

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 585 633**

51 Int. Cl.:

**G01J 3/02** (2006.01)

**G02B 26/08** (2006.01)

**G01B 9/02** (2006.01)

**G01J 3/453** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.10.2011** **E 11771380 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.05.2016** **EP 2627978**

54 Título: **Espectrómetro con deflector ajustable para controlar la alineación de luz dispersada sobre el detector, para tomografía de coherencia óptica**

30 Prioridad:

**14.10.2010 US 904681**

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

**07.10.2016**

73 Titular/es:

**ALCON LENSX, INC. (100.0%)**

**33 Journey, Suite 175**

**Aliso Viejo, CA 92656, US**

72 Inventor/es:

**RAKSI, FERENC**

74 Agente/Representante:

**CURELL AGUILÁ, Mireia**

ES 2 585 633 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

Espectrómetro con deflector ajustable para controlar la alineación de luz dispersada sobre el detector, para tomografía de coherencia óptica.

### Referencia cruzada a solicitud relacionada

Esta solicitud reivindica prioridad bajo 35 U.S.C. §119 sobre la solicitud de patente estadounidense con nº de serie 12/904.681, presentada el 14 de octubre de 2010.

### Campo técnico

Este documento de patente describe espectrómetros con deflectores ajustables. En más detalle, este documento de patente describe espectrómetros cuya alineación se controla mediante un deflector ajustable para su potencial aplicación en tomografía de coherencia óptica.

### Antecedentes

Los tomógrafos de coherencia óptica de dominio espectral (SD-OCT) obtienen imágenes de zonas objetivo dividiendo la luz de una fuente luminosa de banda relativamente ancha en una luz de referencia y una luz de imagen, e interfiriendo una luz de imagen devuelta desde el objetivo con una luz de referencia devuelta desde por ejemplo un espejo de referencia. Esta luz de interferencia o de imagen se descompone entonces de manera espectral y los componentes espectrales se proyectan o transmiten a los sensores de una matriz de sensores en un detector. Los SD-OCT obtienen imágenes del objetivo en un intervalo de profundidades z de manera esencialmente simultánea en una ubicación lateral xy específica mediante la transformada de Fourier de los componentes espectrales de la luz de interferencia, detectada por los sensores individuales. Los sistemas de OCT más tradicionales, por ejemplo del tipo de dominio temporal, obtienen imágenes del intervalo de profundidades z realizando un barrido en z, dando como resultado velocidades de procesamiento considerablemente inferiores. Cuando se combina un SD-OCT con un escáner x, y, lineal, o xy, pueden formarse imágenes bi- o tridimensionales de un volumen o zona objetivo entero con una velocidad y resolución sorprendentemente altas.

Sin embargo, la obtención de imágenes de alta resolución y de alta velocidad de rendimiento de los SD-OCT se logra normalmente mediante un control altamente preciso sobre la mayoría de los parámetros de sus especificaciones, que incluyen el ancho de banda de la fuente luminosa, la resolución y eficacia de captación de luz de la óptica y la velocidad de lectura de su matriz de detectores.

Una clase de SD-OCT utiliza espectrómetros de obtención de imagen de alta apertura numérica con rendimiento limitado de difracción para cumplir con estos requisitos. Estos dispositivos utilizan a menudo una matriz lineal de sensores como el detector, ya que éstos proporcionan velocidades de lectura más rápidas que los sensores dispuestos en matrices bidimensionales, y aún barren un volumen objetivo con una velocidad razonable. Una matriz de sensores lineal típica, adecuada para resolver el espectro de una fuente luminosa de ancho de banda con alta precisión habitual, puede contener aproximadamente 1.000 píxeles o más en una disposición lineal. En la actualidad, un tamaño de píxeles o sensores individuales está en el intervalo de 10 x 10 micras a 20 x 20 micras. El tamaño pequeño de estos píxeles individuales, sin embargo, plantea retos formidables para la alineación del haz de imagen para hacer realidad la alta resolución potencial de los SD-OCT.

El documento US 2009/0262359 se refiere a un aparato para la obtención de imágenes de objetos aplicando tomografía de dominio de frecuencia óptica y provisto de un sistema de ajuste para fijar una posición relativa de elementos fotosensibles (174) y una imagen (273) de espectro, el sistema de ajuste es un dispositivo controlado de manera automática que causa un desplazamiento relativo de por lo menos un elemento fotosensible (174) del dispositivo de detección (173) del espectro y la imagen (273) de espectro entre sí. El sistema de ajuste comprende por lo menos un actuador (14, 16) que actúa sobre el dispositivo de dispersión (171) y/o el conjunto de elementos ópticos (172) y/o el dispositivo de detección (173) y cuyo movimiento causa el desplazamiento relativo entre sí de por lo menos un elemento fotosensible (174) del dispositivo de detección (173) del espectro y la imagen (273) de espectro del haz (270) de luz resultante.

### Sumario

El espectrómetro de los dispositivos SD-OCT normalmente recibe la imagen o luz de interferencia desde una fibra óptica monomodal. El espectrómetro descompone espectralmente o dispersa esta luz de interferencia en sus componentes espectrales y transmite los componentes a sensores individuales de su detector. Los componentes detectados de la luz de imagen se someten a la transformada de Fourier y se analizan para construir la imagen del objetivo.

Tal como se describió anteriormente, detectores con matrices de sensores lineales presentan el potencial de obtener imágenes de manera eficaz y con alta velocidad. Para hacer realidad el potencial de estos detectores de matriz

- lineal, el elemento de descomposición espectral del espectrómetro proyecta el espectro descompuesto sobre la línea de píxeles que presenta una anchura de 10-20 micras. Esta especificación puede lograrse alineando los elementos ópticos del espectrómetro con una exactitud suficientemente alta. La exactitud especificada de la alineación angular es del orden de miliradianes, o mrad, que puede lograrse mediante el ajuste mecánico y la rotación de las mesas o elementos ópticos. La exactitud de la alineación lateral, por otro lado, puede requerir una precisión de un orden de magnitud superior, ya que las desalineaciones laterales se magnifican por la longitud del camino óptico entre el elemento de descomposición espectral y el detector.
- Para lograr estas alineaciones altamente precisas, los espectrómetros pueden utilizar elementos ópticos ajustables o móviles que pueden ajustarse bien durante el montaje para lograr la precisión requerida de la alineación lateral. Estos espectrómetros de elemento ajustable también ofrecen la posibilidad de ajustes correctivos durante su mantenimiento regularmente programado. Sin embargo, los elementos ajustables pueden desalinearse y desplazarse más fácilmente de sus alineaciones óptimas una vez que el espectrómetro esté en funcionamiento y por tanto pueden requerir a menudo asistencia técnica para la realización de pruebas y reajustes. En el caso importante en que se utilice el espectrómetro lejos de un entorno de alta tecnología, tal como en aplicaciones médicas, a menudo puede no haber asistencia técnica inmediatamente disponible para someter a prueba y reajustar la alineación del espectrómetro en intervalos de tiempo cortos o no programados, sin mencionar el excesivo tiempo de parada e inconveniencia de tal sistema de alto mantenimiento.
- Los diseños de espectrómetro que intentan evitar estos retos utilizando mesas fijas, no ajustables, por otro lado, se enfrentan al problema de la precisión inaceptablemente baja de sus alineaciones laterales tal como se describe a continuación en más detalle. Estos requisitos discrepantes plantean retos para optimizar el diseño de espectrómetros.
- Varias formas de realización de espectrómetros descritas en este documento de patente proporcionan de manera ventajosa una alineación mejorada con una matriz de sensores de modo que puede ofrecer soluciones para estos retos de diseño. En particular, varias formas de realización de espectrómetros proporcionan desviación de imagen ajustable y otros tipos de luz que pueden mejorar una alineación con la matriz de sensores.
- En algunas formas de realización, un espectrómetro puede incluir un elemento óptico espectralmente dispersivo configurado para dispersar espectralmente una luz recibida, un deflector ajustable de óptica transformada para desviar de manera ajustable la luz espectralmente dispersada, y una matriz de detectores para recibir la luz espectralmente dispersada y desviada de manera ajustable. La luz recibida puede incluir un haz de interferencia combinado a partir de un haz de imagen devuelto y un haz de referencia.
- En algunas implementaciones, el elemento óptico espectralmente dispersivo puede incluir un prisma, una rejilla, un elemento óptico con un índice de refracción dependiente de longitud de onda, un elemento óptico con una propiedad de transmisión dependiente de longitud de onda o un elemento óptico con una propiedad de desviación dependiente de longitud de onda. En algunas implementaciones, la matriz de detector puede incluir una matriz de sensor lineal, una matriz de sensor bidimensional o una cámara de detección.
- En algunas implementaciones, el deflector ajustable de óptica transformada puede incluir un elemento óptico con una propiedad de transmisión ajustable o una propiedad de reflexión ajustable, en el que el deflector ajustable se ajusta mediante un ajuste mecánico que se transforma ópticamente a un ajuste óptico inferior. En algunas implementaciones una relación de un ángulo del ajuste mecánico respecto a un ángulo del ajuste óptico puede superar 10, en otras, 100. En algunas implementaciones una relación del ángulo del ajuste mecánico respecto al ángulo del ajuste óptico es superior a 5 pero inferior a 100. El deflector ajustable incluye por lo menos una placa óptica en forma de cuña giratoria.
- En algunas implementaciones el espectrómetro es un espectrómetro de obtención de imágenes, que incluye un colimador, que convierte la luz recibida en una luz paralela, y una lente de enfoque, que enfoca y obtiene imágenes de la luz dispersada espectralmente sobre la matriz de detectores.
- En algunas implementaciones un primer intervalo de posición-haz-detector asociado un intervalo de ajuste de desviación del deflector supera un segundo intervalo de posición-haz-detector asociado a un intervalo de tolerancia de posición cumulativa de componentes del espectrómetro. En algunas implementaciones un primer intervalo de posición-haz-detector asociado a un intervalo de ajuste de desviación del deflector supera un intervalo de posición-haz-detector de funcionamiento del espectrómetro. En algunas implementaciones una desalineación de haz de funcionamiento causada por el deflector ajustable de óptica transformada es inferior a una tolerancia de desalineación del detector. En algunas implementaciones el deflector ajustable está configurado para compensar una desalineación lateral de la luz espectralmente dispersada sin introducir una desalineación angular superior a una relación de aspecto del detector.
- En algunas implementaciones el espectrómetro está configurado para permitir la compensación de una desalineación longitudinal a través de la recalibración de sus sensores utilizando una luz de longitud de onda conocida.

5 En algunas implementaciones un dispositivo de tomografía de coherencia óptica de dominio espectral (SD-OCT) puede incluir un aparato de descomposición espectral, configurado para recibir una luz de interferencia, y para crear una hoja de luz de interferencia mediante la separación lateral de componentes espectrales de la luz de interferencia, una matriz de sensores para detectar diferentes componentes espectrales de la hoja de luz de interferencia mediante diferentes sensores, y un controlador de alineación ajustable transformado para controlar una alineación de la hoja de luz con la matriz de sensores. El controlador de alineación puede incluir un prisma en forma de cuña giratoria.

10 En algunas implementaciones un espectrómetro puede incluir un dispersor espectral para dispersar lateralmente los componentes espectrales de una luz de imagen, una matriz de sensores para detectar los componentes espectrales de la luz de imagen, y un controlador de alineación de transformación óptica que puede compensar una desalineación de posición de haz cumulativa debida a la variación posicional de elementos del espectrómetro.

15 **Breve descripción de los dibujos**

La figura 1 ilustra el espectrómetro.

20 La figura 2A ilustra una luz espectralmente dispersada óptimamente alineada proyectada sobre la matriz de sensores lineal del espectrómetro.

La figura 2B ilustra un luz espectralmente dispersada con desalineaciones angular y lateral.

25 Las figuras 3A-C ilustran tres tipos básicos de desalineaciones.

Las figuras 4A-B ilustran dos formas de realización de espectrómetros con alineación controlada por deflector ajustable.

30 Las figuras 5A-B ilustran formas de realización particulares de un espectrómetro con alineación controlada por deflector ajustable.

La figura 6 ilustra la evolución del espectro lateralmente desalineado con la rotación de la cuña rotativa.

35 **Descripción detallada**

Las implementaciones y formas de realización en este documento de patente ofrecen mejoras para los requisitos conflictivos descritos anteriormente de alineación de alta precisión y estabilidad a largo plazo de espectrómetros.

40 Tal como se describió anteriormente, la alineación de alta precisión puede alcanzarse en espectrómetros mediante el montaje de elementos ópticos ajustables en mesas de alineación. Sin embargo, como estos elementos son ajustables, incluso en el transcurso del funcionamiento habitual del espectrómetro, estos elementos ajustables pueden comenzar a desplazarse, rotando y deformándose de su posición y ajustes originales, introduciendo desalineaciones. Estas desalineaciones son perjudiciales para la precisión del espectrómetro y minan la estabilidad a largo plazo del espectrómetro.

45 La estabilidad de los espectrómetros puede aumentarse uniendo o fijando mecánicamente los elementos ópticos en soportes fijos. La instalación de soportes fijos durante el ensamblaje del espectrómetro, por otro lado, limita la precisión de la alineación de los elementos ópticos. En un ejemplo representativo, si un elemento óptico se instala en un espectrómetro de manera manual por lo menos parcialmente, su posición puede controlarse con una precisión en la escala de cien micras. Como el espectrómetro contiene diversos elementos ópticos, la desalineación de posición de haz cumulativa o error de tolerancia puede alcanzar varios cientos de micras, posiblemente hasta 1.000 micras. Dado que la extensión física de los sensores individuales en la matriz de detectores es aproximadamente de 10 a 20 micras, la desalineación de cientos de micras causada por los errores del montaje de los elementos ópticos unidos puede reducir sustancialmente la eficacia del espectrómetro, posiblemente incluso perjudicando la funcionalidad del propio espectrómetro. Por tanto, la alta estabilidad a largo plazo de espectrómetros unidos es a costa de que surja un aumento del problema de desalineación durante el ensamblaje del espectrómetro.

60 La figura 1 ilustra los problemas anteriores en el ejemplo de un espectrómetro 10 típico. El espectrómetro 10 recibe una imagen o luz 11 de interferencia y puede transmitirla a través de un colimador o lente colimadora 13 que transforma la luz recibida en rayos paralelos. Los rayos colimados pueden alcanzar un elemento de dispersión espectral 15 que difunde lateralmente los componentes espectrales de los rayos y los redirige hacia una lente de enfoque 17 que a su vez obtiene imágenes de los mismos o los enfoca sobre un detector 19.

65 Los espectrómetros pueden clasificarse en categorías de obtención de imágenes y sin obtención de imágenes. Un espectrómetro de obtención de imágenes normalmente recibe la luz de una fuente de tipo punto y obtiene imágenes de la misma en un punto sobre su detector. Una fuente de tipo punto de este tipo puede ser la punta de una fibra

óptica. Un espectrómetro sin obtención de imágenes normalmente recibe la luz en forma de una hendidura y la transfiere como una línea a su detector.

5 En términos de nomenclatura, la expresión luz de imagen anterior puede referirse a la luz recibida por un espectrómetro o bien de obtención de imágenes o bien sin obtención de imágenes, ya que la luz se denomina luz de imagen para representar que porta información de imagen sobre el objetivo de la obtención de imágenes. Los principios de diseño descritos en la presente memoria pueden implementarse en espectrómetros tanto de obtención de imágenes como sin obtención de imágenes.

10 Las figuras 2A-B ilustran que los rayos dispersados espectralmente pueden formar una hoja de luz en la que los componentes espectrales de la luz se propagan de manera lateralmente dispersada. El espectro lateralmente dispersado contiene rayos con longitudes de onda de desde  $\lambda(\text{mín})$  hasta  $\lambda(\text{máx})$ , correspondiente al ancho de banda de la fuente luminosa. Esta hoja de luz puede proyectarse sobre una matriz de sensores. En el ejemplo mostrado, la matriz es una matriz de sensores lineal 19 que recoge datos de imagen para un intervalo de profundidad z de manera esencialmente simultánea en una ubicación xy objetivo y por tanto ofrece una buena velocidad de lectura y procesamiento.

15 La hoja de luz o el espectro lateralmente dispersado interseca el plano de la matriz de sensores lineal en una línea S con una anchura de difracción limitada. La figura 2A muestra un espectrómetro 10 bien alineado en el que el espectro lateralmente dispersado S (alineado) se alinea con la matriz de sensores lineal 19. La matriz de sensores lineal 19 puede incluir N sensores desde s1 hasta sN. En espectrómetros típicos, N puede ser aproximadamente de 1.000 o más. Los componentes espectrales de la luz se resolverán en  $M < N$  intervalos de longitud de onda pequeños, cuya anchura  $\Delta\lambda$  se determina, entre otros, por la anchura espacial de los sensores individuales. Las cantidades anteriores pueden relacionarse a través de la relación aproximada  $M\Delta\lambda \sim [\lambda(\text{máx}) - \lambda(\text{mín})]$ .

20 La figura 2B ilustra un espectrómetro desalineado típico, en el que el espectro lateralmente dispersado interseca el plano de la matriz de sensores lineal 19 en una línea S rotada o inclinada (desalineada). En este espectrómetro desalineado una parte de los sensores puede detectar el espectro lateralmente dispersado incidente, pero una parte considerable del espectro dispersado omite la matriz de sensores lineal completamente.

25 Algunas de las causas principales de la desalineación incluyen la precisión limitada del proceso de ensamblaje. A menudo, la instalación de los elementos ópticos implica etapas y manipulaciones manuales. Una desalineación de posición de haz en la matriz de sensores debida a la imprecisión o error de tolerancia de las etapas manuales de la instalación puede ser del orden de 100 micras. Los errores causados por los elementos ópticos individuales del espectrómetro pueden acumularse hasta un error acumulativo del orden de 1.000 micras.

30 Otra fuente potencial de la desalineación son las condiciones de funcionamiento cambiantes del espectrómetro. Los cambios de temperatura pueden causar un desplazamiento de la posición de los elementos ópticos. Esfuerzos mecánicos, cizalladura y torsión del alojamiento del dispositivo de obtención de imágenes completo también pueden causar una colocación errónea o rotación relativa de los elementos ópticos.

Las figuras 3A-C ilustran que existen por lo menos tres tipos de desalineación. La desalineación genérica de la figura 2B puede normalmente descomponerse en una superposición de estas tres desalineaciones.

35 La figura 3A ilustra una desalineación angular o rotacional, caracterizada por el ángulo de desalineación  $\alpha$  entre el espectro dispersado S y la línea de la matriz de sensores lineal.

40 Tales desalineaciones angulares pueden minimizarse o eliminarse si el espectro dispersado S se alinea con la matriz de sensores lineal de modo que incluso las longitudes de onda más externas  $\lambda(\text{mín})$  y  $\lambda(\text{máx})$  caigan en sensores de la matriz. En una matriz de sensores de aproximadamente 1.000 sensores o píxeles individuales, esto significa que  $\alpha$  es inferior a aproximadamente 1/500, o 2 miliradianes (mrad). Puede lograrse una precisión de 1 a 2 mrad de la alineación angular de los elementos ópticos aun cuando el espectrómetro se monte y manipule manualmente.

45 La figura 3B ilustra una desalineación longitudinal, caracterizada por que el espectro dispersado S presenta una buena alineación angular con la matriz de sensores lineal, pero las longitudes de onda de los componentes espectrales están desplazadas por una distancia de posición-haz-detector  $\Delta(\text{largo})$  a lo largo de la matriz de sensores lineal 19. En este caso, la expresión "posición-haz-detector" es una abreviatura de la posición del haz en el detector. Una desalineación longitudinal de este tipo puede estar causada por ejemplo por un elemento óptico instalado involuntariamente en una posición ligeramente desplazada. Este desplazamiento puede causar que un componente de longitud de onda o espectro específico  $\lambda(\text{espec})$  se dirija a un sensor a una distancia  $\Delta(\text{largo})$  más lejos a lo largo de la matriz lineal del sensor que se pretende nominalmente que detecte este componente de longitud de onda particular  $\lambda(\text{espec})$ .

50 Tales desalineaciones longitudinales también pueden minimizarse o eliminarse mediante por ejemplo las siguientes

etapas: (a) puede proyectarse una luz con una longitud de onda específica  $\lambda(\text{espec})$  bien conocida sobre el espectrómetro; (b) puede registrarse un índice/etiqueta/ubicación del sensor  $s(\text{espec-detección})$  que informa de la detección de la longitud de onda  $\lambda(\text{espec})$  bien conocida; (c) puede determinarse la distancia  $\Delta(\text{largo})$  entre el sensor  $s(\text{espec-detección})$  que realmente detecta la longitud de onda específica  $\lambda(\text{espec})$  y el sensor  $s(\text{espec-diseño})$  que se diseñó nominalmente para detectar esta longitud de onda  $\lambda(\text{espec})$ ; y (d) puede recalibrarse la tabla de correspondencia o de consulta entre las etiquetas/ubicaciones de los sensores individuales  $s(i)$  y la longitud de onda de los componentes espectrales detectados por estos según esta  $\Delta(\text{largo})$  medida a lo largo de la matriz de sensores 19 completa. En algunos casos pueden usarse lámparas espectrales u otras fuentes luminosas con espectros atómicos conocidos para este fin, incluyendo lámparas de mercurio, sodio o gas inerte.

La figura 3C ilustra un espectro dispersado S con una desalineación lateral, en el que el espectro dispersado S, o hoja de luz interseca el plano de la matriz de sensores lineal 19 a una distancia  $\Delta(\text{lat})$  de la matriz 19 de sensores. Debido a que la extensión lateral de la matriz lineal puede ser del orden de 10 micras, y una distancia típica que separa el elemento de dispersión espectral 15 y el detector 19 es del orden de 0,1 metros = 100.000 micras, el elemento de dispersión espectral 15 puede minimizar o eliminar la desalineación lateral  $\Delta(\text{lat})$  si se alinea con una precisión angular de 10 micras/100.000 micras = 0,1 mrad.

Esta precisión de 0,1 mrad es un orden de magnitud más estrecho que la precisión de 1 mrad que puede eliminar la desalineación angular tal como se mencionó anteriormente. Esta precisión de 0,1 mrad es normalmente inaccesible para espectrómetros cuyo montaje implica manipulaciones manuales.

Las figuras 4A-B ilustran varias formas de realización de un espectrómetro que puede proporcionar ventajosamente una alineación mejorada con una matriz de sensores.

La figura 4A ilustra una forma de realización de un espectrómetro 100 que incluye un elemento óptico espectralmente dispersivo 120, un deflector 140 ajustable de óptica transformada y una matriz de detectores o sensores 160.

El elemento óptico espectralmente dispersivo 120 puede configurarse para recibir una luz de imagen colimada y para dispersar espectralmente la luz de imagen recibida. La luz de imagen o haz de interferencia pueden recibirse desde un divisor de haz de un dispositivo de tomografía de coherencia óptica de dominio espectral (SD-OCT), combinado a partir de un haz de imagen devuelto y un haz de referencia.

Aunque se describen aplicaciones en conjunción con dispositivos SD-OCT en más detalle en este documento de patente, los espectrómetros 100 también pueden presentar un amplio campo de uso en otros sistemas ópticos. Asimismo, el espectrómetro puede ser del tipo o bien de obtención de imágenes o bien sin obtención de imágenes.

El elemento óptico espectralmente dispersivo 120 puede incluir un prisma, una rejilla, un elemento óptico con un índice de refracción dependiente de longitud de onda, un elemento óptico con una propiedad de transmisión dependiente de longitud de onda o un elemento óptico con una propiedad de desviación dependiente de longitud de onda.

La matriz de detectores o sensores 160 puede configurarse para recibir la luz espectralmente dispersada y desviada de manera ajustable. La matriz de sensores 160 puede incluir píxeles, detectores de carga acoplada (CCDs), o una matriz de cualquier otro tipo de sensores que generen una señal eléctrica basada en luz detectada. El detector 160 también puede incluir una matriz de sensores bidimensional y una cámara de detección.

Todos los elementos ópticos del espectrómetro 100, incluyendo la matriz de sensores 160, pueden unirse o bloquearse en mesas permanentemente no movibles. Tales diseños unidos garantizan la buena estabilidad a largo plazo del espectrómetro y su rendimiento. Sin embargo, tal como se describió anteriormente, en espectrómetros de elementos unidos puede ser un reto guiar el espectro S sobre y alinear el espectro S con la matriz de sensores lineal 160, ya que las variaciones mecánicas de los soportes, de las uniones y de los procedimientos de bloqueo/fijación, introducidas por las inexactitudes del proceso de ensamblaje, pueden mover la posición de haz en el detector en exceso con respecto a la altura o anchura de los píxeles de la matriz de sensores lineal 160. Tal como se describió anteriormente, el haz puede de hecho moverse o decalarse por varios múltiplos de la anchura de píxel, llevando a retos sustanciales para el ensamblaje y calibración. El error acumulativo y la desalineación lateral resultante  $\Delta(\text{lat})$ , que se acumula de las variaciones de los elementos ópticos individuales pueden sumar hasta cientos de micras, mientras que la anchura de los píxeles individuales es normalmente de sólo 10 a 20 micras, subrayando de nuevo los retos de la alineación lateral del espectrómetro 100.

La figura 4A ilustra que en el espectrómetro 100 este reto de diseño puede solucionarse incluyendo el deflector 140 ajustable de óptica transformada que puede configurarse para desviar de manera ajustable la luz espectralmente dispersada.

Los aspectos de un deflector ajustable de óptica transformada incluyen que (a) los ajustes mecánicos son

transformados, y (b) la transformación es óptica en lugar de mecánica.

(a) En el presente contexto la transformación fuera del alcance de la presente invención puede referirse a que el deflector traduce o reduce un ajuste mecánico a un ajuste mucho más pequeño de un ángulo de desviación del haz. Por ejemplo, el giro de un tornillo de ajuste mecánico sobre el soporte del deflector en 360 grados puede traducirse o reducirse a un movimiento mecánico pequeño de una mesa mecánica intermedia, tal como un giro de pocos grados de una plataforma de giro lento a través de altas relaciones de engranaje u otros medios. Esta mesa mecánica intermedia puede entonces traducir el movimiento mecánico reducido en un movimiento óptico comparable por ejemplo girando un espejo con los mismos pocos grados para cambiar el ángulo de desviación del haz desviado en consecuencia.

Estos sistemas transforman o reducen los ajustes mecánicamente, traduciendo un movimiento mecánico más grande de la mesa de ajuste en un movimiento mecánico más pequeño de la mesa mecánica intermedia, y traduciendo entonces el movimiento mecánico pequeño de la mesa mecánica intermedia en un ajuste óptico comparativamente pequeño.

Sin embargo, sistemas de reducción mecánica que usan una mesa mecánica intermedia pueden enfrentarse a los retos de la estabilidad a largo plazo, ya que los tornillos, engranajes o brazos de palanca de reducción puede que no resistan bien el desplazamiento y la desalineación y pueden ser la fuente de un tipo nuevo o adicional de desalineaciones.

(b) Según la invención, el deflector 140 ajustable de óptica transformada del espectrómetro 100 puede traducir ajustes mecánicos grandes en ajustes ópticos pequeños sin utilizar una mesa mecánica intermedia de reducción/transformación. Eludir la utilización de una mesa de transformación mecánica intermedia puede evitar el problema del desplazamiento y la desalineación, dotando al espectrómetro de estabilidad de funcionamiento a largo plazo y alineación robusta.

La relación del ángulo de un ajuste mecánico a un cambio causado ópticamente del ángulo de desviación de haz puede ser de 10 o más. En otras formas de realización, 100 o más, y en todavía otras formas de realización 1.000 o más.

En algunas implementaciones, la estabilidad a largo plazo puede optimizarse limitando la relación de los ajustes mecánicos a los ajustes ópticos para que no supere 1.000, en otras 100 y en todavía otras, 10.

El deflector 140 ajustable de óptica transformada puede incluir un elemento óptico con una propiedad de transmisión ajustable y un elemento óptico con una propiedad de reflexión ajustable.

La figura 4B ilustra otra implementación de un espectrómetro 200. El espectrómetro 200 incluye un dispersor 220 espectral que incluye un elemento de descomposición de espectro 230 y un controlador de alineación 240 de óptica transformada. El dispersor 220 espectral guía el espectro dispersado a una matriz de detectores o sensores 260. El elemento de descomposición de espectro 230 puede ser análogo al elemento espectralmente dispersivo 120, el controlador de alineación 240 puede ser análogo al detector 140 ajustable, y la matriz de sensores/detectores 260 puede ser análoga a la matriz de sensores 160.

La figura 4B ilustra que el elemento de descomposición de espectro 230 y el controlador de alineación 240 pueden formar conjuntamente un dispersor 220 espectral integrado. Por ejemplo, el controlador de alineación 240 puede implementarse entre elementos ópticos del dispersor 220 espectral.

La figura 5A ilustra una forma de realización específica de los espectrómetros de las figuras 4A-B. El espectrómetro de la figura 5A puede ser un espectrómetro de obtención de imágenes, que incluye el colimador 13, que convierte la luz de imagen en una luz colimada, y la lente de enfoque 17, que enfoca y obtiene imágenes de la luz espectralmente dispersada sobre la matriz de sensores/detectores 160.

El deflector 140 ajustable de óptica transformada en esta implementación incluye una cuña o prisma 142 giratoria. El prisma de cuña giratoria 142 puede variar o ajustar una ubicación del espectro S en relación con la matriz de sensores lineal 160 y compensar o controlar la desalineación lateral  $\Delta$  (lat), generada por el error de tolerancia o variación de la instalación de los elementos ópticos o sus condiciones de funcionamiento cambiantes.

La cuña, o prisma de cuña, giratoria con un ángulo de cuña/inclinación pequeño es un mecanismo de transformación o reducción que no utiliza una mesa mecánica de reducción intermedia, sino que en su lugar convierte un gran ajuste mecánico directamente en un ajuste óptico pequeño. Por ejemplo, una gran rotación mecánica de 360 grados del prisma de cuña giratoria 142 puede desviar el haz transmitido en 1 grado o menos en función del ángulo de cuña, sin emplear una mesa de transformación de reducción mecánica intermedia.

La figura 5B ilustra que en algunas implementaciones la cuña o prisma de cuña giratoria puede insertarse en varios segmentos del camino óptico, tal como entre el colimador 13 y el elemento de dispersión espectral 120 como una

cuña 142-1 según un ejemplo fuera del alcance de la invención; o entre el elemento de dispersión espectral 120 y la lente de enfoque 17 como una cuña 142-2; o entre la lente de enfoque 17 y el detector 160, como una cuña 142-3. En otras implementaciones pueden insertarse cualquiera de las dos o incluso las tres cuñas 142-1, 142-2, y 142-3 giratorias. Estas formas de realización en las que la cuña giratoria se posiciona entre elementos del dispersor 220 espectral, pueden verse como implementaciones del espectrómetro 200 de la figura 4B. La libertad de posicionamiento de la cuña giratoria 142 en segmentos diferentes del camino óptico permite una optimización del diseño para cumplir con la extensión deseada de la traslación lineal del espectro.

La figura 6 ilustra que una rotación del prisma de cuña 142 puede dar como resultado un movimiento circular del espectro lateralmente dispersado S. El análisis de la óptica muestra que los puntos de extremo aproximados del espectro S, que corresponden a la longitud de onda mínima  $\lambda(\text{mín})$  y la longitud de onda máxima  $\lambda(\text{máx})$ , se mueven alrededor de círculos señalados como C(mín) y C(máx). Las dos posiciones laterales de extremo de los espectros S1 y S2, y en consecuencia los círculos C(mín) y C(máx) pueden ser asimétricos en relación con la matriz de sensores lineal 160.

Un primer intervalo de posición-haz-detector  $\Delta(\text{lat-deflector})$  indica la extensión o el intervalo máximo de la desalineación lateral, causada y controlada por el prisma de cuña giratoria 142 y en general por el controlador ajustable 140 o 240. En algunas implementaciones típicas, este primer intervalo de posición-haz-detector  $\Delta(\text{lat-deflector})$  puede superar un segundo intervalo de posición-haz-detector  $\Delta(\text{lat-cumulativo})$ , un intervalo lateral barrido por la posición de haz en el plano del detector 160 asociado a un intervalo de tolerancia de posición acumulativo de componentes del espectrómetro 100 o 200.

Tal como se discutió anteriormente,  $\Delta(\text{lat-cumulativo})$  puede tener por lo menos dos orígenes. Uno de los orígenes puede ser la variación, o error de tolerancia, de las posiciones de los elementos del espectrómetro individuales que surgen durante el proceso de montaje que incluye manipulaciones manuales. Otro origen pueden ser los parámetros de funcionamiento cambiantes, tales como la temperatura de funcionamiento del espectrómetro, o deformaciones mecánicas y desgaste y rotura.

Visiblemente, mediante la rotación de la cuña giratoria 142 de la figura 5A, o en general, mediante el ajuste del deflector 140 ajustable de las figuras 4A-B, es posible ajustar el deflector 140 para compensar la desalineación acumulativa causada por las variaciones o error de tolerancia del montaje de los elementos ópticos y trasladar el espectro S de vuelta sobre la matriz de sensores lineal 160, siempre que  $\Delta(\text{lat-deflector})$  sea superior a  $\Delta(\text{lat-cumulativo})$ .

Del mismo modo, si  $\Delta(\text{lat-deflector})$  es superior a  $\Delta(\text{lat-funcionamiento})$ , en el que  $\Delta(\text{lat-funcionamiento})$  representa un intervalo de posición-haz-detector de funcionamiento, es decir el intervalo de desalineaciones laterales provocado por parámetros de funcionamiento cambiantes del espectrómetro 100-200, entonces un ajuste del deflector 140 ajustable puede compensar las desalineaciones generadas por estos parámetros de funcionamiento cambiantes. Ejemplos de tales parámetros de funcionamiento cambiantes incluyen temperaturas de funcionamiento cambiantes, posición desplazada de elementos ópticos debido al desgaste y rotura regulares del espectrómetro asociado a utilización extensa, y un cambio en el entorno de funcionamiento por ejemplo en el transcurso de reposicionamiento, movimiento o incluso reinstalación del espectrómetro.

Otra ventaja de emplear el deflector 140 ajustable de transformación óptica es que los espectrómetros 100-200 permanecen alineados de manera fiable y en posición a largo plazo porque la alineación óptica del prisma de cuña delgado 142 con un ángulo de cuña pequeño no es sensible a una traslación o una inclinación de la cuña 142. Cuando el prisma de cuña 142 se coloca en el camino del haz de manera sustancialmente perpendicular a la propagación de haz óptico, sólo la rotación o alineación angular de la cuña 142 alrededor del eje óptico afecta a la posición del espectro S en relación con la matriz de sensores lineal 142. Los parámetros del deflector 140 ajustable pueden seleccionarse de modo que proporcione control de alineación angular con un intervalo de 0,1 mrad. Con un diseño tal, el deflector 140 ajustable puede guiar el espectro lateralmente dispersado S sobre la matriz de sensores lineal 160, mientras que al mismo tiempo incluso desalineaciones angulares superiores del deflector 140 no afectarán de manera negativa a la alineación angular ya que la alineación angular presenta una tolerancia del orden de 1 mrad. Por tanto, el montaje del prisma de cuña en una mesa variable, tal como un bastidor giratorio y fijándola una vez optimizada la alineación lateral, permite un ajuste preciso del espectrómetro 100-200 sin minar o sacrificar la estabilidad a largo plazo del espectrómetro 100-200.

En algunas implementaciones de los espectrómetros 100 y 200 también puede minimizarse la distorsión óptica del diseño mediante la aplicación de la implementación del prisma de cuña 142 con un ángulo de cuña pequeño y un espesor pequeño.

En algunas implementaciones de los espectrómetros 100 y 200 una desalineación de haz de funcionamiento causada por el deflector 140 ajustable puede ser inferior a una tolerancia de desalineación del detector 160.

En algunas implementaciones de los espectrómetros 100 y 200 el deflector ajustable puede configurarse para

compensar una desalineación lateral de la luz espectralmente dispersada sin introducir una desalineación angular superior a una relación de aspecto del detector.

**REIVINDICACIONES**

1. Espectrómetro (100), que comprende:

- 5 un elemento óptico espectralmente dispersivo (120) configurado para dispersar espectralmente una luz recibida;  
un deflector (140) ajustable para recibir el haz de luz espectralmente dispersado y para desviar de manera ajustable el haz de luz espectralmente dispersado; y  
10 una matriz (160) de detectores para recibir el haz de luz espectralmente dispersado y desviado de manera ajustable,

en el que el deflector (140) ajustable puede ajustarse mecánicamente y comprende por lo menos una placa óptica en forma de cuña giratoria configurada para convertir un gran ajuste mecánico directamente en un pequeño ajuste óptico del ángulo de desviación del haz de luz para compensar o controlar la desalineación lateral del espectro dispersado en relación con la matriz de detectores; y

en el que un ángulo de una rotación de un ajuste mecánico se transforma en un ángulo de ajuste óptico del ángulo de desviación del haz de luz por lo menos 10 veces inferior.

2. Espectrómetro (100) según la reivindicación 1, en el que:

la luz recibida comprende un haz de interferencia combinada a partir de un haz de imagen devuelto y un haz de referencia.

3. Espectrómetro (100) según la reivindicación 1, comprendiendo el elemento óptico espectralmente dispersivo (120) por lo menos uno de entre:

un prisma, una rejilla, un elemento óptico con un índice de refracción dependiente de longitud de onda, un elemento óptico con una propiedad de transmisión dependiente de longitud de onda y un elemento óptico con una propiedad de desviación dependiente de longitud de onda.

4. Espectrómetro (100) según la reivindicación 1, comprendiendo la matriz (160) de detectores por lo menos una de entre:

una matriz de sensores lineal, una matriz de sensores bidimensional y una cámara de detección.

5. Espectrómetro (100) según la reivindicación 1, comprendiendo el deflector (140) ajustable:

un elemento óptico con por lo menos una de una propiedad transmisiva ajustable y una propiedad de reflexión ajustable.

6. Espectrómetro (100) según la reivindicación 1, en el que:

una relación del ángulo del ajuste mecánico respecto al ángulo del ajuste óptico supera 100.

7. Espectrómetro (100) según la reivindicación 1, en el que:

una relación del ángulo del ajuste mecánico respecto al ángulo del ajuste óptico es inferior a 100.

8. Espectrómetro (100) según la reivindicación 1, en el que:

el espectrómetro es un espectrómetro de obtención de imágenes, que comprende

un colimador, que convierte la luz recibida en una luz paralela; y

una lente de enfoque, que enfoca y obtiene imágenes de la luz espectralmente dispersada sobre la matriz de detectores.

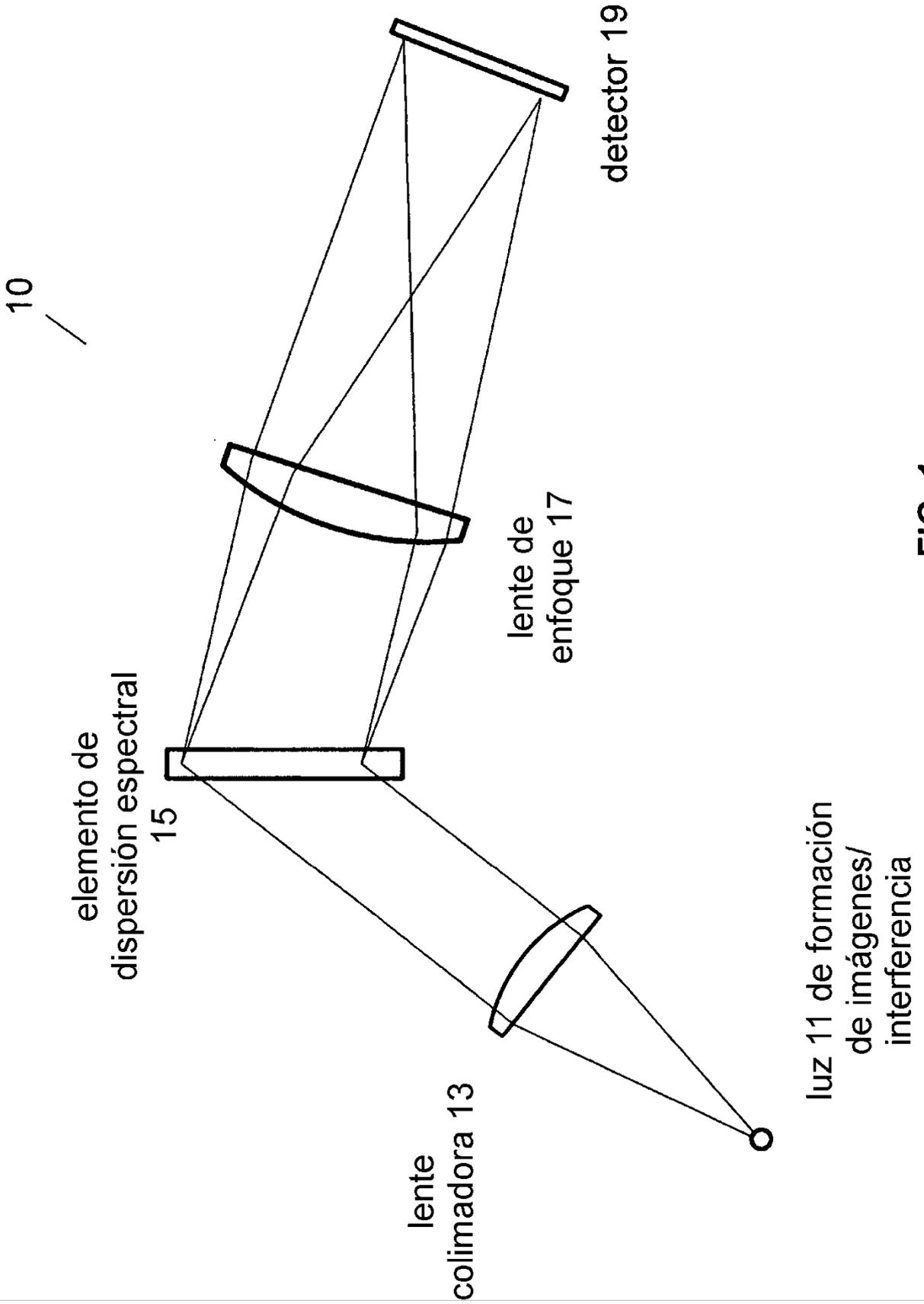
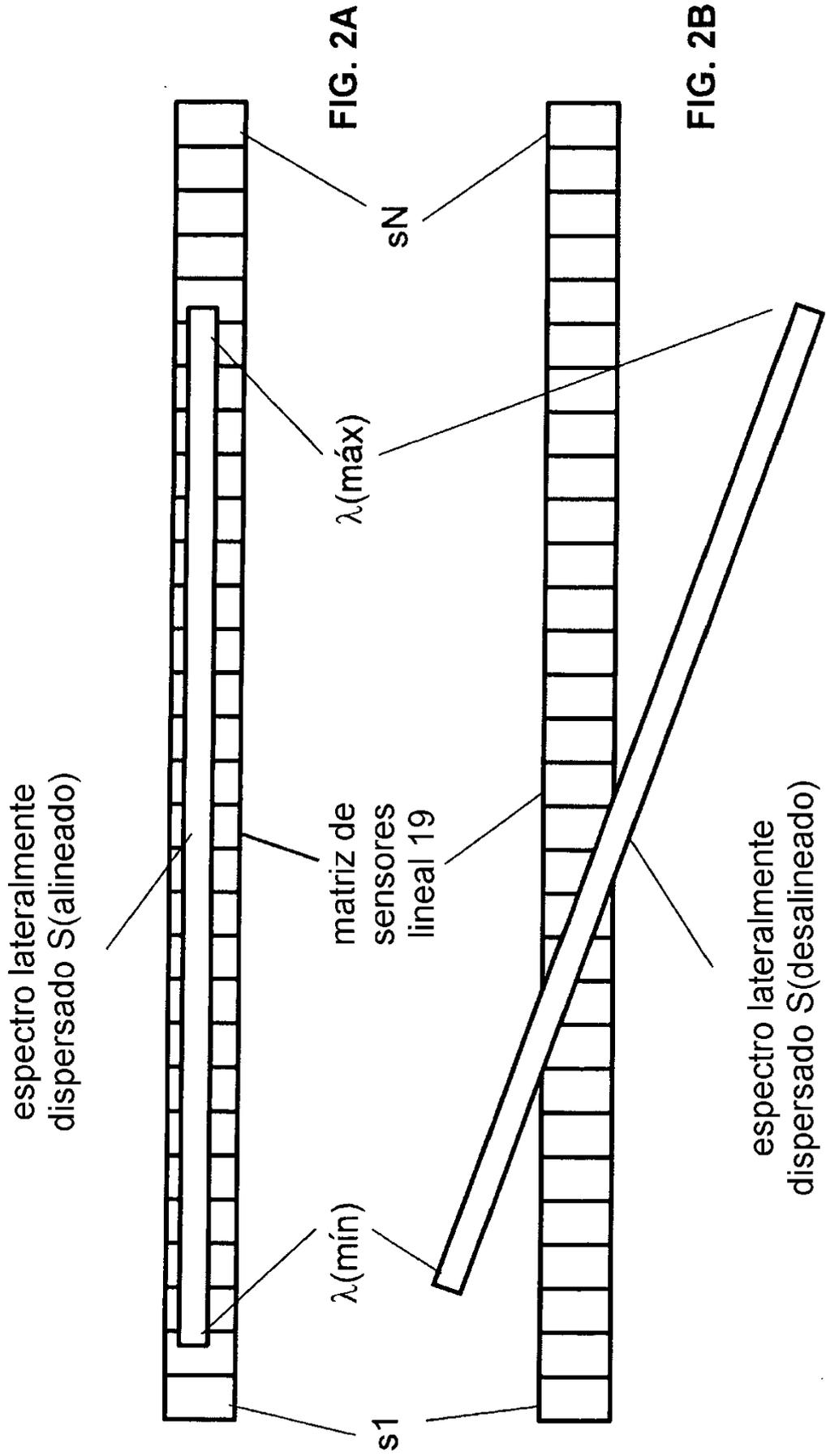
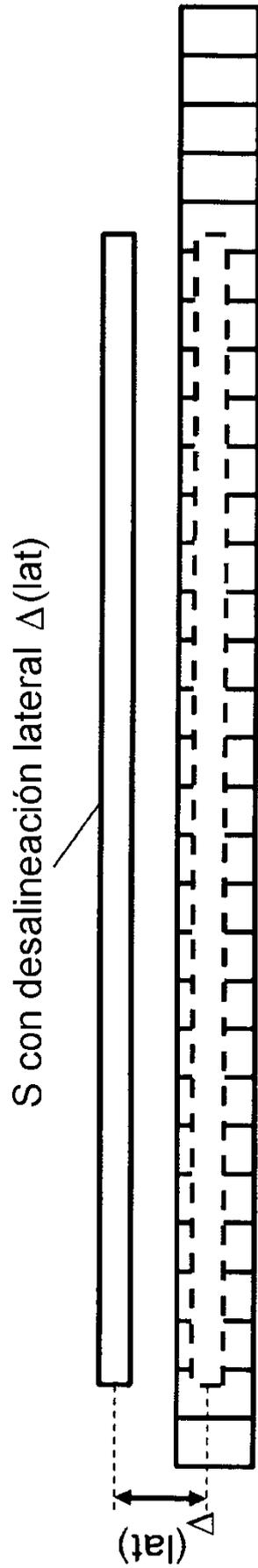
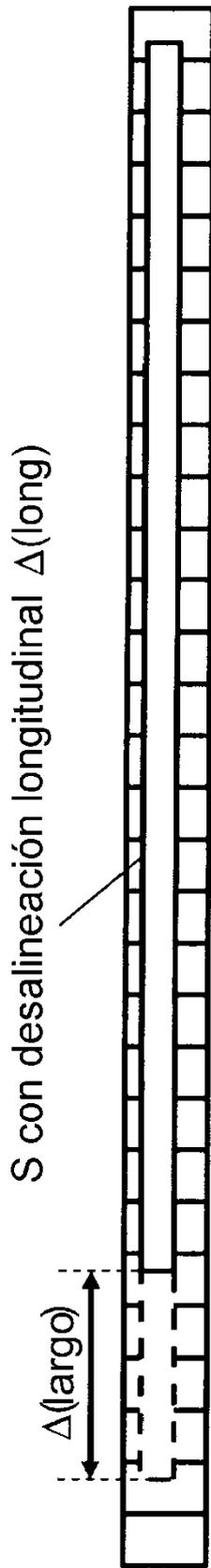
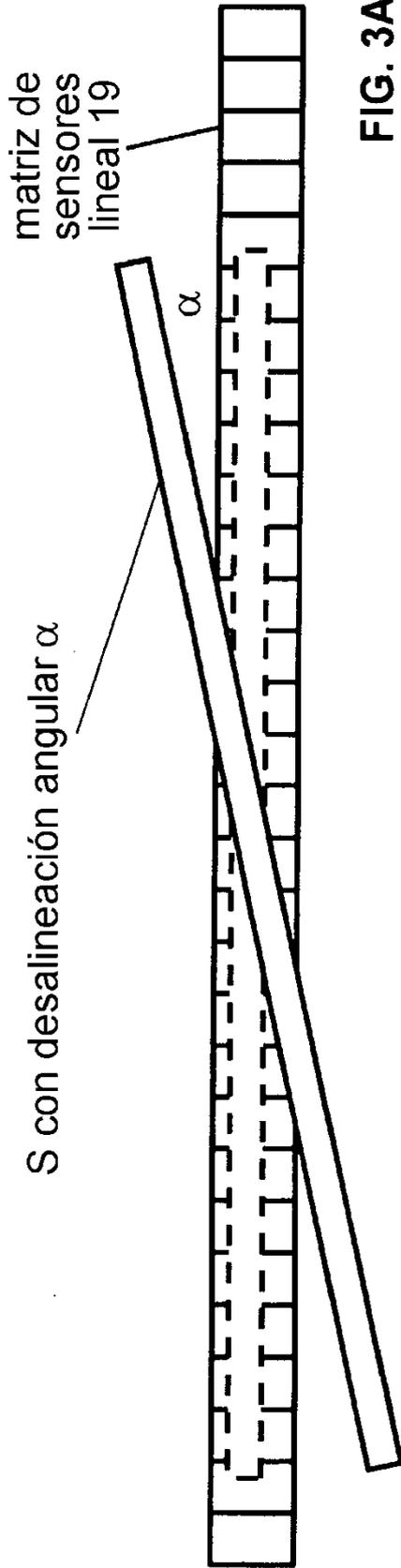


FIG. 1





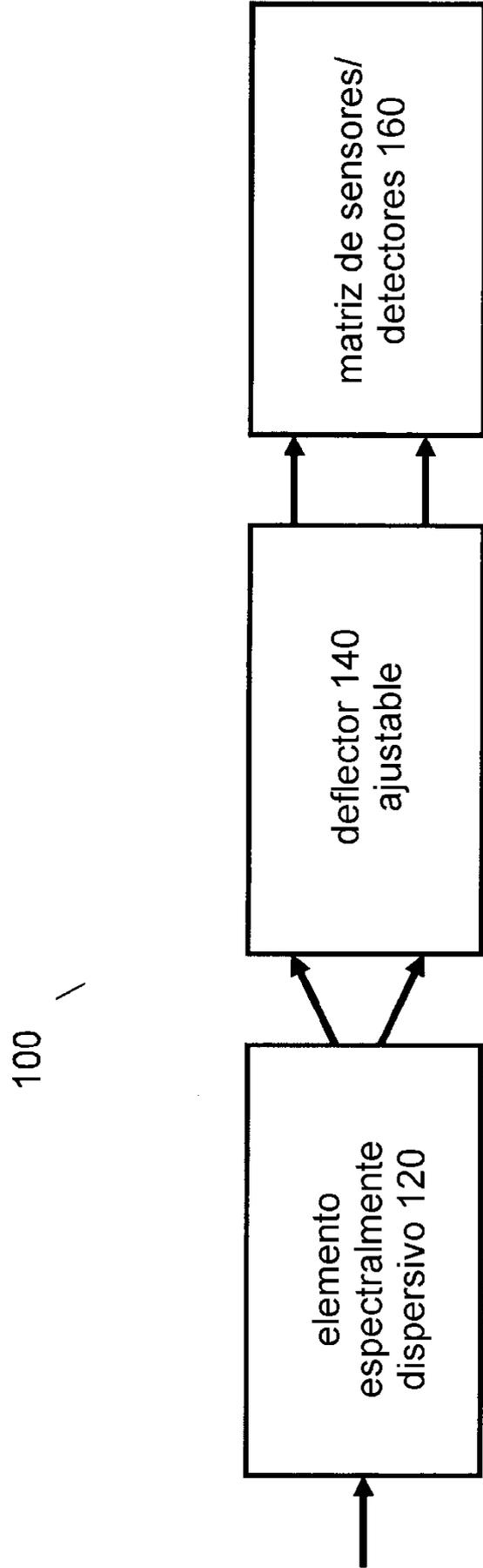


FIG. 4A

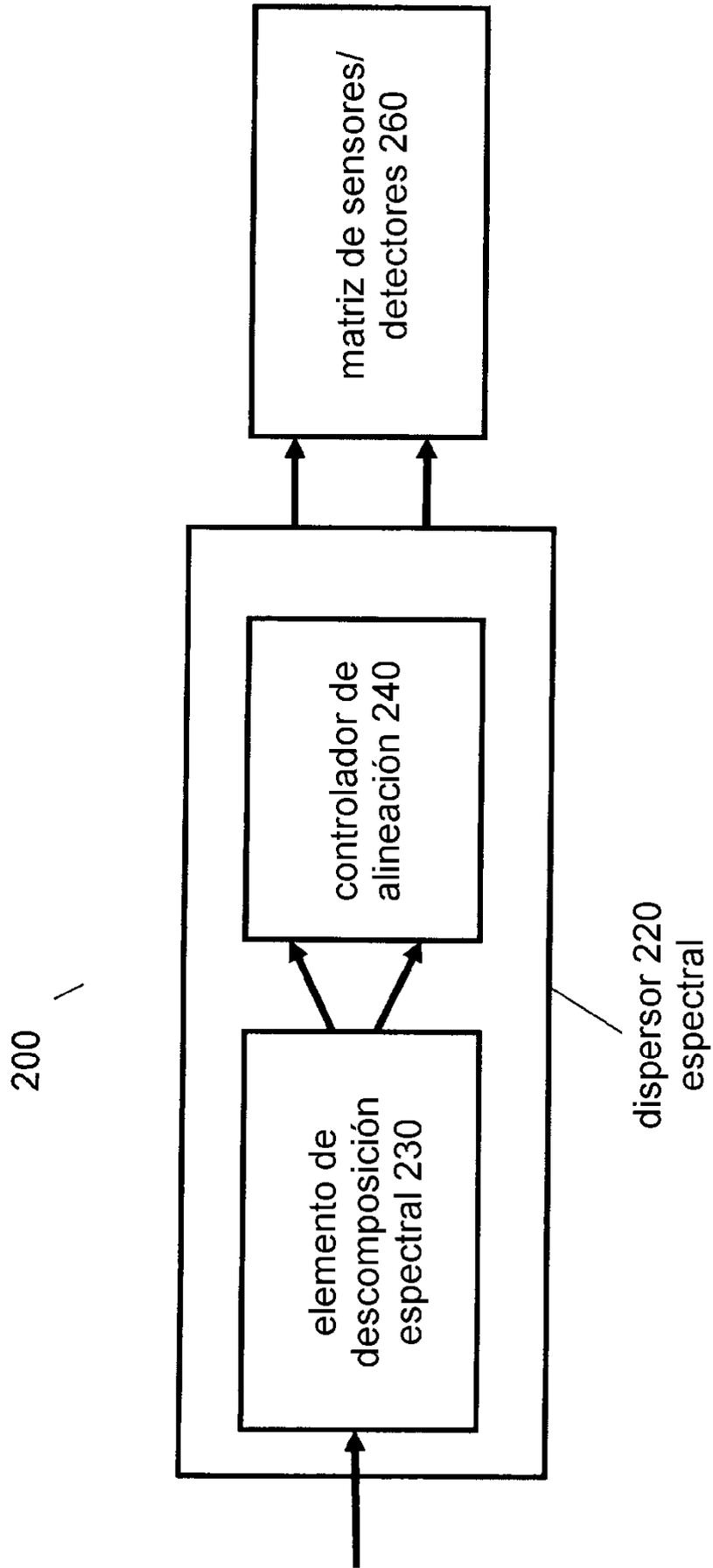


FIG. 4B

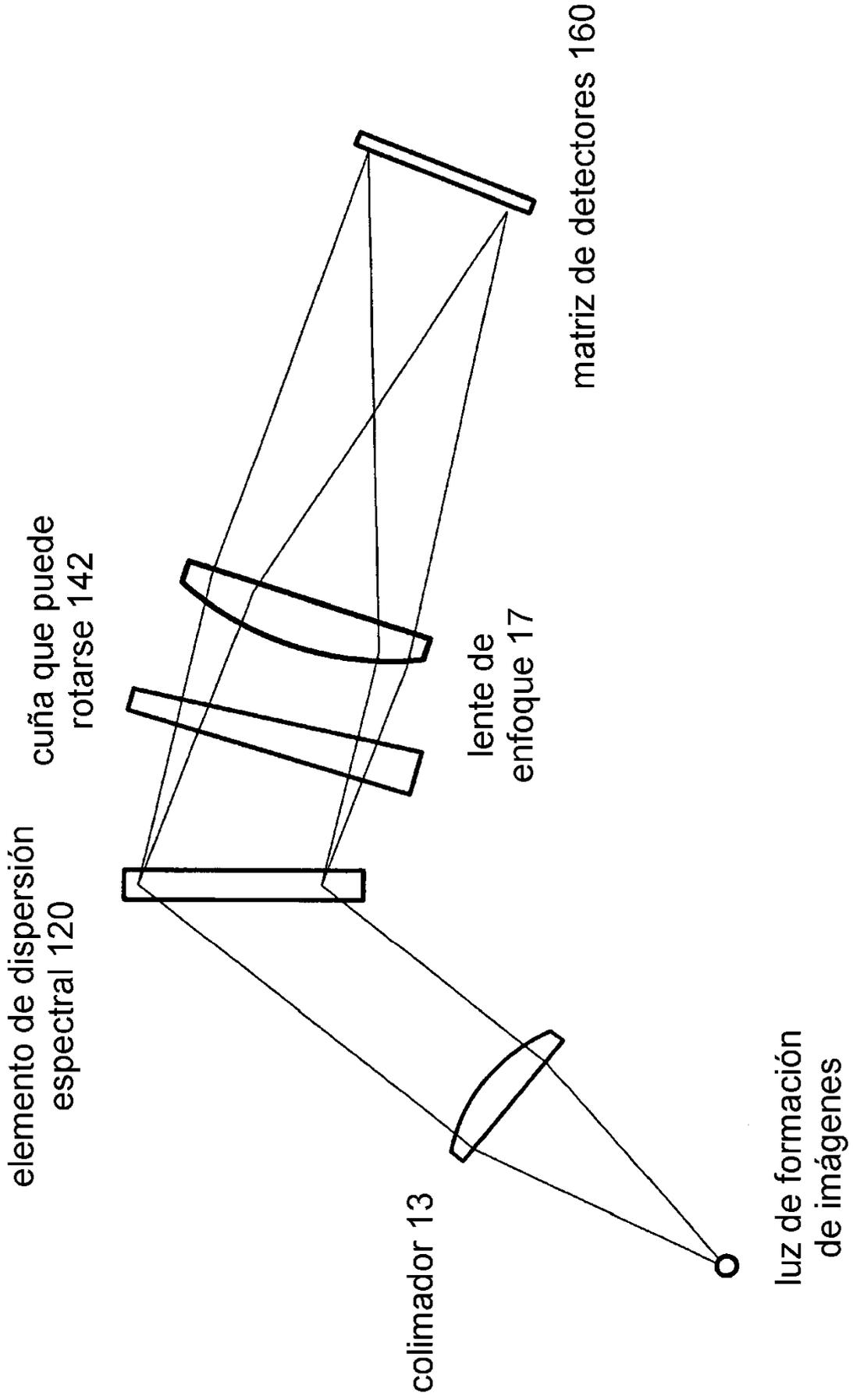


FIG. 5A

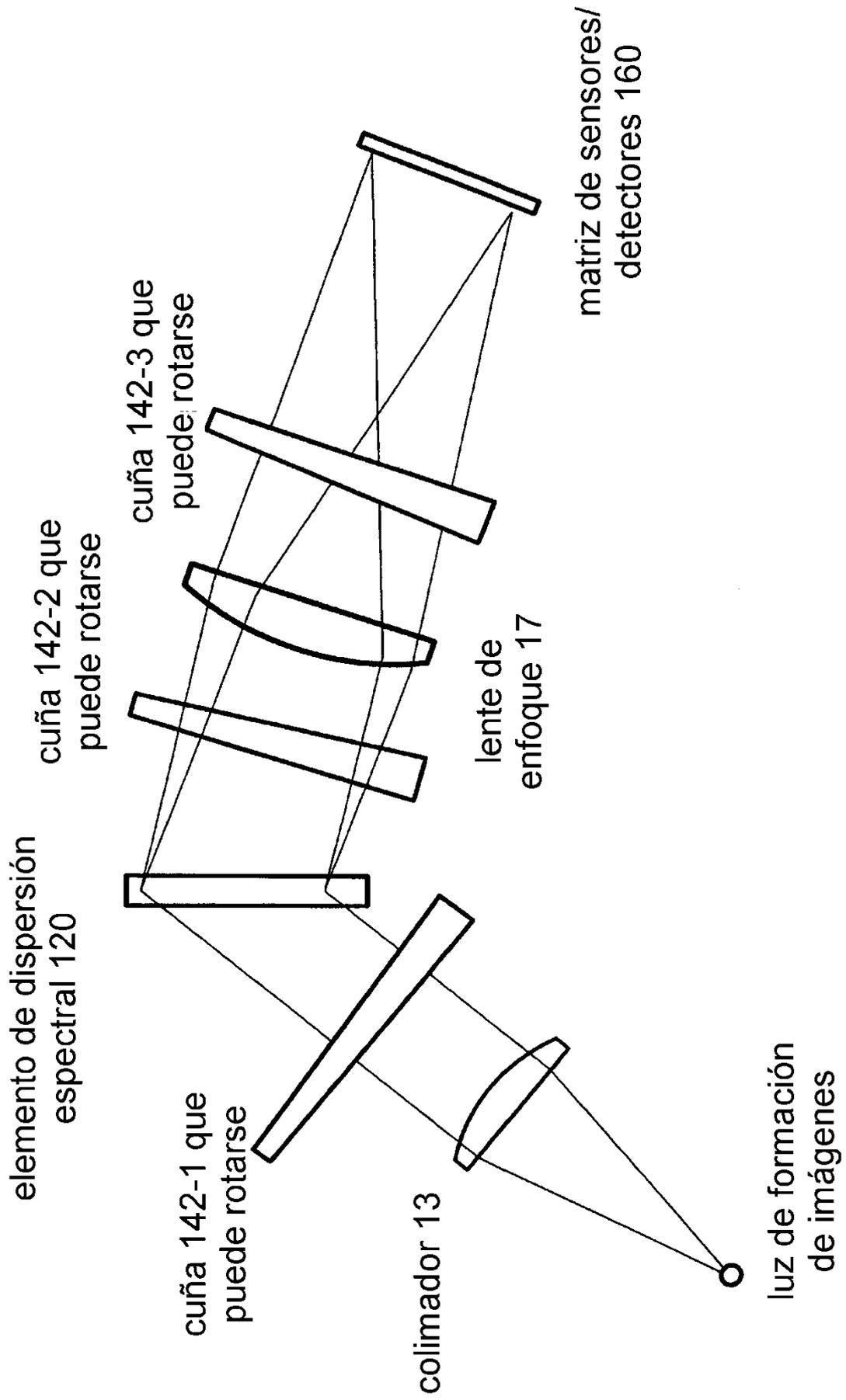


FIG. 5B

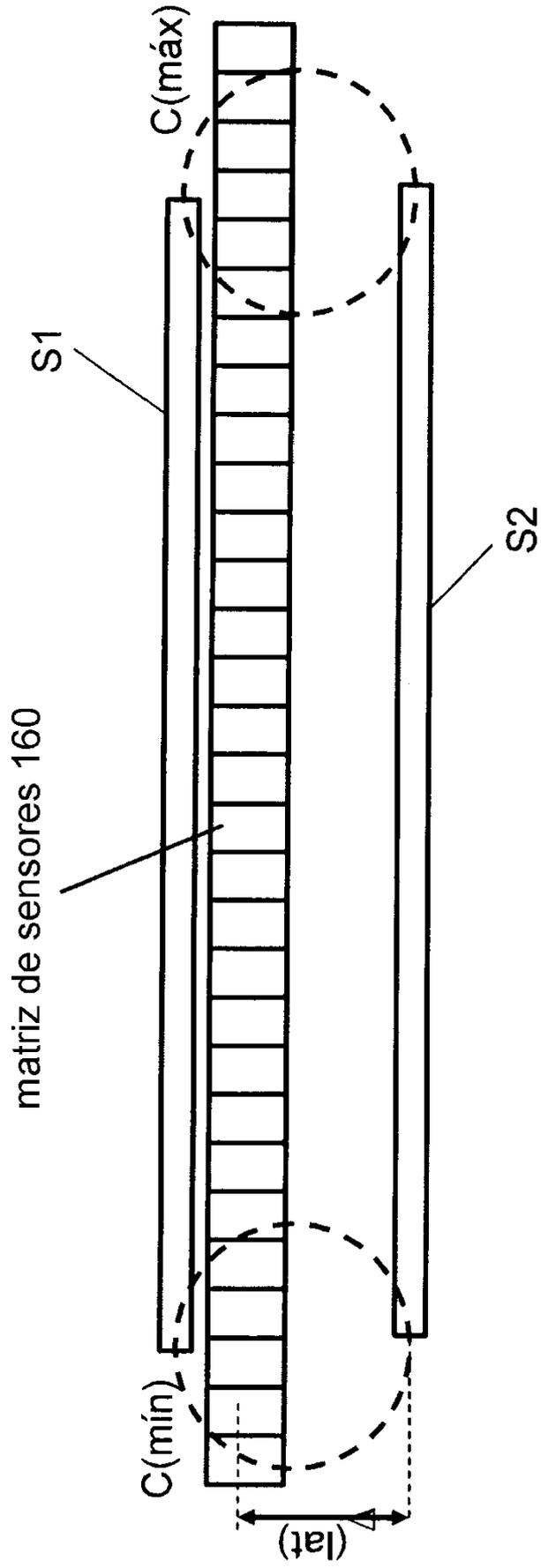


FIG. 6