralidad de dispersores colocados aleatoriamente configurados para aleatorizar salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable con el fin de generar un patrón de moteado; un detector configurado para detectar el patrón de moteado; un procesador o un analizador configurado para analizar el patrón de moteado detectado con el fin de determinar una o más propiedades de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la fuente de luz o láser coherente controlable; y un controlador configurado para controlar la fuente de luz o láser coherente controlable basándose en la una o más propiedades determinadas de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.
2. Un sistema de estabilización de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable comprenden una o más de longitud de onda de la luz, polarización de la luz, coherencia de la luz, parámetros de forma de haz y modo espacial.
3. Un sistema de estabilización de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que el detector comprende el procesador o el analizador.
4. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el procesador o el analizador están dispuestos para usar el análisis de componentes principales (PCA) para analizar la luz aleatoria para determinar la una o más propiedades de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.
5. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el controlador está configurado para controlar o variar al menos una de una longitud de una cavidad láser y una propiedad de un medio de ganancia de láser de la fuente de luz o láser coherente controlable basándose en la una o más propiedades determinadas de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.
6. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el controlador está configurado para controlar o variar al menos una propiedad de un elemento intracavitario tal como uno o más filtros o conformadores de haz de la fuente de luz o láser coherente controlable basándose en la una o más propiedades determinadas de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.
7. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que se proporcionan múltiples detectores, en el que diferentes partes del patrón de moteado inciden sobre diferentes detectores, y en el que los diferentes detectores se pueden hacer funcionar para determinar diferentes propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.
8. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que comprende una fibra monomodo para transmitir luz monomodo al aleatorizador y la una o más propiedades de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable es la longitud de onda de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.
9. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que comprende un elemento o dispositivo óptico variable delante del aleatorizador configurado para variar la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable que incide sobre el aleatorizador, en el que el elemento o dispositivo óptico variable se puede hacer funcionar para variar la amplitud y/o la fase de la luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.
10. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el aleatorizador comprende una pluralidad de partículas colocadas aleatoriamente para dispersar y aleatorizar de este modo luz para generar un patrón de moteado, y/o en el que el aleatorizador se proporciona en una cavidad óptica tal como una cavidad de Fabry Perot.
11. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el aleatorizador es reflectante.
12. Un sistema de estabilización de acuerdo con la reivindicación 11, en el que el aleatorizador comprende un elemento hueco para reflejar internamente y aleatorizar luz con el fin de generar el patrón de moteado.
13. Un sistema de estabilización de acuerdo con la reivindicación 12, en el que el aleatorizador comprende una esfera hueca, por ejemplo, una esfera integradora, o un tubo hueco.
14. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el controlador está

configurado para controlar o variar al menos un parámetro operativo de la fuente de luz o láser coherente controlable basándose en la una o más propiedades determinadas de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.

- 5 15. Un sistema de estabilización de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el controlador está configurado para controlar o variar una temperatura operativa o una corriente de la bomba de la fuente de luz o láser coherente controlable basándose en la una o más propiedades determinadas de la luz y/o cambios en una o más propiedades de la salida de luz desde la fuente de luz o láser coherente controlable.
- 10 16. Un sistema láser que comprende una fuente de láser y el sistema de estabilización de cualquier reivindicación anterior.

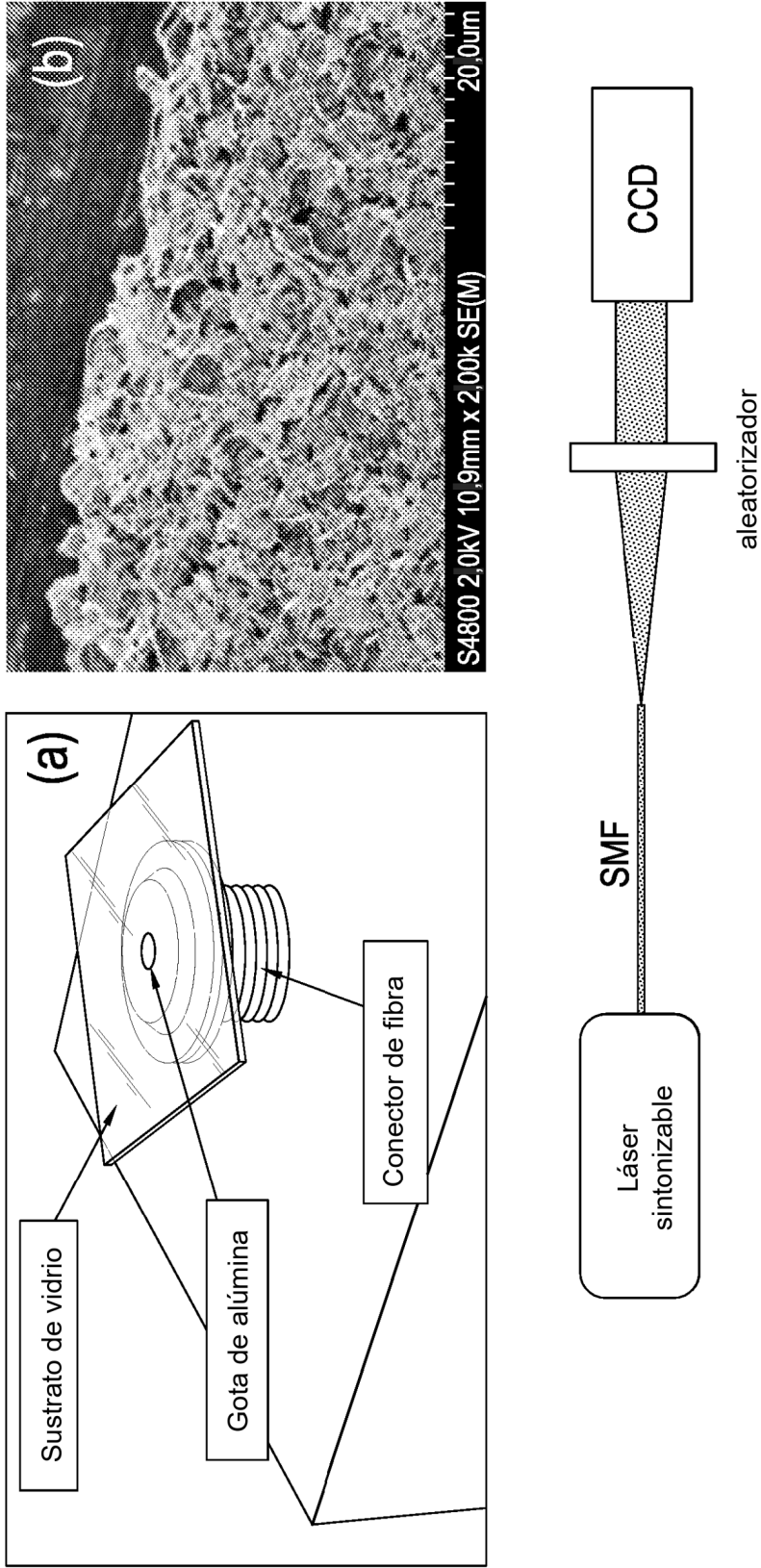


Figura 1

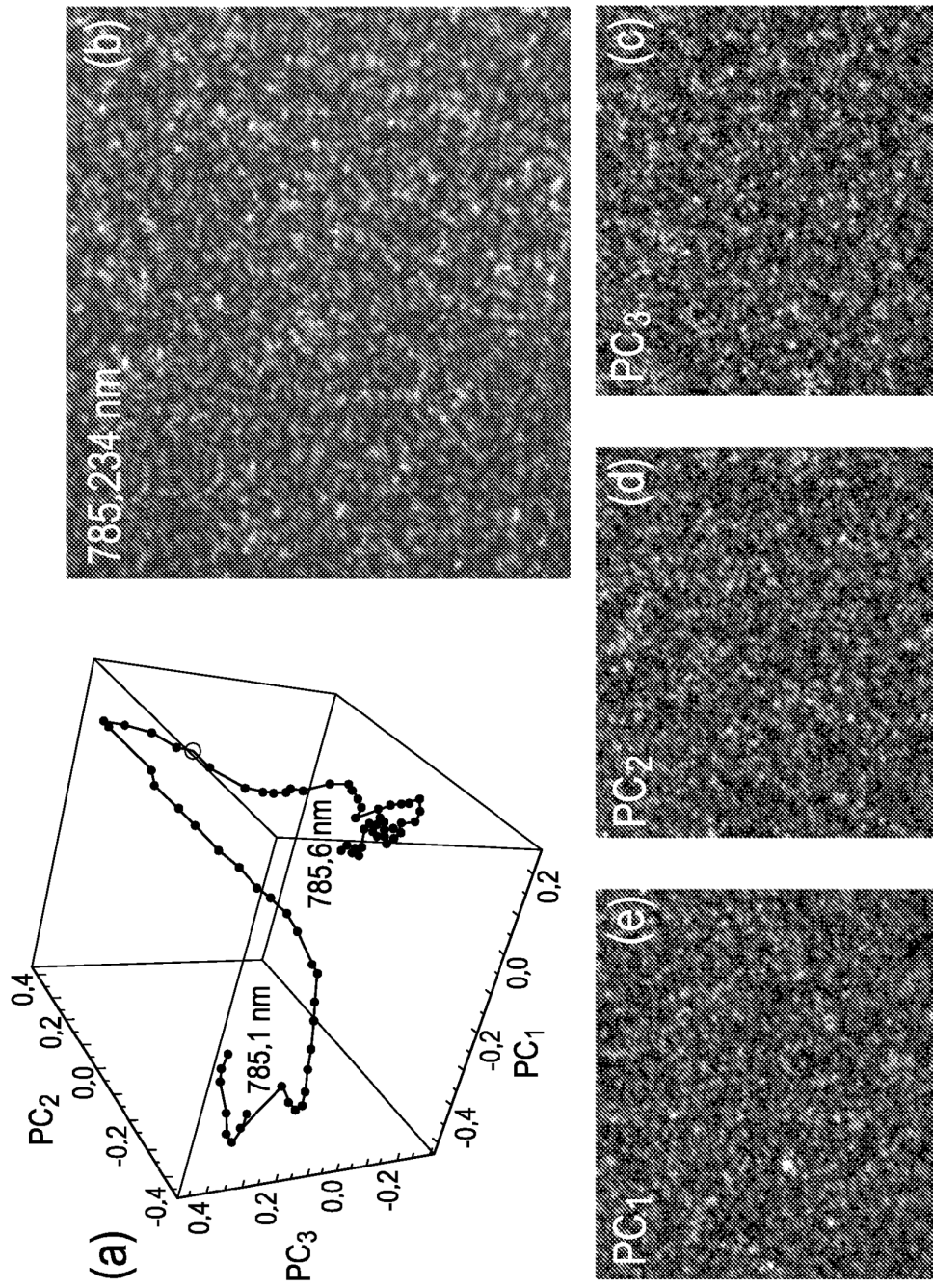


Figure 2

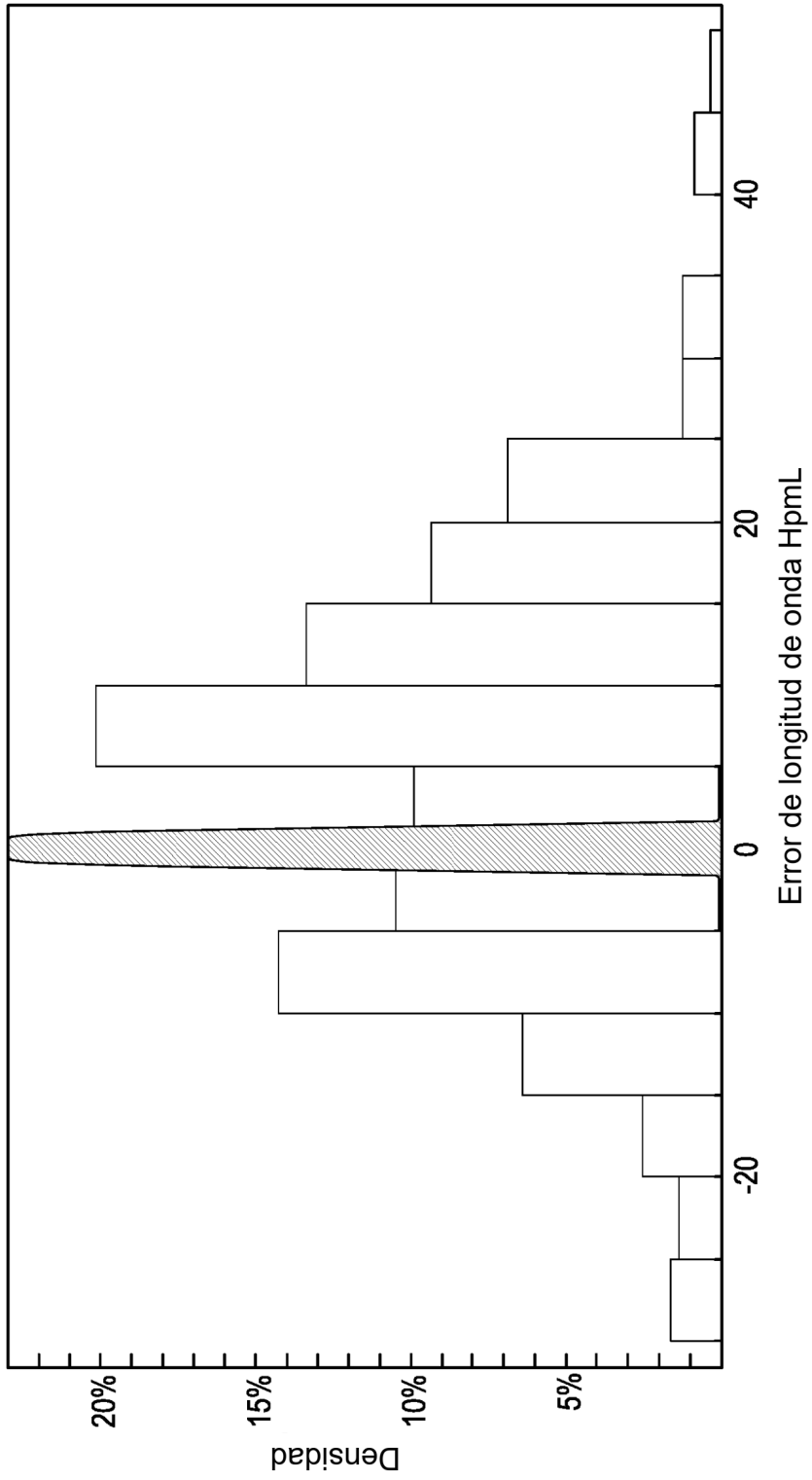


Figura 3

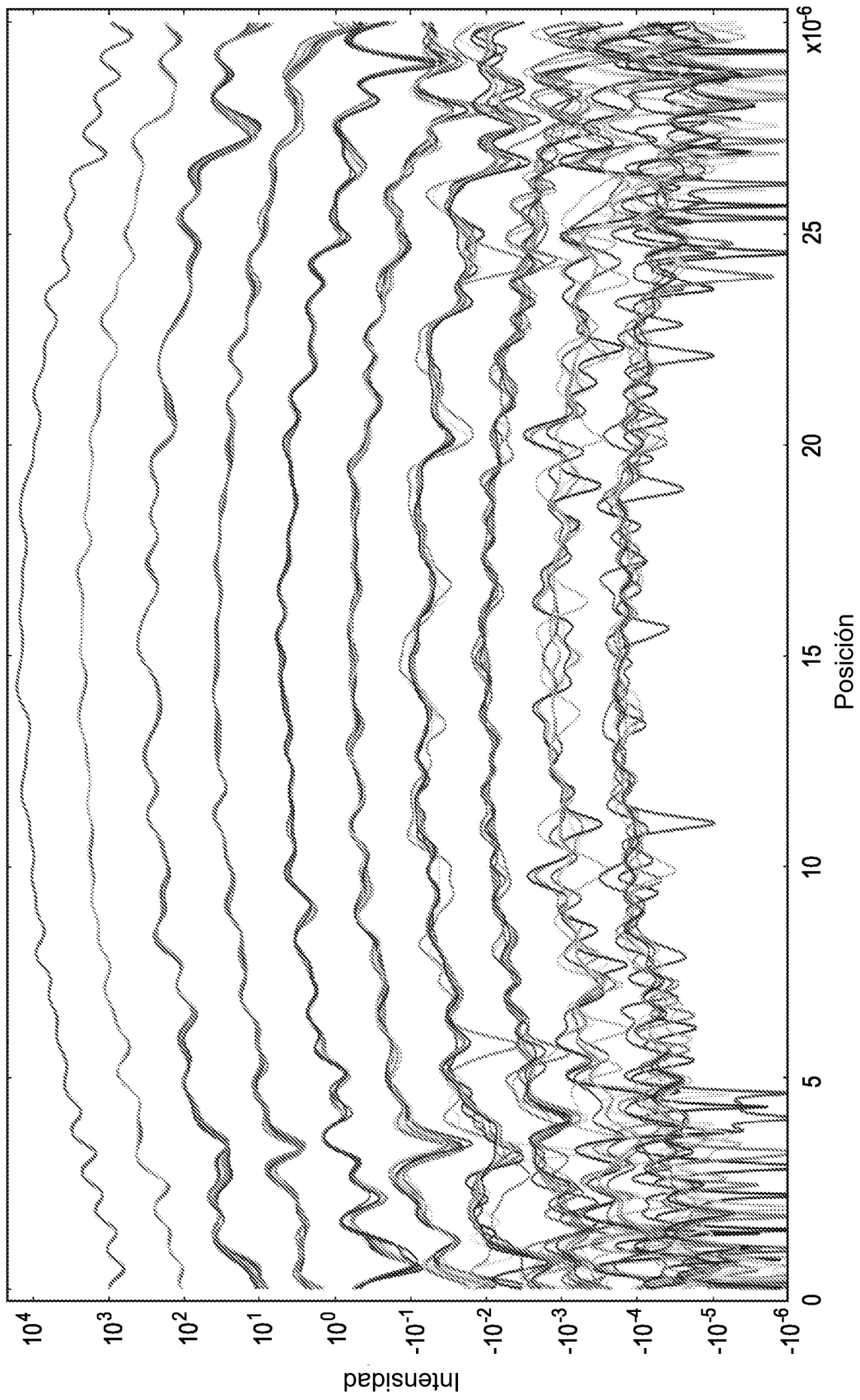


Figura 4

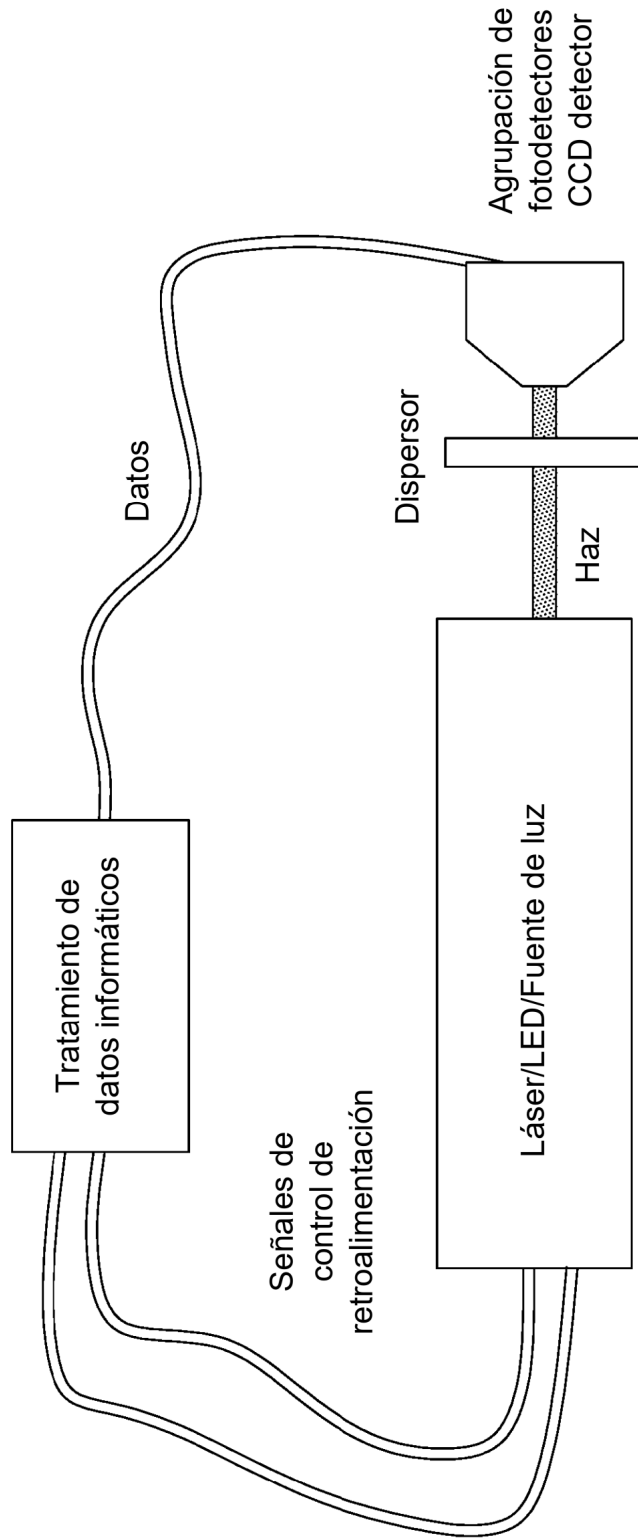


Figura 5

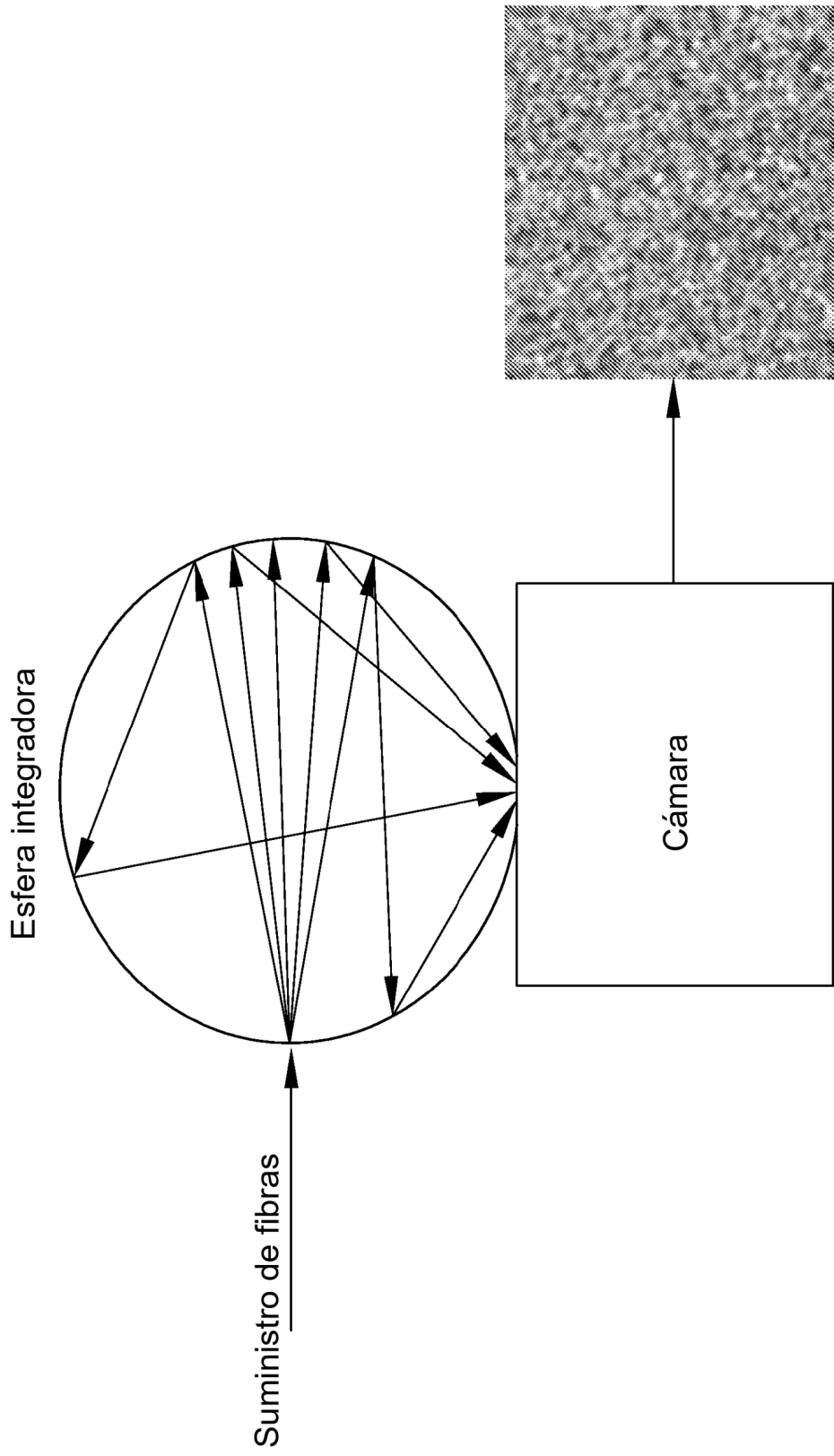


Figura 6

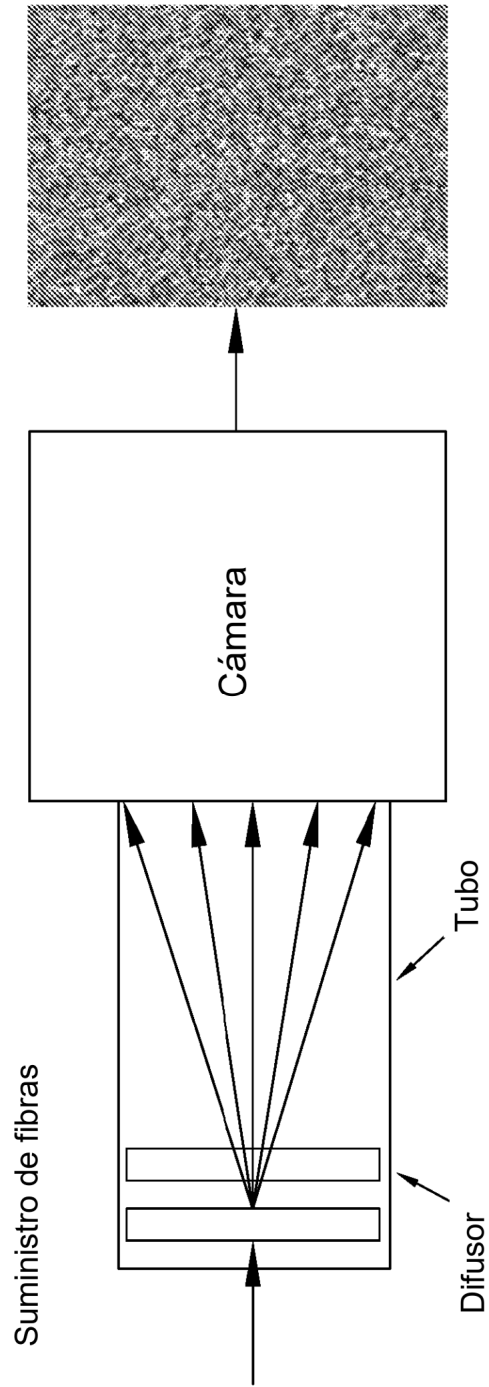


Figura 7

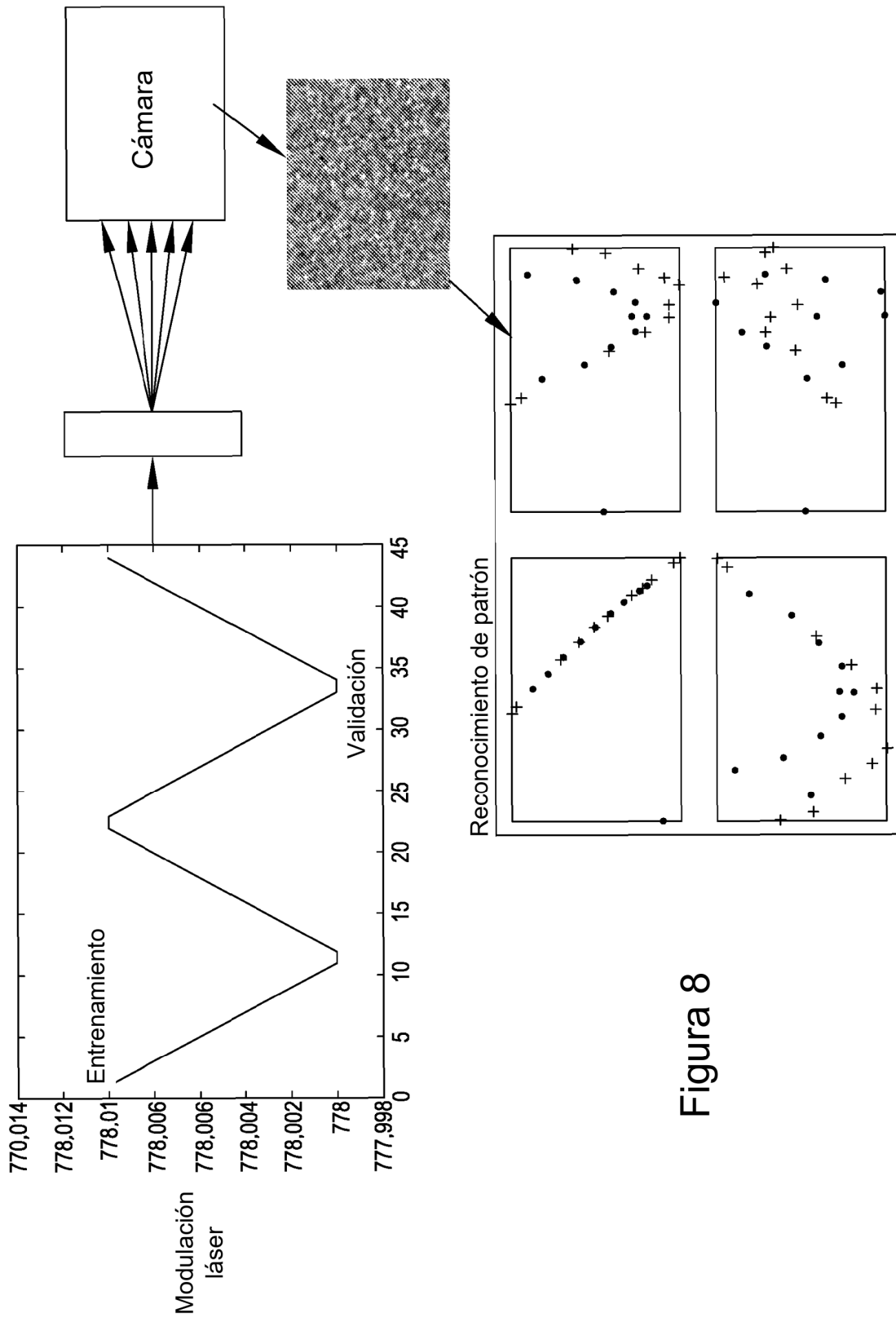


Figura 8

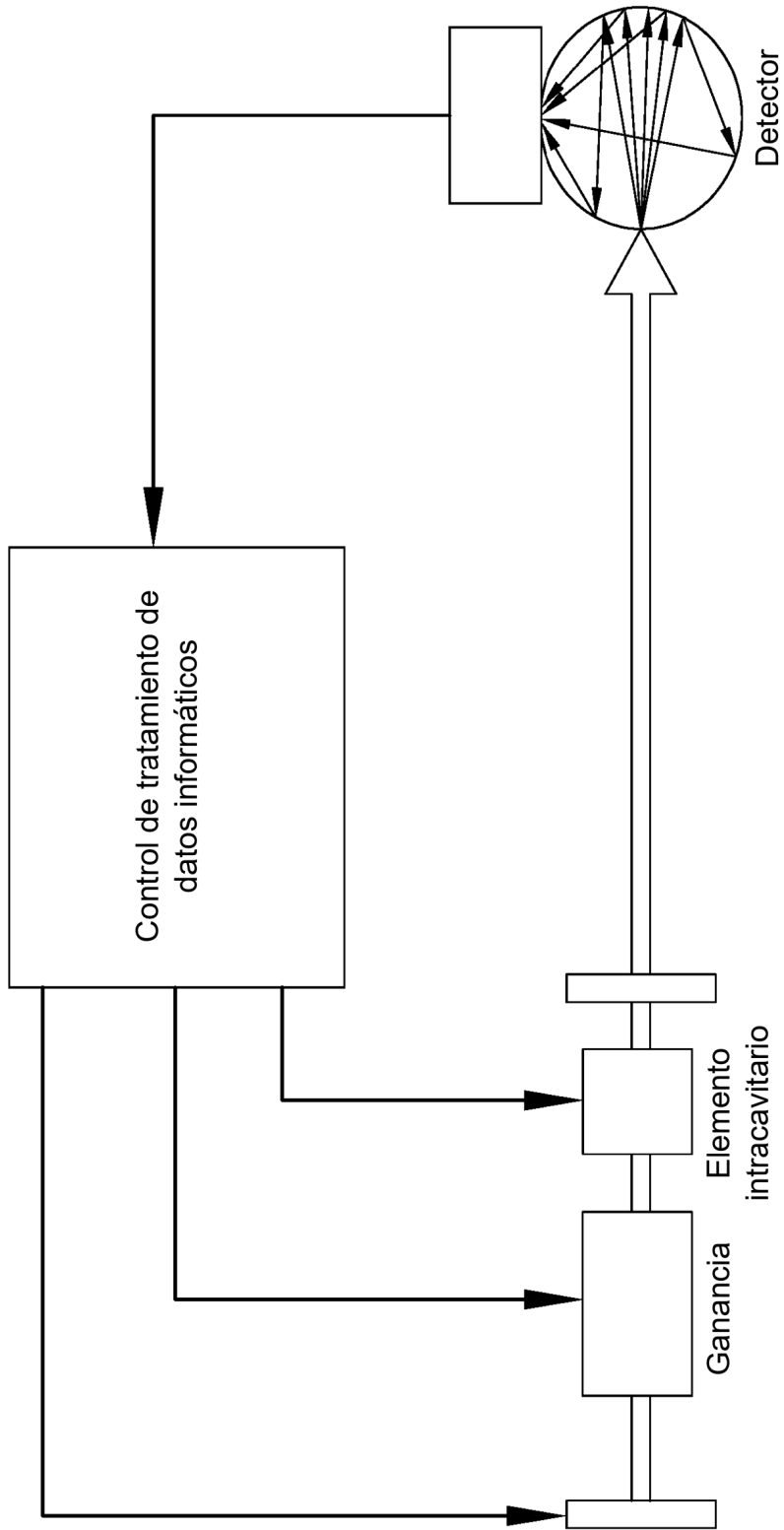


Figura 9

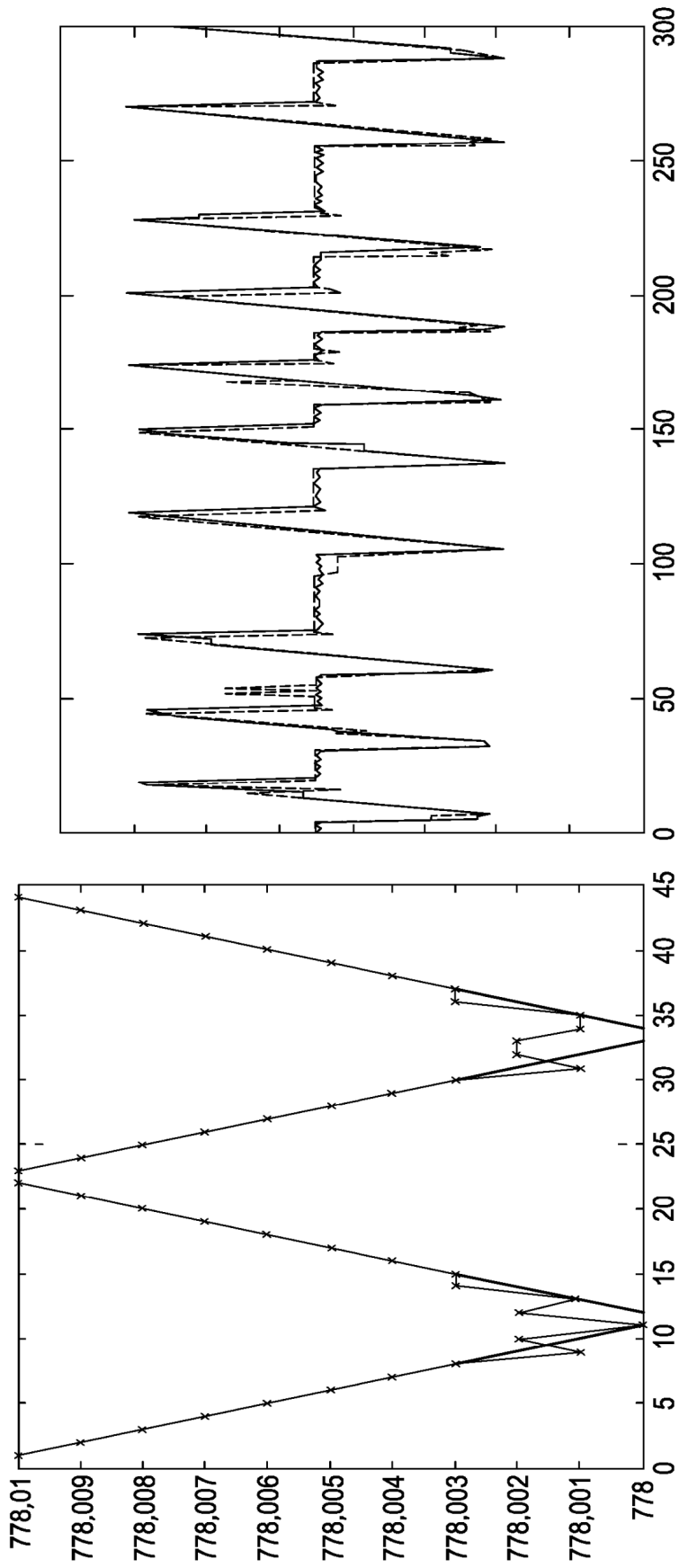


Figura 10

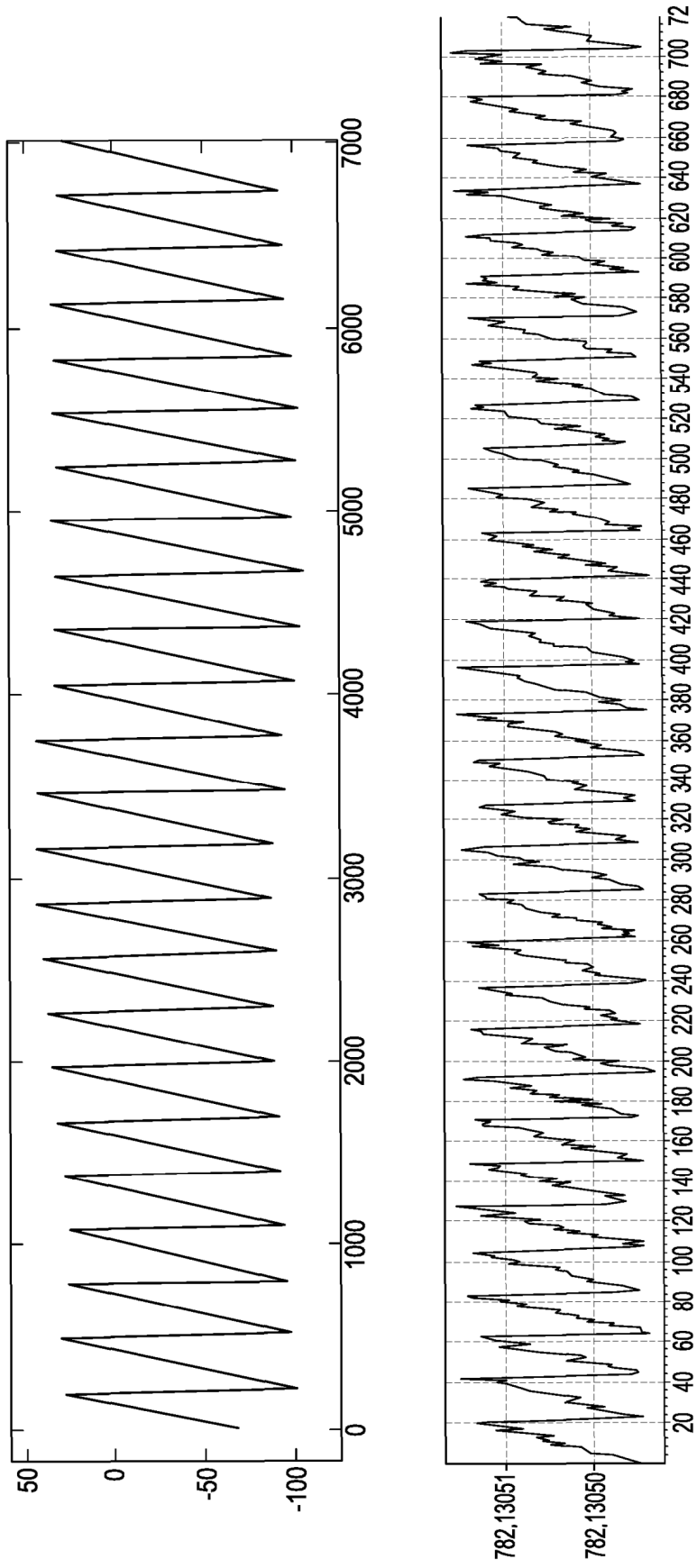


Figura 11