



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 310 744**

51 Int. Cl.:  
**G01J 3/18** (2006.01)  
**H01S 3/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04754611 .4**  
96 Fecha de presentación : **04.06.2004**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1639330**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **29.03.2006**

54 Título: **Fuente de luz sintonizable en longitudes de onda.**

30 Prioridad: **06.06.2003 US 476600 P**  
**27.10.2003 US 514769 P**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**16.01.2009**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**16.01.2009**

73 Titular/es:  
**THE GENERAL HOSPITAL CORPORATION**  
**55 Fruit Street**  
**Boston, Massachusetts 02114, US**

72 Inventor/es: **Bouma, Brett, E.;**  
**Yun, Seok-Hyun;**  
**Oh, William;**  
**Deboer, Johannes y**  
**Tearney, Guillermo**

74 Agente: **Elzaburu Márquez, Alberto**

ES 2 310 744 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**

Fuente de luz sintonizable en longitudes de onda.

**5 Referencia cruzada a solicitudes relacionadas**

Esta Solicitud reivindica la prioridad de la Solicitud de Patente norteamericana de Serie Nº 60/476.600, depositada el 6 de junio de 2003, de la que se incorpora aquí la descripción completa como referencia.

**10 Campo de la invención**

La presente invención se refiere generalmente a sistemas ópticos y, más particularmente, a una disposición de fuente que comprende un sistema óptico de filtro de longitud de onda para la sintonización en longitud de onda.

**15 Antecedentes de la invención**

Se ha dedicado un considerable esfuerzo para el desarrollo de fuentes de láser de longitud de onda susceptibles de sintonizarse o sintonizables de una forma rápida y amplia para la reflectometría óptica, la obtención biomédica de imágenes, la interrogación de sensores, y los ensayos y mediciones. Se han obtenido una anchura de línea estrecha, un amplio intervalo y una sintonización rápida mediante el uso de un filtro de barrido o exploración en longitud de onda de banda estrecha e interior a la cavidad o intra-cavidad. Se ha demostrado un funcionamiento carente de saltos de modo, en una única frecuencia, en un láser de semiconductor de cavidad extendida, mediante el uso de un diseño de filtro de rejilla de difracción. Para la obtención de un funcionamiento del láser en una única frecuencia y la garantía de una sintonización sin saltos de modo, sin embargo, se puede utilizar un complicado aparato mecánico y se ve limitada la velocidad máxima de sintonización. Una de las velocidades más rápidas de sintonización demostrada hasta ahora ha sido limitada en menos de 100 nm/s. En ciertas aplicaciones tales como la obtención de imágenes biomédicas, el funcionamiento en modo longitudinal múltiple, correspondiente a una anchura de línea instantánea tan grande o mayor que 10 GHz, puede ser suficiente. Semejante anchura puede proporcionar una profundidad de alcance de unos pocos milímetros en los tejidos en la tomografía de coherencia óptica, y una resolución transversal del orden de los micrómetros en la microscopia confocal o de focos coincidentes codificada espectralmente.

Una anchura de línea del orden de 10 GHz es fácilmente alcanzable con el uso un elemento de sintonización interior a la cavidad o intra-cavidad (tal como un filtro acústico-óptico, un filtro de Fabry-Perot y un filtro de rejilla de difracción accionada por un galvanómetro). Sin embargo, la frecuencia de barrido previamente probada ha sido menor que 1 kHz, al estar limitada por las velocidades de sintonización finitas de los filtros. La sintonización de alta velocidad con una velocidad o cadencia de repetición mayor que 15 kHz puede ser necesaria para la velocidad de transmisión de vídeo (mayor que 30 tramas/s) de la formación de imágenes ópticas de alta resolución en aplicaciones biomédicas.

De acuerdo con ello, existe la necesidad de superar las deficiencias anteriormente mencionadas.

**40 Sumario de la invención**

La invención proporciona una disposición de fuente para proporcionar una radiación electromagnética, según se reivindica en la reivindicación 1.

De acuerdo con los conceptos proporcionados a modo de ejemplo de la presente invención, la fuente comprende un filtro de longitud de onda óptico que puede ser sintonizado con una velocidad o cadencia de repetición mayor que 15 kHz a lo largo de un amplio intervalo espectral. Puede proporcionarse, además, una fuente de sintonización en longitud de onda que comprende dicho filtro óptico en combinación con un medio de ganancia de láser. La fuente de sintonización puede resultar útil en aplicaciones de formación de imágenes ópticas con velocidad de vídeo, tales como la tomografía de coherencia óptica y la microscopia confocal o de focos coincidentes codificada espectralmente.

En general, el filtro óptico de acuerdo con una realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, puede incluir una rejilla de difracción, un escáner poligonal rotativo y un telescopio. Semejante filtro óptico puede hacerse funcionar a una velocidad de sintonización de más de un orden de magnitud por encima de la de los filtros convencionales. La fuente de luz sintonizable en longitud de onda puede ser implementada mediante el empleo del filtro, por ejemplo, en combinación con un medio de ganancia de láser. El filtro y el medio de ganancia pueden ser incorporados, de forma adicional, al interior de una cavidad de láser. Por ejemplo, un láser puede emitir un espectro de banda estrecha en el que su longitud de onda central se hace barrer en un intervalo de longitudes de onda amplio a una alta velocidad de repetición elevada.

En una realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, se proporciona una disposición de fuente para emitir una radiación electromagnética, que tiene un espectro cuya frecuencia media cambia sustancialmente de forma continua a lo largo del tiempo. Dicha radiación puede estar asociada con una velocidad de sintonización que es mayor que 100 terahercios por milisegundo. La frecuencia media puede cambiar de forma repetitiva, a una velocidad de repetición que es mayor que 5 kilohercios, o a lo largo de un intervalo mayor que 10 terahercios. El espectro puede presentar un intervalo de sintonización que cubre una porción de las longitudes de onda visibles, infrarrojas cercanas o infrarrojas. Espectros a modo de ejemplo pueden estar centrados en longitudes de onda de aproximadamente

## ES 2 310 744 T3

850 nm, 1.300 nm ó 1.700 nm. Por otra parte, el espectro puede tener una anchura de línea instantánea que es más pequeña que 100 gigahercios. La fuente puede ser utilizada también con una cavidad de láser con una longitud de recorrido de ida y vuelta más corta que 5 m. La fuente puede tener también una disposición de escáner poligonal que puede estar diseñada para recibir al menos una parte de la radiación electromagnética emitida y reflejar o desviar esa parte hacia una posición adicional. Además, es posible proporcionar una disposición de separación o división de haz que reciba selectivamente componentes de la radiación electromagnética.

De acuerdo con la presente invención, la fuente incluye al menos una disposición de separación espectral configurada para separar físicamente una o más componentes de la radiación electromagnética basándose en la frecuencia de la radiación electromagnética. El aparato incluye también al menos una disposición óptica de desviación angular que puede incluir al menos una disposición óptica rotativa en continuo que está configurada para recibir las componentes físicamente separadas y dirigir selectivamente componentes individuales a una disposición de selección de haz.

En una variante proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, la disposición de separación espectral incluye una rejilla de difracción, un prisma, un prisma escalonado o *grisma* [del inglés “*grism*”: combinación de prisma y red de difracción en una de sus caras], un deflector de haz acústico-óptico, una matriz o conjunto ordenado en fase y virtual, y/o una rejilla de guía de ondas dispuesta en matriz o conjunto ordenado. La disposición óptica rotativa en continuo puede ser un espejo poligonal, un elemento difractante, un disco sustancialmente opaco que tiene un conjunto ordenado de regiones sustancialmente transparentes, y/o un disco sustancialmente transparente que presenta un conjunto ordenado de regiones sustancialmente reflectantes. La disposición de separación espectral puede también incluir una rejilla holográfica, montada en un sustrato que comprende una disposición óptica rotativa en continuo.

La disposición de selección de haz puede consistir en una fibra óptica, una guía de ondas óptica, una abertura de orificio pequeño, una combinación de una lente con una fibra óptica, una guía de ondas o un orificio pequeño, y/o un filtro espacial. La disposición de selección de haz puede incluir una pluralidad de elementos de selección de haz, y la radiación electromagnética que es transmitida por la pluralidad de elementos de selección de haz puede ser combinada. La señal puede ser reflejada múltiples veces en la disposición óptica rotativa en continuo, antes de ser recibida por la disposición de selección. Por otra parte, la fuente incluye al menos una disposición de formación de imagen óptica, configurada para recibir directamente las componentes de la radiación electromagnética y generar una imagen de uno o más elementos dispersivos asociados con las componentes, en dirección a la disposición óptica de desviación. La posición del punto de pivote de la disposición óptica de desviación angular puede haberse dispuesto en las proximidades de una imagen, real o virtual, de al menos uno de los elementos dispersivos.

En una variante proporcionada a modo de ejemplo, un punto de desviación del elemento óptico de desviación angular puede solaparse sustancialmente con una imagen real de al menos uno de los elementos dispersivos. Puede también proporcionarse al menos un reflector, que está configurado para recibir al menos una señal desde la al menos una disposición óptica de desviación angular. Uno o más de los elementos dispersivos pueden ser una rejilla de difracción, un prisma, un prisma escalonado, un deflector de haz acústico-óptico, un conjunto ordenado en fase y virtual, y/o una rejilla de guía de ondas dispuesta en conjunto ordenado. El elemento óptico de desviación angular puede ser un escáner de espejo poligonal, un escáner de espejo de galvanómetro o un escáner de espejo piezoeléctrico.

De acuerdo con aún otra variante a modo de ejemplo, se proporciona un aparato para filtrar una radiación electromagnética. El aparato incluye al menos una disposición dispersiva, configurada para separar angularmente componentes de la radiación electromagnética basándose en la frecuencia de la radiación electromagnética, y generar componentes separadas por frecuencia. El aparato puede incluir también al menos un elemento óptico de desviación angular, que tiene un punto de pivote para una desviación angular. El punto de pivote puede solaparse sustancialmente con una posición en la que se solapan sustancialmente todas las componentes separadas por frecuencia. El emisor puede ser un medio de ganancia de láser, un amplificador óptico semiconductor, un diodo de láser, un diodo luminiscente, una fibra óptica adulterada o dopada, un cristal de láser dopado, un vidrio de láser dopado y/o un pigmento de láser.

En una variante de la presente invención, pueden proporcionarse más de un medio de ganancia de láser que proporciona radiación electromagnética, y al menos una disposición de separación espectral configurada para separar físicamente una o más componentes de la radiación electromagnética basándose en la frecuencia de la radiación electromagnética. En esta variante, las componentes seleccionadas de radiación electromagnética procedentes de cada medio de ganancia de láser están sincronizadas y pueden ser utilizadas por separado o en combinación.

En una realización adicional proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, puede proporcionarse una sintonización de alta velocidad de un láser de semiconductor de cavidad extendida. El resonador de láser puede incluir un anillo de fibra óptica unidireccional o de propagación en un solo sentido, un amplificador óptico semiconductor como medio de ganancia, y un filtro de barrido o exploración basado en un escáner poligonal. Pueden obtenerse velocidades de sintonización variables de hasta 1.150 nm/ms (frecuencia de repetición de 15,7 kHz), a lo largo de un abanico de longitudes de onda de 70 nm, centrado en 1,32  $\mu\text{m}$ . Dicha velocidad de sintonización puede ser más de un orden de magnitud más rápida que lo que se conoce convencionalmente, y puede verse facilitada, en parte, por un desplazamiento en la propia frecuencia en el amplificador óptico semiconductor. La anchura de línea instantánea de la fuente puede ser menor que 0,1 nm para una potencia de salida de 9 mW de onda continua (cw -“continuous wave”), y puede obtenerse un fondo de baja emisión espontánea de 80 dB [decibelios].

## ES 2 310 744 T3

Otras características y ventajas de la presente invención se pondrán de manifiesto con la lectura de la siguiente descripción detallada de realizaciones de la invención, cuando se tome en combinación con las reivindicaciones que se acompañan.

### 5 Breve descripción de los dibujos

Otros propósitos, características y ventajas adicionales de la invención se pondrán de manifiesto por la siguiente descripción detallada, al tomarla en combinación con las figuras que se acompañan, las cuales muestran realizaciones ilustrativas de la invención, y en las que:

10

la Figura 1A es un diagrama de bloques de una primera realización proporcionada a modo de ejemplo de un filtro de longitud de onda óptico de acuerdo con la presente invención;

15

la Figura 1B es un diagrama de bloques de una segunda realización proporcionada a modo de ejemplo del filtro de longitud de onda óptico de acuerdo con la presente invención;

20

la Figura 1C es un diagrama de bloques de una tercera realización proporcionada a modo de ejemplo del filtro de longitud de onda óptico de acuerdo con la presente invención;

25

la Figura 1D es un diagrama de bloques de una cuarta realización proporcionada a modo de ejemplo del filtro de longitud de onda óptico de acuerdo con la presente invención;

30

la Figura 1E es un diagrama de bloques de una quinta realización proporcionada a modo de ejemplo del filtro de longitud de onda óptico de acuerdo con la presente invención;

35

la Figura 1F es un diagrama de bloques de una sexta realización proporcionada a modo de ejemplo del filtro de longitud de onda óptico de acuerdo con la presente invención;

40

la Figura 2 es un gráfico de características ejemplares del filtro de longitud de onda óptico de acuerdo con la presente invención;

45

la Figura 3 es una realización proporcionada a modo de ejemplo de la fuente de láser de sintonización en longitud de onda de acuerdo con la presente invención;

50

la Figura 4A es un gráfico de unas primeras características de salida proporcionadas a modo de ejemplo (espectro de láser frente a longitud de onda) de la fuente de láser de acuerdo con la presente invención;

55

la Figura 4B es un gráfico de unas segundas características de salida proporcionadas a modo de ejemplo (potencia de salida frente a tiempo) de la fuente de láser de acuerdo con la presente invención;

60

la Figura 5 es un gráfico de una potencia de salida a modo de ejemplo, proporcionada como una función de la velocidad de barrido, de acuerdo con la presente invención;

la Figura 6 es una realización proporcionada a modo de ejemplo de una disposición de láser sintonizable de semiconductor de cavidad extendida y espacio libre, de acuerdo con la presente invención;

la Figura 7 es una ilustración de un filtro de longitud de onda óptico;

la Figura 8 es un diagrama esquemático de una realización proporcionada a modo de ejemplo de un microscopio confocal codificado espectralmente que utiliza la fuente de láser sintonizable de acuerdo con la presente invención;

la Figura 9 es un diagrama esquemático de una realización proporcionada a modo de ejemplo de una disposición de tomografía de coherencia óptica en el dominio de la frecuencia, que utiliza la fuente de láser sintonizable de acuerdo con la presente invención;

la Figura 10A es una vista en planta superior de una octava variante a modo de ejemplo de un filtro de longitud de onda; y

la Figura 10B es una vista en perspectiva desde arriba del filtro de longitud de onda que se ha mostrado en la Figura 10A.

### Descripción detallada

La Figura 1A muestra un diagrama de bloques de una primera realización proporcionada a modo de ejemplo de un filtro de longitud de onda óptico 1 de acuerdo con la presente invención. En esta primera realización ejemplar, el filtro de longitud de onda óptico 1 puede ser utilizado en una variedad de aplicaciones diferentes, de las que se describen ejemplos generales más adelante. En este ejemplo, el filtro 1 puede ser acoplado a una o más aplicaciones 3 a través de una fuente luminosa 2. Ha de comprenderse que, en ciertas aplicaciones que se proporcionan a modo de ejemplo, el

## ES 2 310 744 T3

filtro 1 puede ser utilizado con, o conectado a, una aplicación (por ejemplo, una o más de las aplicaciones 3) a través de un dispositivo diferente de una fuente luminosa (por ejemplo, un elemento óptico pasivo o activo). En la primera realización proporcionada a modo de ejemplo, que se muestra en la Figura 1A, una fuente luminosa de espectro amplio y/o un controlador 2 (al que se hace referencia en lo sucesivo como “controlador de luz”) pueden estar acoplados a un elemento 4 de dispersión de longitud de onda. El controlador de luz 2 puede acoplarse adicionalmente a una o más de las aplicaciones 3 que se han concebido para llevar a cabo una o más tareas con, o para, procedimientos de formación de imagen ópticos y sistemas de formación de imagen ópticos, procedimientos y sistemas de mecanizado por láser, fotolitografía y sistemas fotolitográficos, sistemas de topografía por láser, procedimientos y sistemas de telecomunicaciones, etc., incluyendo éstos pero sin limitarse a ellos. El elemento 4 de dispersión de longitud de onda puede ser acoplado a un sistema de lentes 6, que se acopla adicionalmente a un dispositivo 8 de desviación de haz.

El controlador de luz 2 puede consistir en uno o más de entre varios sistemas y/o disposiciones que están configurados para transmitir un haz de luz que tiene un espectro de frecuencias (f) amplio. En una realización proporcionada a modo de ejemplo, el haz de luz puede ser un haz de luz colimado. El haz de luz puede incluir una pluralidad de longitudes de onda  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  dentro del espectro de la luz visible (por ejemplo, roja, azul, verde). Similarmente, el haz de luz proporcionado por el controlador de luz 2 puede incluir también una pluralidad de longitudes de onda  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  que pueden estar definidas fuera del espectro visible (por ejemplo, ultravioleta, infrarroja cercana o infrarroja). En una realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, el controlador de luz 2 puede incluir un anillo de transmisión de luz unidireccional, que se describirá con mayor detalle más adelante, en relación con la Figura 3, la cual muestra una realización a modo de ejemplo de una fuente de luz de sintonización en longitud de onda. Por otra parte, en otra realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, el controlador de luz 2 puede incluir un sistema resonador lineal, que será descrito con mayor detalle más adelante, en relación con la Figura 6.

El elemento 4 de dispersión de longitud de onda del filtro de longitud de onda óptico 1 puede incluir un o más elementos que están específicamente diseñados para recibir el haz de luz desde el controlador de luz 2 y para separar de forma convencional el haz de luz en una pluralidad de longitudes de onda de luz que tienen un cierto número de direcciones. El elemento 4 de dispersión de longitud de onda es operativo adicionalmente para dirigir porciones de la luz que tienen diferentes longitudes de onda en direcciones angulares o desplazamientos iguales o equiespaciados con respecto a un eje óptico 38. En una realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, el elemento 4 de dispersión de longitud de onda puede incluir un elemento de dispersión de luz, el cual puede incluir una rejilla de reflexión, una rejilla de transmisión, un prisma, una rejilla de difracción, una célula de difracción acústico-óptica o combinaciones de uno o más de estos elementos, si bien no está limitado a ellos.

El sistema de lentes 6 del filtro de longitud de onda óptico 1 puede incluir un o más elementos ópticos concebidos para recibir las longitudes de onda separadas de la luz procedentes del elemento de dispersión de longitud de onda. La luz de cada longitud de onda se propaga a lo largo de un recorrido o camino que forma un ángulo con respecto al eje óptico 38. El ángulo queda determinado por el elemento 4 de dispersión de longitud de onda. Por otra parte, el sistema de lentes 6 está concebido para dirigir o conducir y/o enfocar las longitudes de onda de luz a una posición predeterminada situada en un dispositivo 8 de desviación de haz.

El dispositivo 8 de desviación de haz puede ser controlado para recibir y redirigir selectivamente una o más longitudes de onda de luz discretas de vuelta a lo largo del eje óptico 38, a través del sistema de lentes 6, hasta el elemento 4 de dispersión de longitud de onda, y de vuelta al controlador de luz 2. Tras ello, el controlador de luz 2 puede dirigir selectivamente las longitudes de onda de luz discretas recibidas hacia una cualquiera o más de las aplicaciones. El dispositivo 8 de deflexión de haz puede proporcionarse de muchas maneras diferentes. Por ejemplo, el dispositivo 8 de deflexión de haz puede proporcionarse a partir de elementos que incluyen un espejo poligonal, un espejo plano dispuesto en un árbol rotativo, un espejo dispuesto en un galvanómetro o un modulador acústico-óptico, si bien no está limitado a éstos.

La Figura 1B muestra un diagrama esquemático de una segunda realización proporcionada a modo de ejemplo del filtro de longitud de onda óptico 1. El filtro de longitud de onda óptico 1 puede estar configurado como un filtro del tipo de reflexión que puede tener unos accesos o puertas de entrada y de salida sustancialmente idénticas. Una fibra óptica 10 de entrada/salida y una lente de colimación 12 pueden proporcionar una entrada desde un controlador de luz 2' (que puede ser sustancialmente similar al controlador de luz 2 descrito anteriormente con referencia a la Figura 1A) al filtro de longitud de onda óptico 1'. El filtro de longitud de onda óptico 1' incluye una rejilla de difracción 16, unos elementos telescópicos ópticos 6' (a los que se hará aquí referencia en lo sucesivo como “telescopio 6'”) y que pueden ser, posiblemente, similares al sistema de lentes 6 de la Figura 1A), y un escáner de espejo poligonal 24. El telescopio 6' puede incluir dos lentes, por ejemplo, unas primera y segunda lentes 20, 22 con una configuración 4-f.

En la segunda realización proporcionada a modo de ejemplo del filtro de longitud de onda óptico 1', que se muestra en la Figura 1B, el telescopio 6' incluye las primera y segunda lentes 20, 22, cada una de las cuales está sustancialmente centrada a lo largo del eje óptico 38. La primera lente 20 puede estar colocada a una primera distancia del elemento 4' de dispersión de longitud de onda (por ejemplo, la rejilla de difracción 16), que puede ser aproximadamente igual a la longitud focal F1 de la primera lente 20. La segunda lente 22 puede estar situada a una segunda distancia de la primera lente 20, que puede ser aproximadamente igual a la suma de la longitud focal F1 de la primera lente 20 y la longitud focal F2 de la segunda lente 22. Utilizando semejante disposición, la primera lente 20 puede recibir una o más longitudes de onda de luz discretas, colimadas, desde el elemento 4' de dispersión de longitud de onda, y puede llevara a cabo eficazmente una transformada de Fourier en cada una de las una o más longitudes de onda de luz discretas y

## ES 2 310 744 T3

colimadas, con el fin de proporcionar uno o más haces convergentes aproximadamente iguales que son proyectados sobre un plano de imagen IP (“image plane”).

5 El plano de imagen IP está situado, preferiblemente, entre la primera lente 20 y la segunda lente 22, y a una distancia predeterminada de la primera lente 20. De acuerdo con una variante a modo de ejemplo de la presente invención, dicha distancia predeterminada puede ser definida por la longitud focal  $F_1$  de la primera lente 20. Una vez que dicho uno o más haces convergentes son propagados a través del plano de imagen IP, estos uno o más haces convergentes forman uno o más haces divergentes iguales o correspondientes que son recibidos por la segunda lente 22. La segunda lente 22 está diseñada para recibir los haces divergentes y proporcionar un número aproximadamente igual de haces colimados que presentan desplazamientos angulares predeterminados con respecto al eje óptico 38. De esta forma, la segunda lente 22 puede dirigir o conducir los haces colimados a porciones preferidas del dispositivo 8' de desviación de haz.

15 El telescopio 6' de acuerdo con la segunda realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención es capaz de funcionar para proporcionar una o más características según se ha descrito en lo anterior, así como para convertir una dispersión angular divergente procedente de la rejilla en una dispersión angular convergente tras la segunda lente 22. Semejante resultado puede ser ventajoso para un funcionamiento adecuado del filtro. Además, el telescopio 6' puede proporcionar parámetros ajustables que controlen el intervalo de sintonización y la anchura de línea, y reduzcan el tamaño del haz en el espejo poligonal, a fin de evitar el recorte o truncamiento del haz. Como se ha ilustrado en la realización proporcionada a modo de ejemplo de la Figura 1, un dispositivo 6' de desviación de haz (que, por ejemplo, puede incluir un espejo o disposición poligonal 24) está concebido para reflejar, preferiblemente, de vuelta únicamente la componente espectral dentro de un paso de banda estrecho, en función del ángulo de la faceta frontal del espejo de la disposición poligonal 24 con respecto al eje óptico 38. La luz de banda estrecha reflejada es difractada y recibida por la fibra óptica 10. La orientación del haz incidente 30 con respecto al eje óptico, así como el sentido de rotación 40 de la disposición poligonal 24, pueden ser utilizados para determinar el sentido de la sintonización en longitud de onda, por ejemplo, una exploración en longitud de onda ascendente (positivo) o una exploración en longitud de onda descendente (negativo). La disposición proporcionada a modo de ejemplo que se muestra en la Figura 1B puede generar un barrido de longitud de onda positivo. Ha de comprenderse que, si bien la disposición poligonal 24 se muestra en la Figura 1B de modo que tiene doce facetas, es posible utilizar también 20 disposiciones poligonales que tengan menos de doce facetas o un número mayor que doce facetas. Aunque no se estén considerando, en general, los límites mecánicos prácticos, basándose en técnicas de fabricación convencionales, el número concreto de facetas de la disposición poligonal 24 que se ha de emplear en una aplicación cualquiera puede depender de la velocidad de exploración y del intervalo de exploración que se deseen para una aplicación particular.

25 Por otra parte, el tamaño de la disposición poligonal 24 puede escogerse basándose en las preferencias de una aplicación concreta y, preferiblemente, teniendo en cuenta ciertos factores que incluyen la susceptibilidad de fabricación y el peso de la disposición poligonal 24, aunque no se limitan a éstos. Ha de comprenderse también que es posible proporcionar unas lentes 20, 22 que tengan longitudes focales diferentes. Por ejemplo, las lentes 20, 22 deberán seleccionarse de manera que proporcionen un punto focal aproximadamente en el punto central 24a de la disposición poligonal 24.

30 En una realización proporcionada a modo de ejemplo, puede utilizarse un haz gaussiano 30 con un espectro óptico amplio, que incide en la rejilla desde el colimador de fibra 12. La bien conocida ecuación de una rejilla se expresa como  $\lambda = p \cdot (\sin\alpha + \sin\beta)$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda óptica,  $p$  es el paso de la rejilla, y  $\alpha$  y  $\beta$  son los ángulos incidente y difractado, respectivamente, del haz con respecto al eje normal 42 a la rejilla. La longitud de onda central del intervalo de sintonización del filtro puede definirse por  $\lambda_0 = p \cdot (\sin\alpha + \sin\beta_0)$ , donde  $\beta_0$  es el ángulo comprendido entre el eje óptico 38 del telescopio y el eje normal a la rejilla. La anchura de banda de FWHM del filtro se define por  $(\delta\lambda)_{FWHM}/\lambda_0 = A \cdot (p/m) \cos\alpha/W$ , donde  $A = \sqrt{4 \ln 2 / \pi}$  para un paso doble,  $m$  es el orden de difracción, y  $W$  es  $1/e^2$ -anchura del haz gaussiano en el colimador de fibra.

35 El intervalo de sintonización del filtro puede estar limitado por la apertura numérica finita de la primera lente 20. El ángulo de aceptación de la primera lente 20 sin truncamiento de haz puede definirse por  $\Delta\beta = (D_1 - W \cos\beta_0 / \cos\alpha) / F_1$ , donde  $D_1$  y  $F_1$  son el diámetro y la longitud focal de la primera lente 20. Dicha formulación hace referencia al intervalo de sintonización del filtro a través de  $\Delta\lambda = p \cdot \cos\beta_0 \cdot \Delta\beta$ . Uno de los parámetros de diseño proporcionados a modo de ejemplo del filtro, originado por la naturaleza de facetas múltiples del espejo poligonal, es el intervalo espectral libre, el cual se describe en lo que sigue. Una componente espectral, tras propagarse a través de la primera lente 20 y de la segunda lente 22, puede presentar un eje de propagación del haz con un ángulo  $\beta'$  con respecto al eje óptico 38, por ejemplo,  $\beta' = -(\beta - \beta_0) \cdot (F_1/F_2)$ , donde  $F_1$  y  $F_2$  son las longitudes focales de la primera lente 20 y de la segunda lente 22, respectivamente. La disposición poligonal 24 puede tener un ángulo polar de faceta a faceta dado por  $\theta = 2\pi/N \approx L/R$ , donde  $L$  es la anchura de las facetas,  $R$  es el radio del polígono y  $N$  es el número de facetas. Si el intervalo de  $\beta'$  de espectro es mayor que el ángulo entre facetas, es decir,  $\Delta\beta' = \Delta\beta \cdot (F_1/F_2) > \theta$ , la disposición poligonal puede retro-reflejar o reflejar hacia atrás más de una componente espectral en un instante dado. La separación de las múltiples componentes espectrales simultáneamente reflejadas, o el intervalo espectral libre, puede ser definido como  $(\Delta\lambda)_{FSR} = p \cdot \cos\beta_0 \cdot (F_1/F_2) \cdot \theta$ . En una aplicación de filtro de exploración de intra-cavidad o interior a la cavidad, el intervalo espectral libre del filtro deberá exceder el intervalo espectral del medio de ganancia con el fin de evitar 40 bandas de frecuencias múltiples (en el caso de un medio de ganancia ensanchado de forma heterogénea) o un intervalo de sintonización limitado (en el caso de un medio de ganancia ensanchado homogéneamente).

## ES 2 310 744 T3

El ciclo de trabajo de la sintonización de láser por parte del filtro puede ser, por ejemplo, el 100%, sin ninguna pérdida por exceso provocada por el recorte o truncamiento del haz, si se satisfacen dos condiciones preferibles de la forma que sigue:

$$W < \frac{\cos \alpha F_1}{\cos \beta F_2} L \quad \text{y} \quad W < \frac{\cos \alpha}{\cos \beta_0} (F_2 - S) \cdot \theta \quad (1)$$

La primera ecuación puede deducirse de la condición de que la anchura del haz tras la segunda lente 22 debe ser más pequeña que la anchura de las facetas. La segunda ecuación puede deducirse del hecho de que los dos haces de las longitudes de onda más baja 32 y más alta 34 del intervalo de sintonización, respectivamente, no deben solaparse uno con otro en la disposición poligonal 24.  $S$  denota, en la ecuación (1), la distancia existente entre la segunda lente 22 y el espejo frontal de la disposición poligonal 24.

Es posible seleccionar las componentes ópticas con los siguientes parámetros:  $W = 2,4$  mm,  $p = 1/1.200$  mm,  $\alpha = 1,2$  rad,  $\beta_0 = 0,71$  rad,  $m = 1$ ,  $D_1 = D_2 = 25$  mm,  $F_1 = 100$  mm,  $F_2 = 45$  mm,  $N = 24$ ,  $R = 25$  mm,  $L = 6,54$ ,  $S = 5$  mm,  $\theta = 0,26$  rad,  $\lambda_0 = 1.320$  nm. A partir de los parámetros, es posible calcular la anchura de banda de FWHM teórica, el intervalo de sintonización y el intervalo espectral libre del filtro:  $(\delta\lambda)_{FWHM} = 0,09$  nm,  $\Delta\lambda = 126$  nm y  $(\Delta\lambda)_{FSR} = 74$  nm. Ambas condiciones de la ecuación (1) pueden ser satisfechas con márgenes particulares.

La Figura 1C muestra un diagrama de una tercera realización proporcionada a modo de ejemplo de la disposición de filtro sintonizable en longitud de onda para doblar la velocidad de sintonización con la misma velocidad de rotación del polígono, de acuerdo con la presente invención. En esta realización proporcionada a modo de ejemplo, la superficie especular de la disposición poligonal 24 se coloca sustancialmente a una distancia  $F_2$  de la lente 22, y el haz de luz es reflejado con un ángulo distinto de cero (en lugar de ser directamente reflejado de vuelta al telescopio desde la faceta especular de la disposición poligonal 24). El ángulo de barrido de la luz reflejada desde la disposición poligonal 24 es el doble del ángulo de rotación de la disposición poligonal 24. Cuando la diferencia 90 de ángulos de incidencia entre  $\lambda_1$  y  $\lambda_N$  con respecto a la disposición poligonal 24 es aproximadamente la misma que el ángulo 92 entre faceta y faceta del polígono, por ejemplo, el ángulo  $\theta$ , el ángulo de barrido 94 de la luz reflejada es  $2\theta$  para una rotación del ángulo  $\theta$  de la disposición poligonal 24. Colocando dos reflectores 100, 102, que, preferiblemente, dirigen el haz de luz reflejado desde la disposición poligonal 24 de vuelta a la disposición poligonal 24 y al telescopio (por ejemplo, similar al telescopio 6' de la Figura 1B), con el ángulo  $\theta$  entre uno y otro, se consiguen unas exploraciones de dos veces de longitud de onda desde  $\lambda_1$  a  $\lambda_N$  para la rotación del polígono de un ángulo  $\theta$  entre faceta y faceta.

En la Figura 1D, que muestra una cuarta realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, la diferencia 90 de ángulos de incidencia entre  $\lambda_1$  y  $\lambda_N$  en dirección a la disposición poligonal 24 es más pequeña que el ángulo 92 entre faceta y faceta del polígono, por ejemplo,  $\phi (= \theta/K, \text{ donde } K > 1)$ . Esto puede conseguirse reduciendo el paso de la rejilla e incrementando la relación  $F_2/F_1$ . En esta realización proporcionada a modo de ejemplo, la velocidad de sintonización del filtro puede ser aumentada en un factor de  $2K$  sin incrementar, ya sea la velocidad de rotación de la disposición poligonal 24, ya sea el número de facetas de la disposición poligonal 24.

La velocidad de sintonización del filtro puede aumentarse adicionalmente al hacer que el haz de luz se refleje múltiples veces en la disposición poligonal 24. Una quinta realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, representada en la Figura 1E, consiste en una disposición para incrementar la velocidad de sintonización en un factor de  $4K$ , donde  $K$  es la relación entre el ángulo 92 y el ángulo 90 ( $K = \theta/\phi$ ). El haz de luz es reflejado dos veces (por ejemplo, cuatro veces en su recorrido de ida y vuelta) por la disposición poligonal 24, de tal manera que el ángulo de barrido 94 de la luz reflejada se convierte en el ángulo  $4\theta$ , y la velocidad de sintonización se hace  $4K$  veces más rápida. Dicha reflexión puede también ser asistida con la reflexión en las superficies 100, 102, 104, 106 y 108. Esta realización proporcionada a modo de ejemplo de la disposición de filtro puede ser utilizada para ampliar el intervalo de espectro libre (FSR - "free spectral range") del filtro. Por ejemplo, si se retira uno de los reflectores finales, el 102, de la realización mostrada en la Figura 1E, el FSR del filtro puede hacerse dos veces más extenso. Es probable que no haya en tal caso una mejora de la velocidad de sintonización. De forma similar, es posible conservar tan sólo uno de los reflectores finales, el 100, de la Figura 1E. El FSR puede hacerse cuatro veces más amplio en esta realización.

La Figura 1F muestra una sexta realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, que proporciona un filtro de sintonización poligonal que da acomodo a dos entradas y salidas de luz. Por ejemplo, con el fin de dar soporte a dos o más entradas y salidas de este filtro, dos o más conjuntos de disposiciones ópticas, tales que cada conjunto respectivo incluye una fibra de entrada/salida 10, 10', una lente de colimación 12, 12', una rejilla de difracción 16, 16' y un telescopio, pueden compartir la misma disposición poligonal 24. Debido a que el espejo de exploración de la disposición poligonal 24 es estructuralmente isótropo en torno al eje de rotación, es posible dar acomodo a ciertas disposiciones ópticas que pueden suministrar los haces de luz a la disposición poligonal 24, desde cualesquiera direcciones. Como ambos conjuntos de disposición óptica de la realización de la Figura 1F utilizan el mismo escáner poligonal, sus respectivos espectros de transmisión óptica de barrido están sincronizados. Ha de comprenderse que la realización proporcionada a modo de ejemplo de la Figura 1F puede extenderse o ampliarse de manera que incluya múltiples (en número mayor que 2) disposiciones ópticas, cada una de las cuales tiene su propio canal óptico de entrada y de salida.

## ES 2 310 744 T3

Una realización proporcionada a modo de ejemplo del filtro de sintonización poligonal anteriormente descrito, de acuerdo con la sexta realización de la presente invención, puede consistir en una fuente de luz de exploración de longitud de onda de banda ancha. En la Figura 1G, que muestra una séptima realización proporcionada a modo de ejemplo de la presente invención, una primera fuente de luz 60 de banda ancha proporciona una señal luminosa que puede tener una longitud de onda  $\lambda_1$  a  $\lambda_i$ , y una segunda fuente de luz 600 de banda ancha proporciona otra señal luminosa que tiene una longitud de onda  $\lambda_{i-j}$  a  $\lambda_N$ . Cuando las dos disposiciones ópticas que dan soporte a las longitudes de onda  $\lambda_1$  a  $\lambda_i$  y a las longitudes de onda  $\lambda_{i-j}$  a  $\lambda_N$ , respectivamente, están sincronizadas para suministrar como salida aproximadamente la misma longitud de onda en la misma situación, dicha disposición proporcionada a modo de ejemplo puede llegar a ser una fuente de luz de exploración de longitud de onda de banda ancha con una velocidad de exploración lineal de  $\lambda_1$  a  $\lambda_N$ . Puesto que el FSR del filtro de exploración poligonal puede ser ajustado para que sea 200 nm o más ancho sin ninguna degradación del rendimiento óptico, pueden combinarse con este filtro dos o más fuentes de luz de banda ancha con diferentes longitudes de onda centrales, a fin de proporcionar una fuente de luz de exploración lineal a lo largo de una anchura de banda de sintonización de 200 nm. Ha de comprenderse que la realización de la Figura G puede extenderse de manera que incluya múltiples (por ejemplo, más de 2) disposiciones ópticas y múltiples (por ejemplo, más de 2) fuentes de luz de banda ancha.

La realización proporcionada a modo de ejemplo que se ilustra en la Figura 1G puede también configurarse de tal modo que las bandas de sintonización de longitud de onda de cada disposición óptica y cada fuente de luz de banda ancha sean discontinuas. En semejante configuración, las bandas de sintonización pueden ser barridas de una manera secuencial, continua o discontinua, o ser barridas simultáneamente.

La Figura 2 muestra un gráfico a modo de ejemplo de características medidas del filtro de acuerdo con una realización proporcionada en calidad de ejemplo de la presente invención. El espectro de reflexión normalizado del filtro, por ejemplo, una curva 48, puede ser medido con el uso de luz de emisión espontánea de un amplificador de banda ancha, procedente de un amplificador óptico semiconductor (SOA -“semiconductor optical amplifier”) y un analizador espectral óptico. El analizador espectral óptico puede obtener o registrar un espectro de transferencia (reflejado) normalizado en un modo de retención de picos, al tiempo que la disposición poligonal 24 gira a su velocidad máxima de 15,7 kHz. El intervalo de sintonización medido puede ser 90 nm, que es sustancialmente más pequeño que el valor teórico de 126 nm. ES posible tener una discrepancia que puede ser debida a una aberración en el telescopio 6', o a una curvatura de campo primario asociada con la divergencia angular relativamente grande del haz procedente de la rejilla. Dicha aberración puede ser corregida utilizando diseños de lente optimizados bien conocidos en la técnica. Una curva 46 mostrada en la Figura 2 ilustra el espectro de transferencia cuando la disposición poligonal se encuentra estática en una posición concreta. El intervalo espectral libre observado es 73,5 nm, en concordancia con un cálculo teórico. La anchura de banda de FWHM de la curva 46 se midió en un valor de 0,12 nm. La discrepancia entre la anchura de banda de FWHM medida y el límite teórico de 0,09 nm es razonable considerando la aberración y las imperfecciones de los elementos ópticos.

La Figura 3 muestra una realización a modo de ejemplo de la fuente de láser de sintonización en longitud de onda de acuerdo con la presente invención. Por ejemplo, el filtro basado en un polígono puede ser incorporado dentro de un láser de semiconductor de cavidad extendida, por medio de un dispositivo de circulación de Faraday. Los elementos interiores a la cavidad pueden ser conectados por fibras ópticas 10 de un solo modo o mono-modo. El medio de ganancia puede ser un amplificador óptico semiconductor 52 (por ejemplo, SOA, Philips, CQF 882/e). La salida de láser 72 puede obtenerse a través de la puerta del 90% de un acoplador 70 fundido con fibra óptica. Pueden emplearse dos controladores de polarización 64, 62 para alinear los estados de polarización de la luz interior a la cavidad con los ejes de máxima eficiencia de la rejilla 16 y de la máxima ganancia del SOA 50. Una fuente de corriente 54 puede proporcionar una corriente de inyección al SOA 50. La disposición poligonal 24 puede ser accionada y controlada por un dispositivo de accionamiento de motor 97. Con el fin de generar una señal sincrónica de utilidad para las posibles aplicaciones, aproximadamente el 5% de la salida del láser puede ser dirigida a un fotodetector 82 a través de un filtro 80 de longitud variable con una anchura de banda de 0,12 nm. En esta implementación a modo de ejemplo, la longitud de onda central del filtro se fijó en 1.290 nm. La señal detectora puede generar impulsos cortos cuando se hace que la longitud de onda de salida del láser efectúe un barrido a través de la estrecha banda de paso del filtro de longitud de onda fija. La regulación de la secuencia temporal del impulso sincrónico puede ser controlada cambiando la longitud de onda central del filtro.

La Figura 4A muestra un gráfico de unas primeras características de salida proporcionadas a modo de ejemplo (espectro del láser frente a su longitud de onda) de la fuente de láser de acuerdo con la presente invención, y la Figura 4B es un gráfico de unas segundas características de salida proporcionadas a modo de ejemplo (potencia de salida frente al tiempo) de la fuente de láser de acuerdo con la presente invención. Volviendo a la Figura 4A, la curva 110 representa el espectro de salida del láser, medido por el analizador espectral óptico en el modo de retención de picos, por ejemplo, cuando la disposición poligonal da vueltas a 15,7 kHz. Se observó que el intervalo de barrido de borde a borde era de 1.282 nm a 1.355 nm, igual al intervalo espectral libre del filtro. El perfil de forma gaussiana del espectro medido, en lugar de un perfil cuadrado, puede ser debido principalmente a las pérdidas en la cavidad dependientes de la polarización, provocadas por la sensibilidad a la polarización del filtro y por la birrefringencia de la cavidad. Puede ser preferible ajustar los controladores de polarización para obtener el intervalo de barrido y la potencia de salida máximos. En la Figura 4B, la curva 114 es la salida del láser proporcionado a modo de ejemplo, en el dominio del tiempo. La traza superior 112 es la señal sincrónica que puede ser obtenida a través del filtro de longitud de onda fija. La amplitud de la variación de potencia de una faceta a otra era menor que el 3,5%. Los valores de pico y promedio de la potencia de salida eran, respectivamente, 9 mW y 6 mW. La escala en el eje Y de la curva 110 de la Figura 4A

## ES 2 310 744 T3

puede ser calibrada a partir de la medición en el dominio del tiempo, ya que el analizador espectral óptico registra un espectro promediado en el tiempo debido a que la velocidad de sintonización de láser es mucho más rápida que la velocidad de barrido del analizador espectral.

5 Puede aparecer un desplazamiento descendente en frecuencia del espectro óptico de la luz de láser interior a la cavidad, a medida que la luz pasa a través del medio de ganancia de SOA, como resultado de un fenómeno de mezcla de cuatro ondas intra-banda, o dentro de una misma banda. En presencia del desplazamiento descendente en frecuencia, puede generarse una mayor potencia de salida al hacer funcionar el filtro de exploración de longitud de onda en el sentido de barrido de longitud de onda positivo. La Figura 5 muestra una ilustración proporcionada a modo de ejemplo de una potencia de pico normalizada de la salida de láser, medida como una función de la velocidad de sintonización. La velocidad de sintonización negativa puede obtenerse al hacer oscilar la posición del colimador y la orientación de la rejilla con respecto al eje óptico 38 de la realización ejemplar de la disposición de acuerdo con la presente invención. Es preferible hacer que los parámetros físicos del filtro sean idénticos en ambos sentidos de sintonización. Los resultados muestran que la acción combinada del desplazamiento en la propia frecuencia y la sintonización positiva hace posible obtener una salida mayor y permite hacer funcionar el láser a una velocidad de sintonización más alta, tal y como se demuestra en la curva 120. En consecuencia, la exploración de longitud de onda positiva puede ser el funcionamiento preferible. La potencia de salida puede verse reducida, con una velocidad de sintonización creciente. Puede ser deseable una longitud de cavidad corta con vistas a reducir la sensibilidad de la potencia de salida a la velocidad de sintonización. En tal caso, puede preferirse una cavidad de láser de espacio libre.

20 En la Figura 6 se representa una realización proporcionada a modo de ejemplo de una disposición de láser sintonizable de semiconductor, de cavidad extendida de espacio libre, de acuerdo con la presente invención. Una guía de ondas semiconductor 162, hecha en un circuito integrado 160 de sustrato, puede acoplarse con el filtro de exploración poligonal a través de una lente de colimación 180. La faceta frontal 164 del mismo puede estar revestida contra la reflexión, y la faceta de salida 166 puede haberse escindido en un plano de corte natural o, preferiblemente, revestido con dieléctricos para que presente una reflectividad óptima. La salida 190 de láser puede obtenerse a través de las lentes 182 de acoplamiento de salida. La salida sincrónica puede captarse mediante el uso de una lente 140, un orificio pequeño 142 y un fotodetector 144 situado en el camino de difracción de orden 0 para la luz que se encuentra en retro-reflexión desde el escáner poligonal 24. El fotodetector 144 puede generar un impulso corto cuando el foco del haz óptico de una longitud de onda particular efectúa un barrido a través del orificio pequeño 142. Otros tipos de medios de ganancia incluyen fibra adulterada o dopada con iones de tierras raras,  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Cr}^{3+}$ :forsterita, si bien no están limitados a éstos. Las primera y segunda lentes 20, 22 pueden ser, preferiblemente, acromáticas con baja aberración, en particular, en la curvatura de campo y en la coma. Las lentes de colimación 180, 182 son, preferiblemente, lentes esféricas o no esféricas.

35 La Figura 7 muestra otro ejemplo de un filtro sintonizable en longitud de onda que incluye una lente de colimación de entrada 12, una rejilla de difracción 16, una lente de enfoque 200 y un disco giratorio 210, tal como se muestra en la Figura 7. La rejilla de difracción 16 tiene, preferiblemente, una curvatura cóncava que tiene una cierta longitud focal y que puede, por tanto, suprimir la necesidad de uso de la lente de enfoque 200. La rejilla de difracción puede ser reemplazada por otros elementos dispersivos angulares tales como un prisma. De preferencia, puede depositarse más de un reflector 212 sobre la superficie del disco giratorio 210. Preferiblemente, los reflectores 212 pueden incluir múltiples tiras estrechas distribuidas en una configuración periódica y radial. El material para los reflectores es, preferiblemente, oro. El disco 210 puede estar hecho de un plástico ligero o sustrato de silicón. En lugar de los reflectores depositados sobre la superficie superior del disco, el disco puede tener una serie de orificios pasantes seguidos por un único reflector fijado a la superficie trasera del disco o soportado independientemente del disco. Al incidir desde la fibra óptica 10, los haces ópticos de las diferentes longitudes de onda iluminan la superficie del disco formando una línea tras ser difractados por la rejilla 16 y enfocados por la lente 200. El haz que incide en los reflectores del disco giratorio puede ser reflejado hacia atrás, o retro-reflejado, y recibido por la fibra óptica 10. Puede utilizarse, por ejemplo, un espejo 202 para facilitar el acceso del haz sobre el disco.

50 La distancia desde la lente 200 a los reflectores del disco 210 puede ser aproximadamente igual a la longitud focal,  $F$ , de la lente 200. El intervalo de sintonización del filtro puede venir dado por  $\Delta\lambda = p \cdot \cos\beta_0 (D/F)$ , donde  $D$  denota la distancia entre las tiras. La anchura de la tira,  $w$ , puede ser, preferiblemente, sustancialmente igual al tamaño del punto

55 de haz,  $w_s$ , en la superficie del disco:  $w_s = \frac{\cos\beta_0}{\cos\alpha} \cdot \frac{F/z}{\sqrt{1+f/z^2}}$ , donde  $z = \pi w_s^2/\lambda$ . Dicha formulación puede conducir

60 a una anchura de banda de filtro de FWHM dada por  $(\delta\lambda)_{\text{FWHM}}/\lambda_0 = A \cdot (p/m) \cos\alpha/W$ , donde  $A = \sqrt{4 \ln 2/\pi}$ . Para  $w > w_s$ , la anchura de banda del filtro puede hacerse mayor, y para  $w < w_s$ , la eficiencia (reflectividad) del filtro puede verse reducida por el recorte o truncamiento del haz. La orientación del haz incidente 30 con respecto al eje óptico de la lente 200 y al sentido de giro 220 puede determinar el sentido de la sintonización en longitud de onda. La exploración de longitud de onda positiva puede determinar el sentido de la sintonización en longitud de onda. Puede ser preferible la exploración de longitud de onda positiva, cual es el caso del ejemplo que se muestra en la Figura 7.

65 Dos aplicaciones proporcionadas a modo de ejemplo de las realizaciones ejemplares de la presente invención se describen como sigue. La Figura 8 muestra un diagrama de bloques de una realización proporcionada a modo de ejemplo del microscopio confocal codificado espectralmente (SECM -“spectrally encoded confocal microscope”) que utiliza la fuente de láser sintonizable anteriormente mencionada 300. El principio básico del SECM se ha descrito en

## ES 2 310 744 T3

detalle en la Patente norteamericana N° 6.341.036, cuya descripción se incorpora aquí como referencia en su totalidad. Una sonda 310 proporcionada a modo de ejemplo incluye una rejilla de transmisión 312, dispuesta entre dos prismas de silicio 314, 316, un colimador 318 y una lente 320 de objetivo de microscopio. La sonda está equipada con un microdispositivo de accionamiento 322 para hacer que el haz barra o explore sobre una posición diferente de la muestra 330. El dispositivo de accionamiento 322 puede ser accionado por un excitador 324 de dispositivo de accionamiento a una velocidad sustancialmente más baja que la velocidad de sintonización de la fuente de láser. El movimiento de la sonda es, preferiblemente, rotativo o de traslación y está sincronizado con la salida sincrónica de la fuente de láser. En un ejemplo, la frecuencia de barrido de longitud de onda puede ser 15,7 kHz, y la frecuencia de exploración de la sonda puede ser 30 Hz, lo que permite obtener en un segundo 30 tramas de imagen. La lente de objetivo 320 tiene una apertura numérica elevada con el fin de proporcionar una resolución transversal del orden de los micrómetros, y un parámetro confocal de unos pocos micrómetros. Puede hacerse que el foco del haz óptico explore continuamente en el tiempo a lo largo de la muestra 330, por medio de la longitud de onda de salida con la que barre la fuente óptica y del movimiento de exploración de la sonda. La potencia óptica que se devuelve desde la muestra es proporcional a la reflectividad de la muestra dentro de una pequeña sección en la que el haz ha sido enfocado reduciéndolo a una estrecha parte central en un instante dado. Se construye una imagen bidimensional desde una cara de extremo de la muestra por medio de un procesador 344 de señal. El detector 340 es, preferiblemente, un fotodiodo de avalancha (ADP -“avalanche photodiode”), seguido de un amplificador de transimpedancia 342. La potencia reflejada puede ser recibida a través de un dispositivo de circulación de Faraday 350 ó de un acoplador de fibra óptica.

Otra aplicación ejemplar de las realizaciones proporcionadas a modo de ejemplo de la presente invención es la de la tomografía de coherencia óptica (OCT -“optical coherence tomography”), cuyos detalles se describen en la Patente norteamericana N° 5.956.355 y cuya descripción se incorpora aquí como referencia en su totalidad. En una configuración proporcionada a modo de ejemplo, que se representa en la Figura 9, una salida de una fuente sintonizable 300 puede ser dirigida a una muestra 330 a través de un acoplador 410 de fibra óptica. Una lente de objetivo 412 de la sonda puede proporcionar típicamente un foco cerca de la superficie o en el seno de la muestra 330. El espejo de referencia 420 puede ser colocado en un brazo o rama de referencia 120, en una posición en la que la longitud del camino óptico entre dos ramas del interferómetro de Michelson se hace coincidir sustancialmente. De forma alternativa, el camino de referencia puede configurarse en una configuración transmisora, no reflectante. El detector 430 puede consistir en un fotodiodo PIN seguido de un amplificador de transimpedancia 432 con una anchura de banda de frecuencia finita. El detector puede incorporar, preferiblemente, polarización diversa y detección equilibrada dual. La señal del detector puede ser procesada o tratada en el procesador 434 mediante una transformada de Fourier rápida para construir la imagen en profundidad de la muestra. La sonda puede ser explorada por un dispositivo de accionamiento 414 y un excitador 416 de dispositivo de accionamiento, a fin de hacer posible la obtención de una imagen tridimensional de la muestra.

Las Figuras 10A y 10B muestran una vista en planta superior y en perspectiva de otro ejemplo de un filtro sintonizable en longitud de onda. Un elemento óptico 700 de desviación angular de este ejemplo puede ser una disposición poligonal rotativa 24 en la que las facetas del polígono se encuentran en el diámetro interior de un cilindro hueco. Un elemento de dispersión 702, tal como una rejilla de difracción, puede estar colocado en el centro de la disposición poligonal 24. Puede suministrarse luz a la rejilla a través de una fibra óptica y ser colimada sobre la rejilla de tal modo que cada componente de frecuencia de la luz es difractada a través de un ángulo diferente ( $\Theta$ ). Sólo un intervalo estrecho de frecuencias puede ser sustancialmente ortogonal a una de las facetas de la disposición poligonal 24 y, por lo tanto, dicho intervalo de frecuencias puede ser reflejado de vuelta a la rejilla de difracción y recogido por la fibra óptica 704/706. Cuando el cilindro gira, una dirección normal a la superficie para la faceta de la disposición poligonal iluminada puede alinearse con un nuevo intervalo de frecuencias estrecho. Puede conseguirse, por tanto, al hacer girar el cilindro, la sintonización en frecuencia. Cuando el ángulo de rotación del cilindro se hace grande, una faceta adyacente de la disposición poligonal 24 puede quedar alineada con la luz difractada procedente de la rejilla, y el filtro repetirá otro ciclo de sintonización en frecuencia. El intervalo espectral libre y la finura pueden ser controlados mediante la elección apropiada del diámetro del polígono, del número de facetas, del diámetro del haz colimado y de la densidad de ranuras de la rejilla de difracción.

Lo anterior ilustra meramente los principios de la invención. Serán evidentes para los expertos de la técnica diversas modificaciones y alteraciones de las realizaciones descritas, a la vista de las enseñanzas aquí contenidas. Por ejemplo, la invención que aquí se describe es utilizable con los métodos, sistemas y aparatos ejemplares descritos en la Solicitud de Patente norteamericana N° 60/514.769.

# ES 2 310 744 T3

## REIVINDICACIONES

1. Una disposición de fuente para proporcionar una radiación electromagnética, que comprende:
- 5 al menos un emisor (2) de la radiación electromagnética;
- al menos una disposición (4) de separación espectral, configurada para separar angularmente una o más componentes de la radiación electromagnética basándose en la frecuencia de la radiación electromagnética;
- 10 al menos una disposición óptica (24) de desviación angular, que incluye un punto de pivote y configurada para recibir las una o más componentes de la radiación electromagnética, a fin de generar al menos una señal asociada con las una o más componentes; y
- 15 al menos una disposición (20, 22) de formación de imagen óptica, configurada para recibir directamente de la disposición de separación espectral las una o más componentes de la radiación electromagnética, y generar una imagen de uno o más elementos dispersivos de la al menos una disposición de separación espectral asociada con las una o más componentes, hacia la disposición óptica de desviación.
- 20 2. La disposición de fuente de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende adicionalmente al menos una cavidad de láser que recibe la radiación electromagnética.
3. La disposición de fuente de acuerdo con la reivindicación 2, en la cual la cavidad de láser es una cavidad de láser en anillo.
- 25 4. La disposición de fuente de acuerdo con las reivindicaciones 1, 2 ó 3, en la cual la radiación electromagnética tiene un barrido de frecuencia que efectúa continuamente un barrido en un sentido de longitud de onda positivo.
5. La disposición de fuente de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende adicionalmente un dispositivo de circulación óptico.
- 30 6. La disposición de fuente de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la cual los intervalos de longitud de onda del al menos un medio de ganancia de láser no son idénticos entre sí.
- 35 7. La disposición de fuente de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la cual el al menos un emisor es capaz de modificar una frecuencia media de un espectro de la radiación electromagnética de forma sustancialmente continua a lo largo del tiempo, a una velocidad de sintonización que es mayor que 100 terahercios por milisegundos.
- 40 8. La disposición de fuente de acuerdo con la reivindicación 7, en la cual la frecuencia media cambia repetidamente a una cadencia o velocidad de repetición que es mayor que 5 kilohercios.
9. La disposición de fuente de acuerdo con la reivindicación 7 ó la reivindicación 8, en la cual la frecuencia media cambia a lo largo de un intervalo que es mayor que 10 terahercios.
- 45 10. La disposición de fuente de acuerdo con la reivindicación 9, en la cual el espectro tiene un intervalo de sintonización cuyo centro está centrado aproximadamente en 1.300 nm.
11. La disposición de fuente de acuerdo con la reivindicación 9, en la cual el espectro tiene un intervalo de sintonización cuyo centro está centrado aproximadamente en 850 nm.
- 50 12. La disposición de fuente de acuerdo con la reivindicación 9, en la cual el espectro tiene un intervalo de sintonización cuyo centro está centrado aproximadamente en 1.700 nm.
13. La disposición de fuente de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 12, en la cual el espectro tiene una anchura de línea instantánea que es más pequeña que 100 gigahercios.
- 55 14. La disposición de fuente de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 13, que comprende adicionalmente una cavidad de láser con una longitud de recorrido de ida y vuelta más corta que 5 m, que recibe la radiación electromagnética.
- 60 15. La disposición de fuente de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 14, que comprende adicionalmente una disposición poligonal que está concebida para recibir al menos una señal que está asociada con la radiación electromagnética emitida, y al menos uno de entre reflejar y desviar la al menos una señal hacia una posición adicional.
- 65 16. La disposición de fuente de acuerdo con la reivindicación 1, en la cual el al menos un elemento óptico de desviación angular es al menos uno de entre un escáner de espejo poligonal, un escáner de espejo de galvanómetro y un escáner de espejo piezoeléctrico.

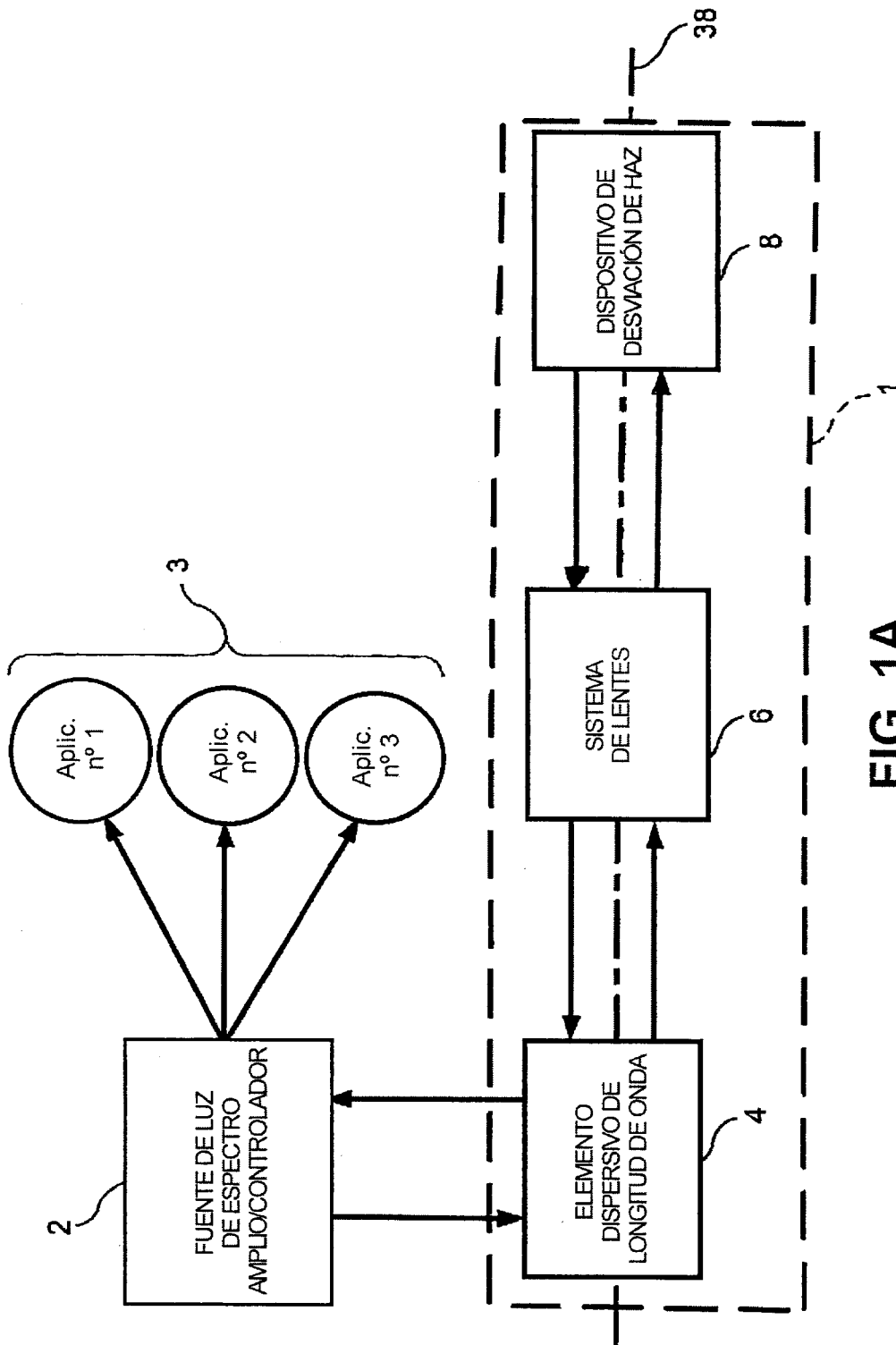


FIG. 1A

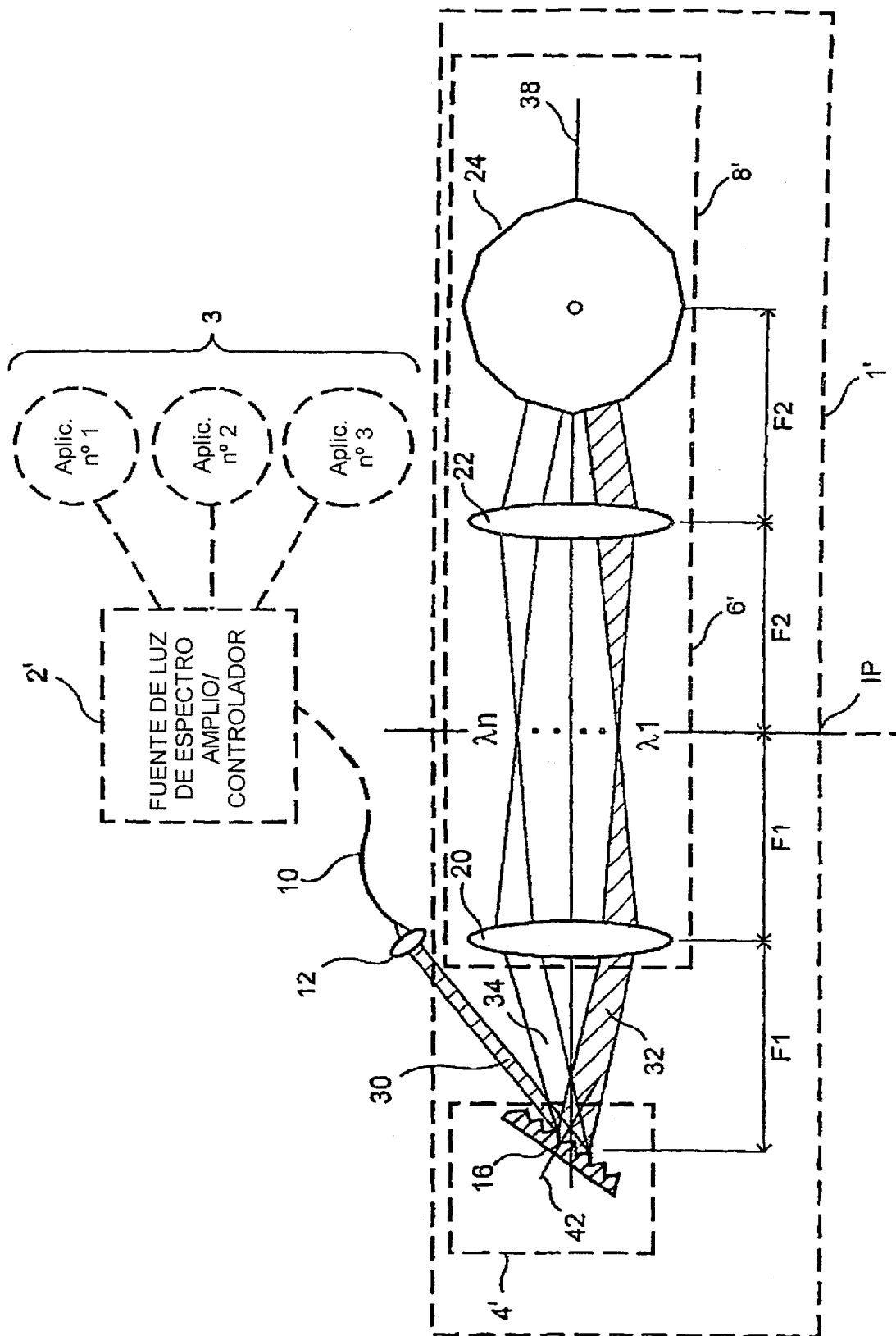


FIG. 1B

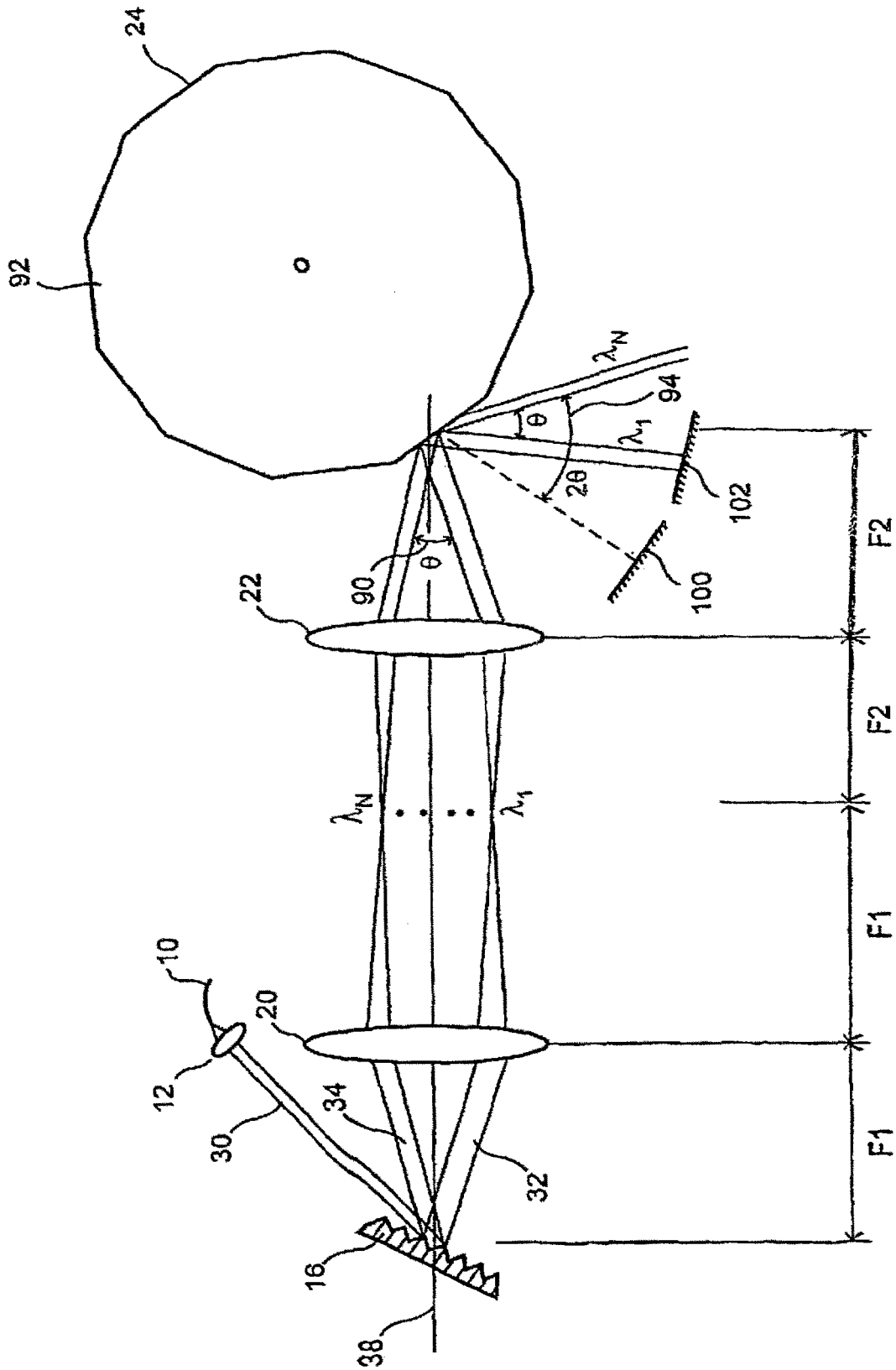


FIG. 1C

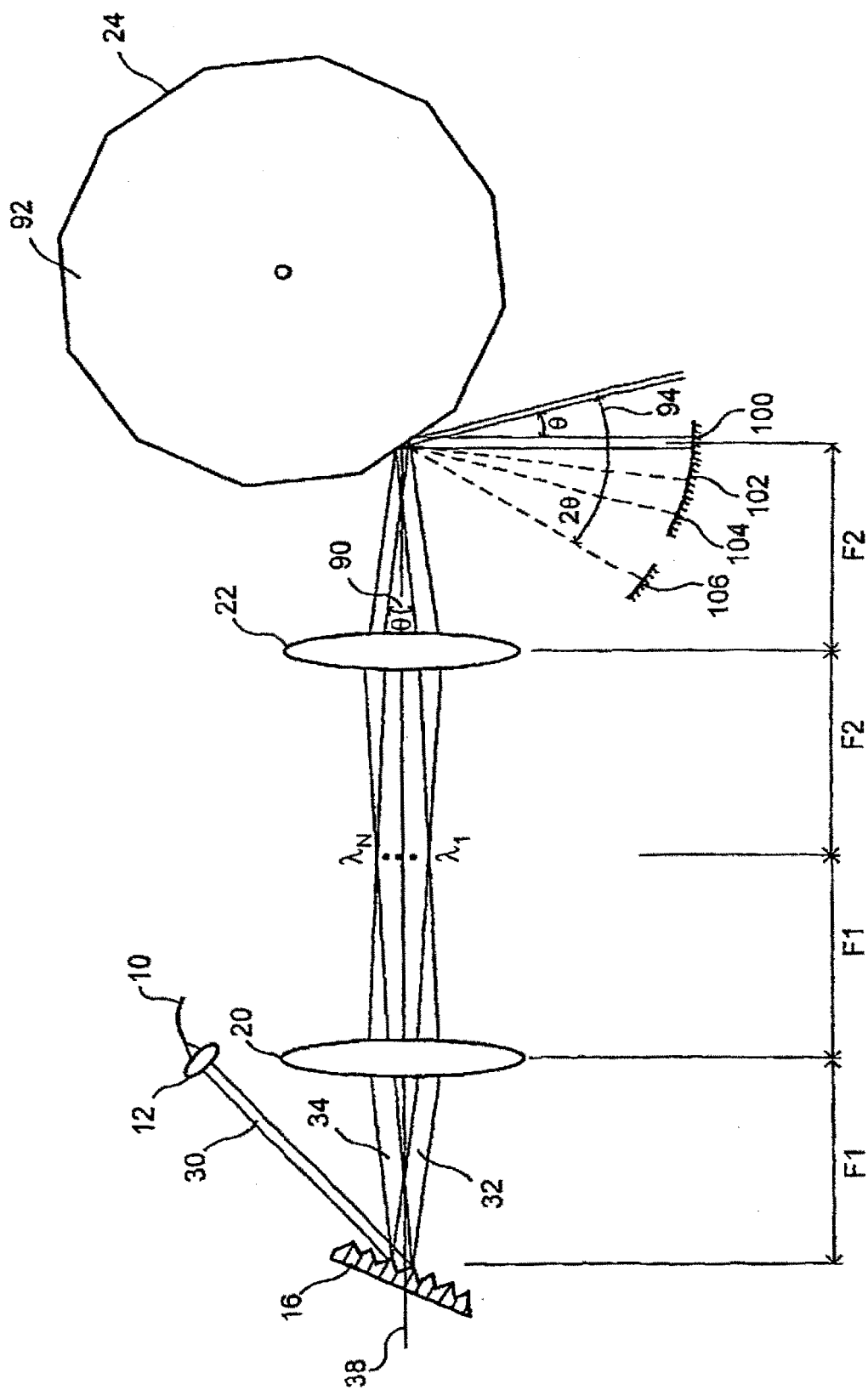


FIG. 1D

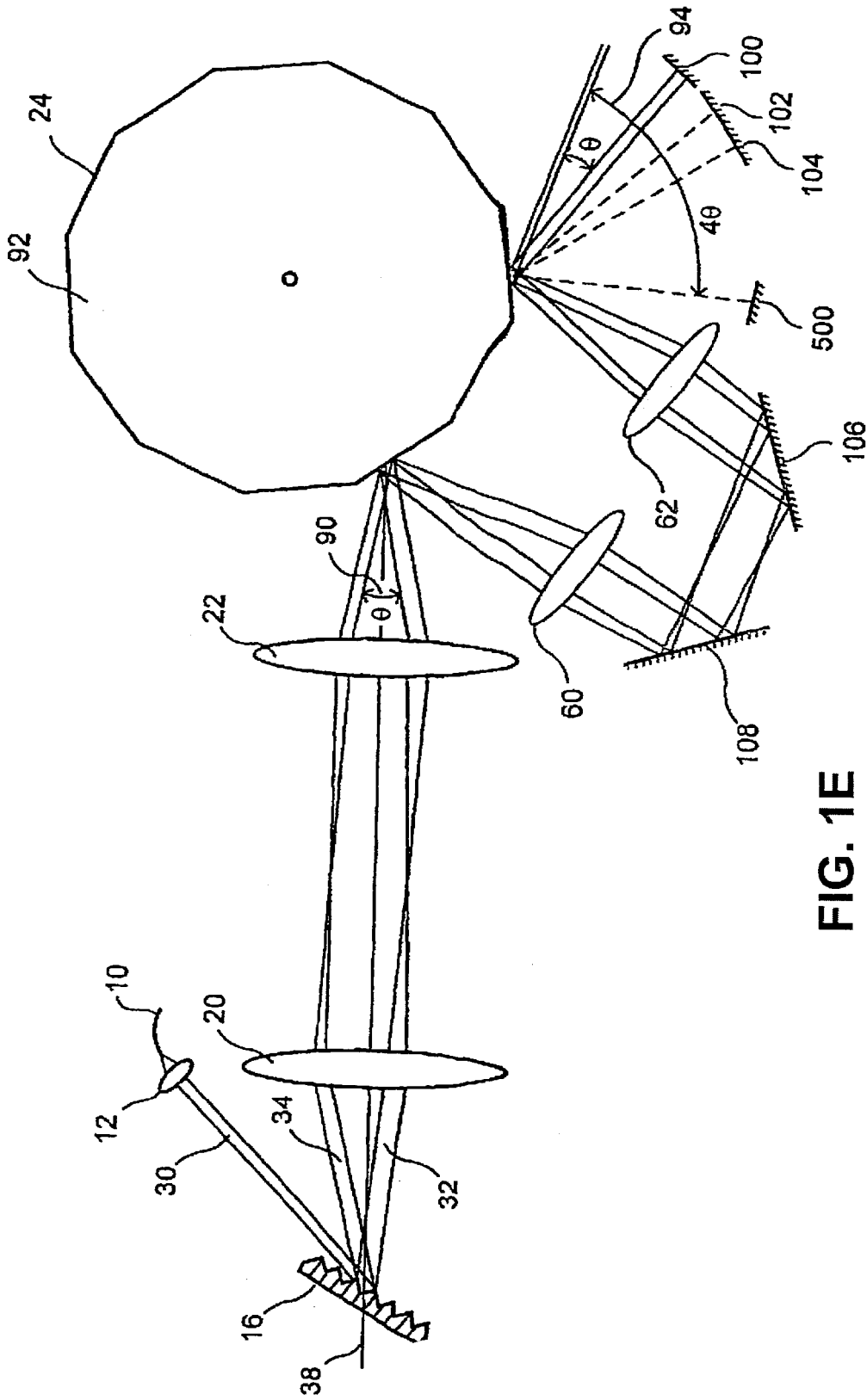


FIG. 1E

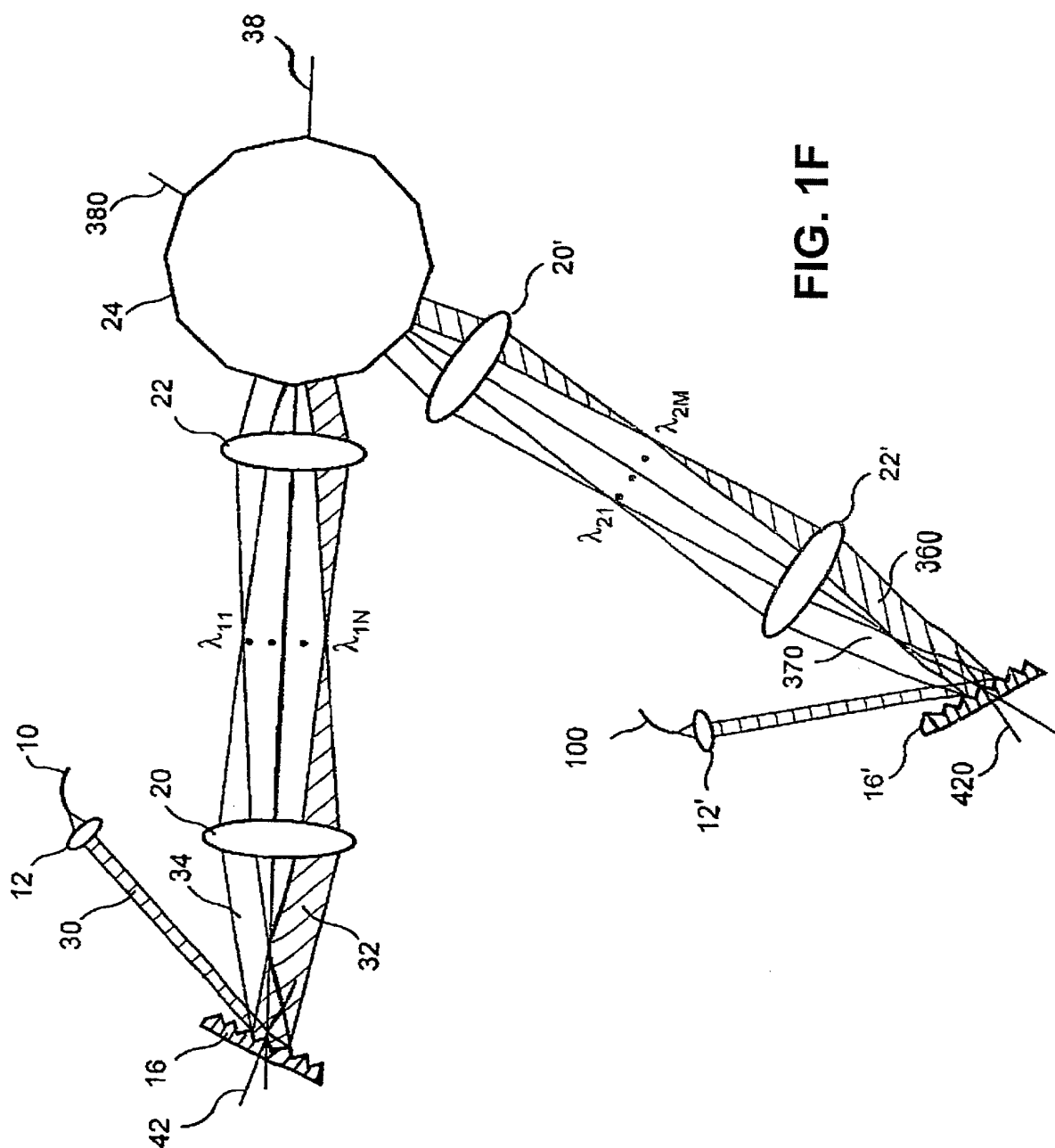


FIG. 1F

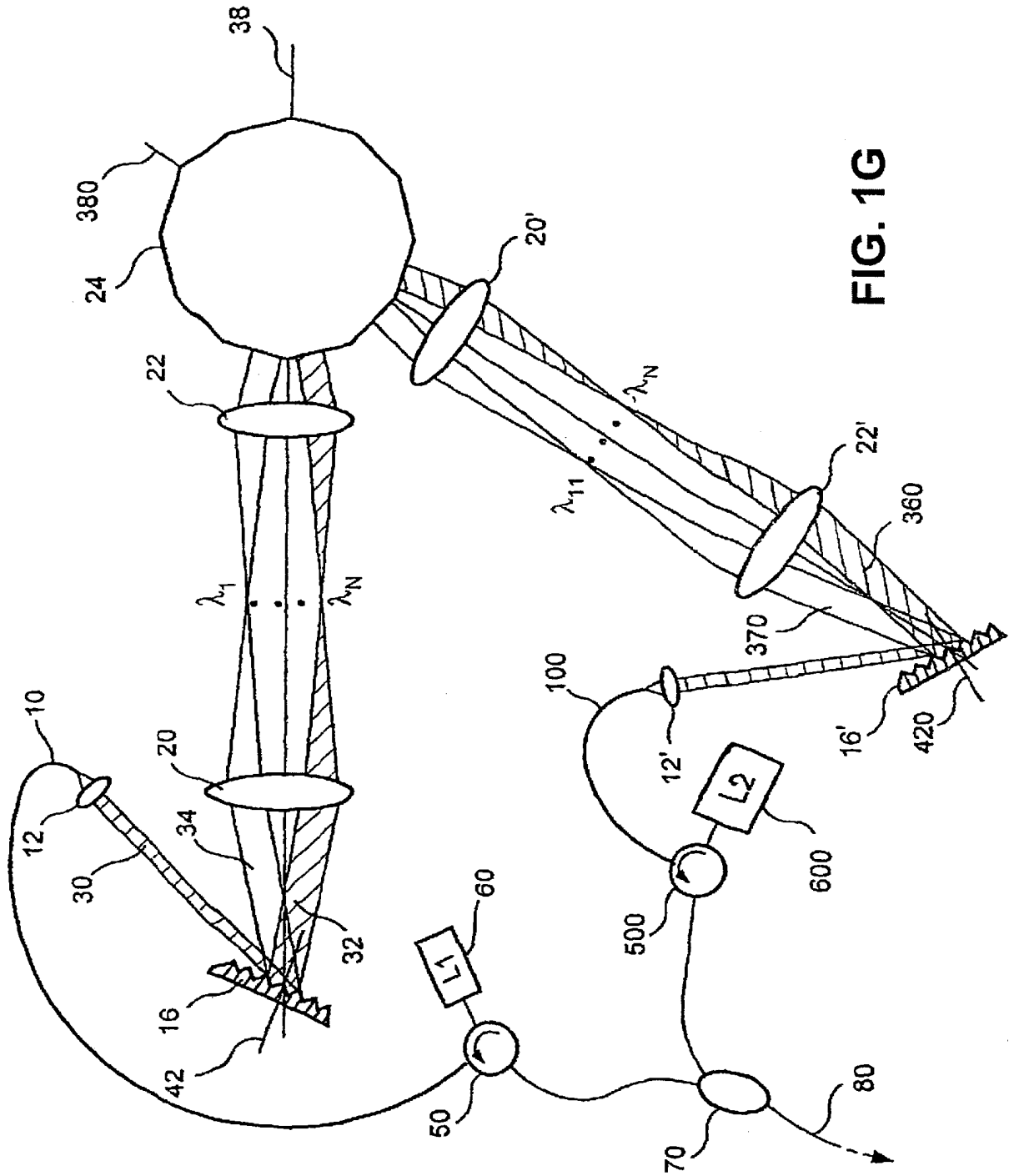


FIG. 1G

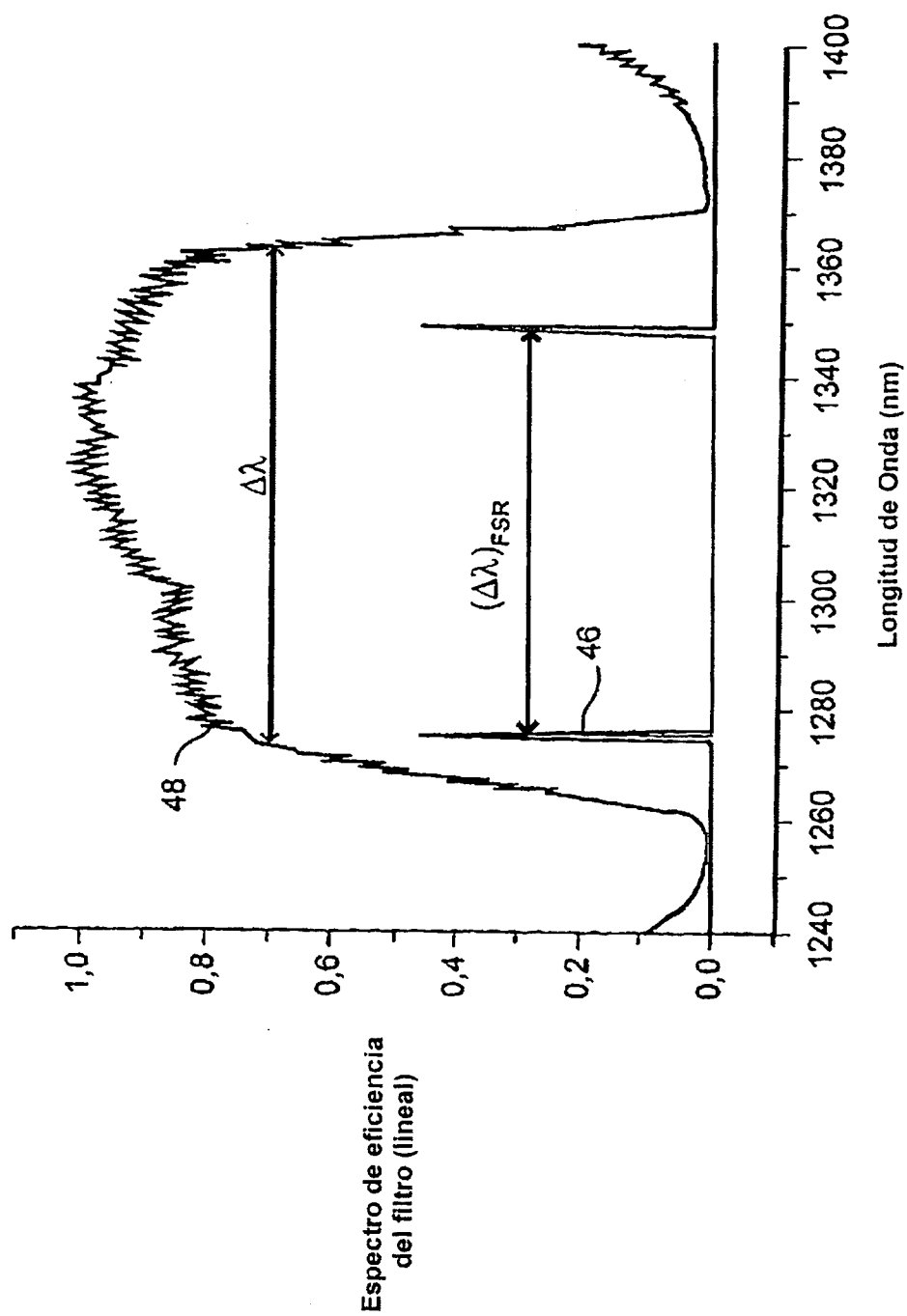


FIG. 2

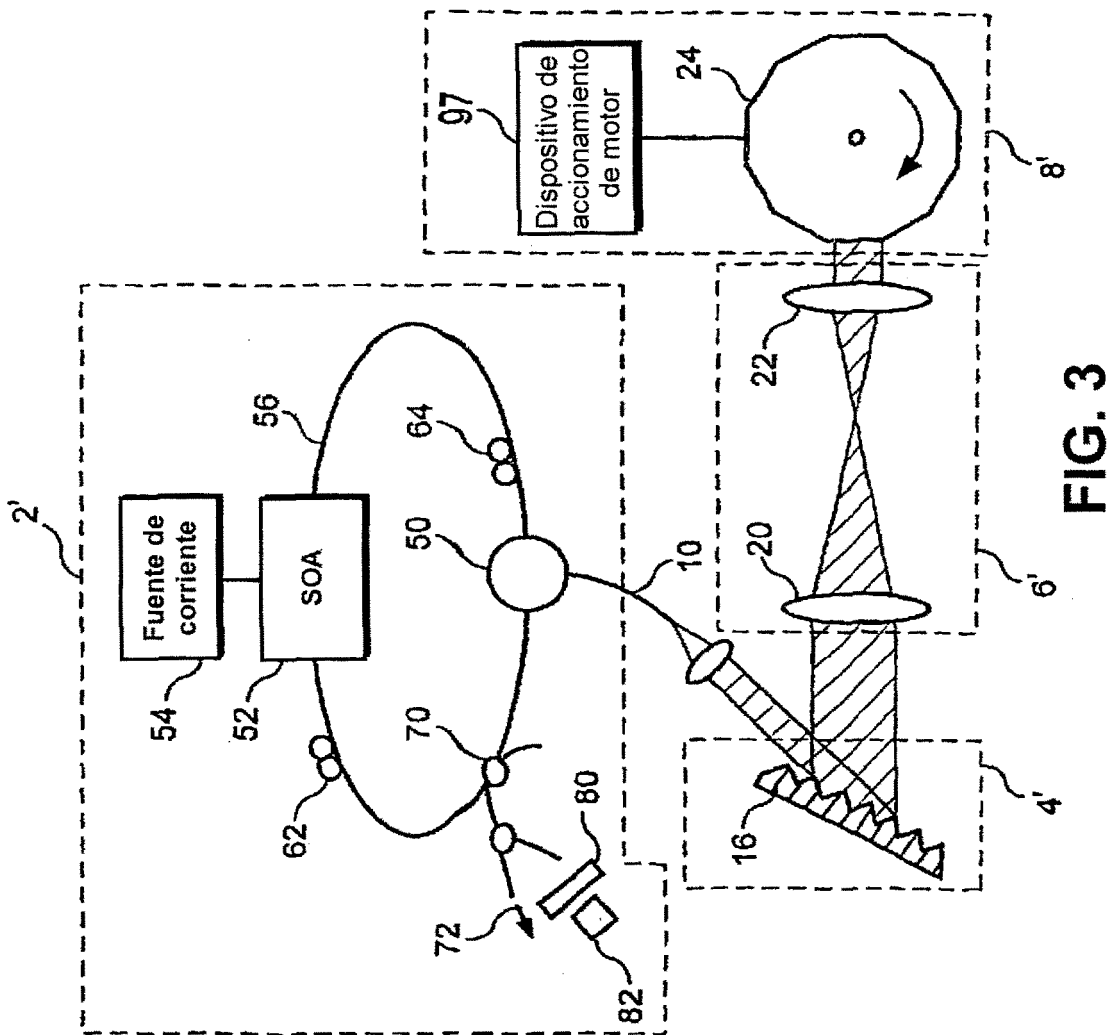


FIG. 3

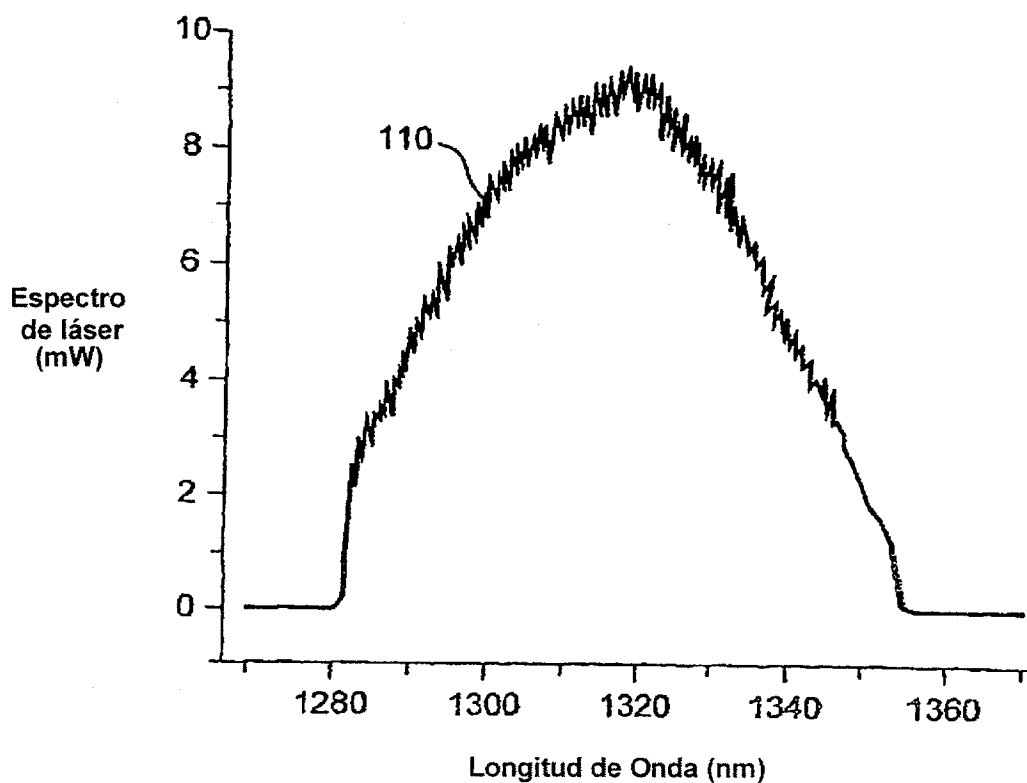


FIG. 4A

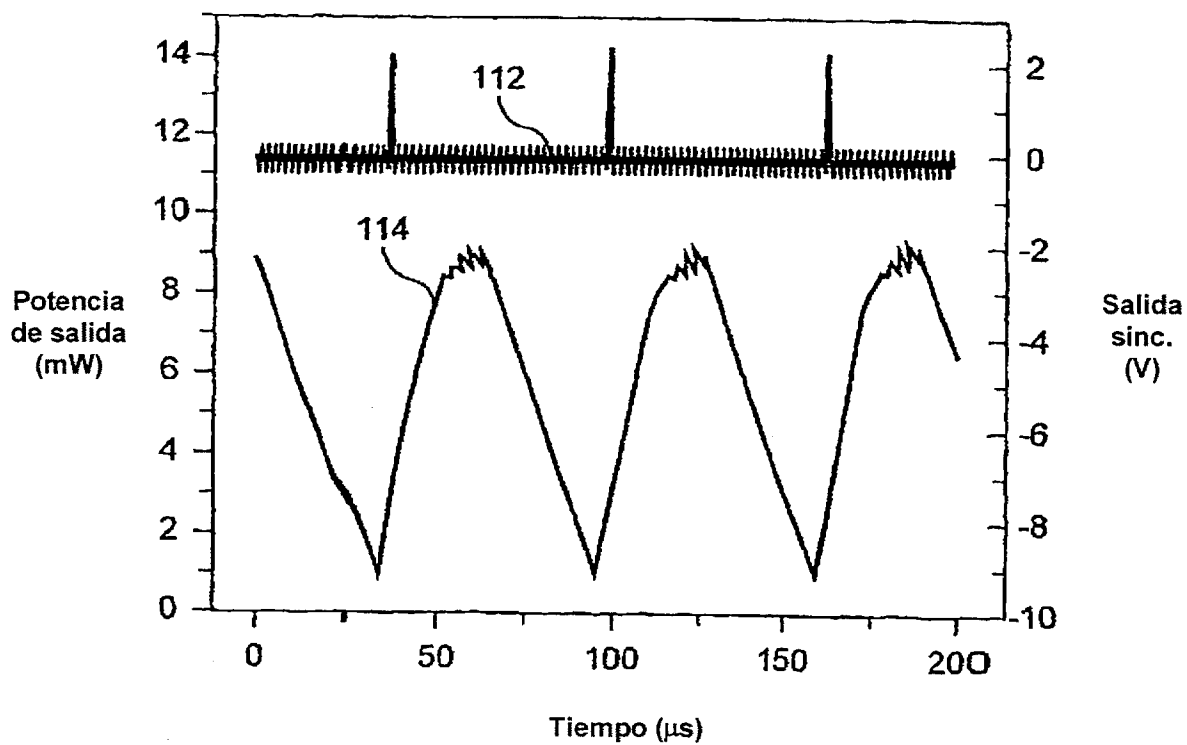


FIG. 4B

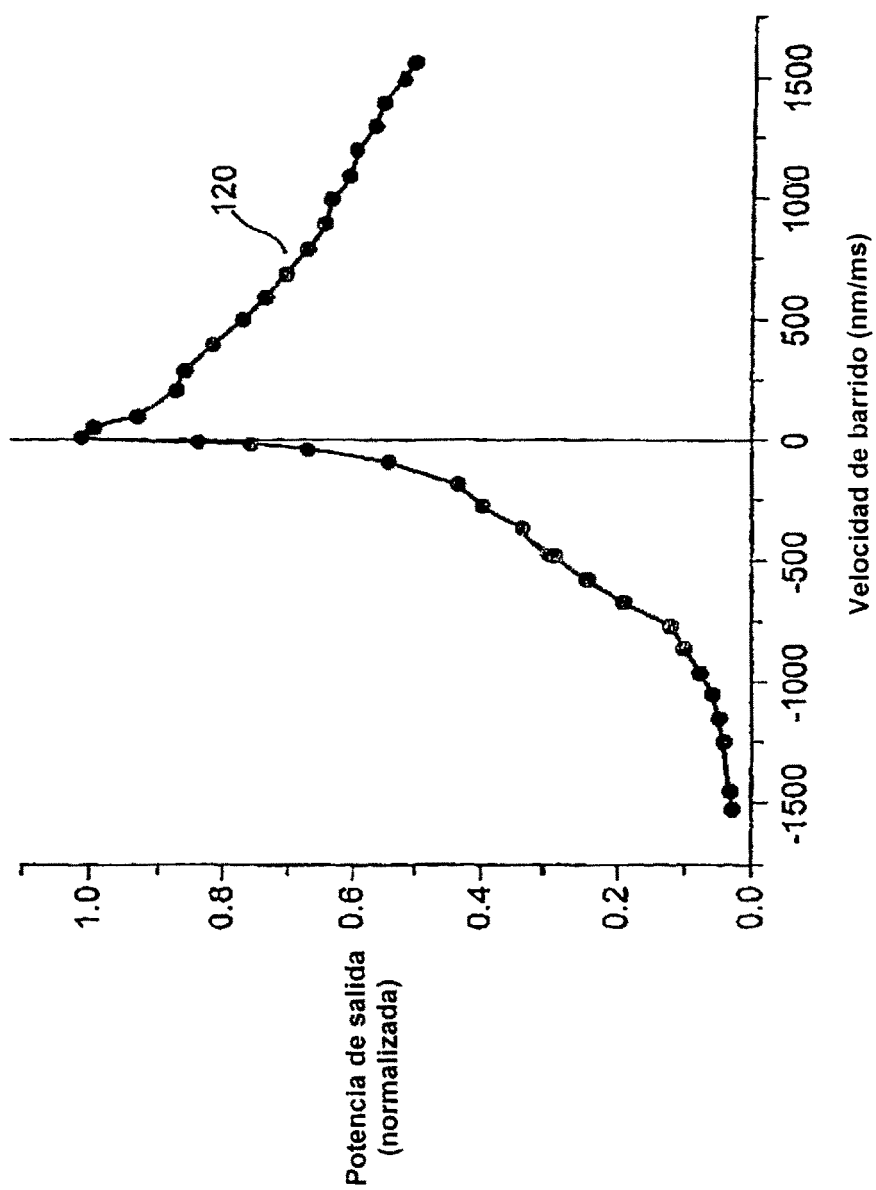


FIG. 5

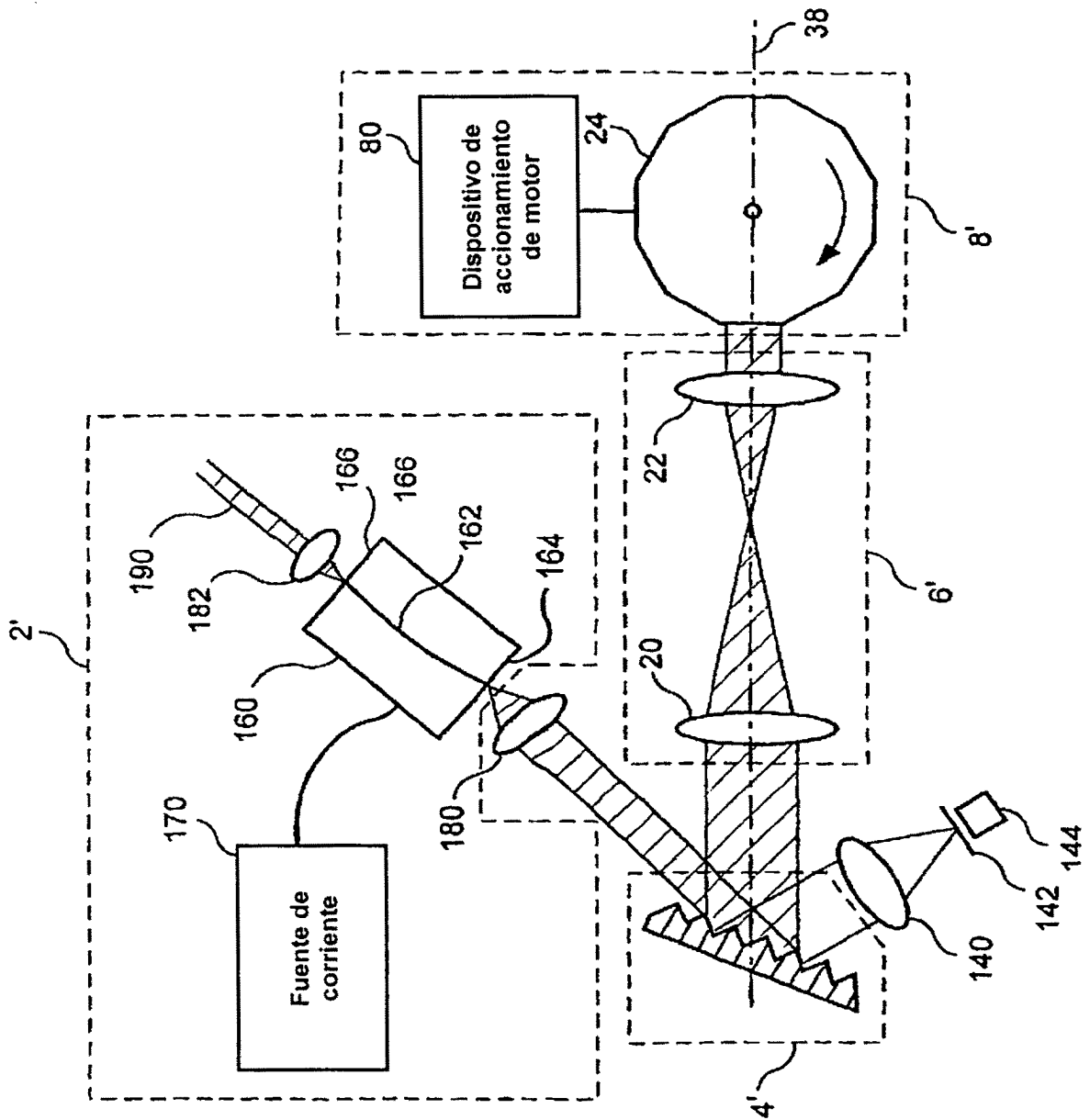


FIG. 6

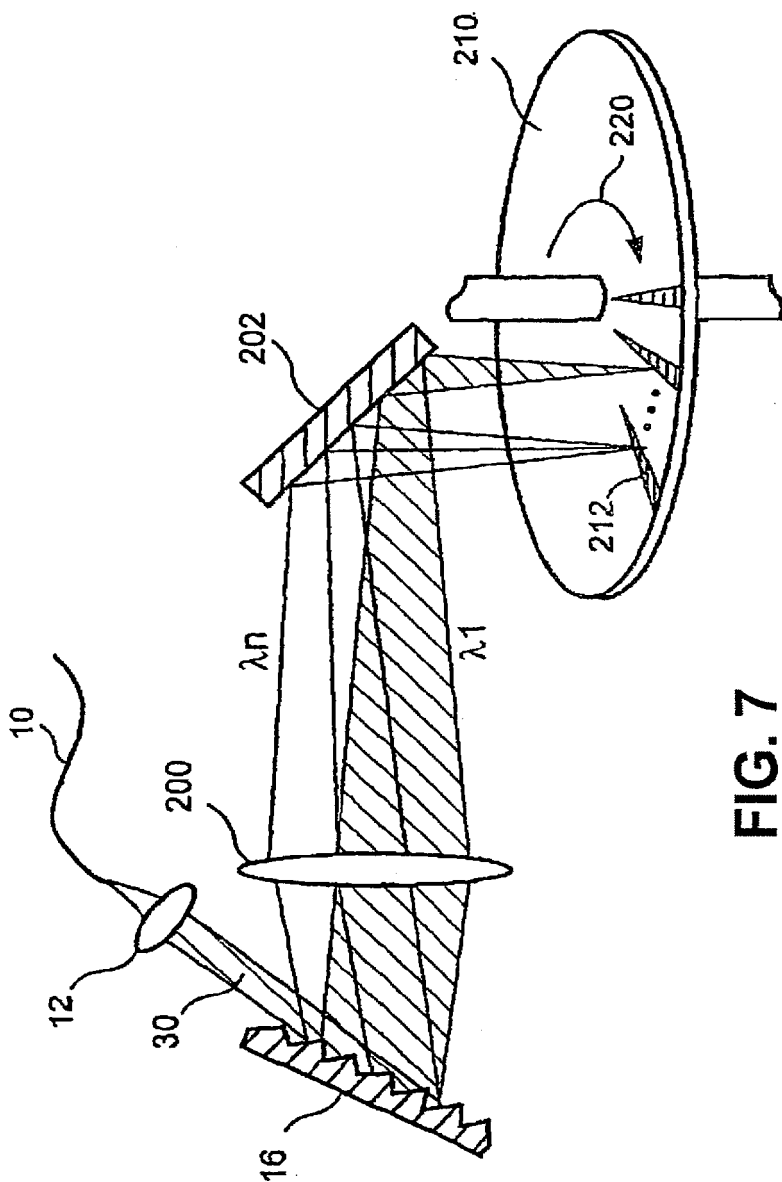


FIG. 7

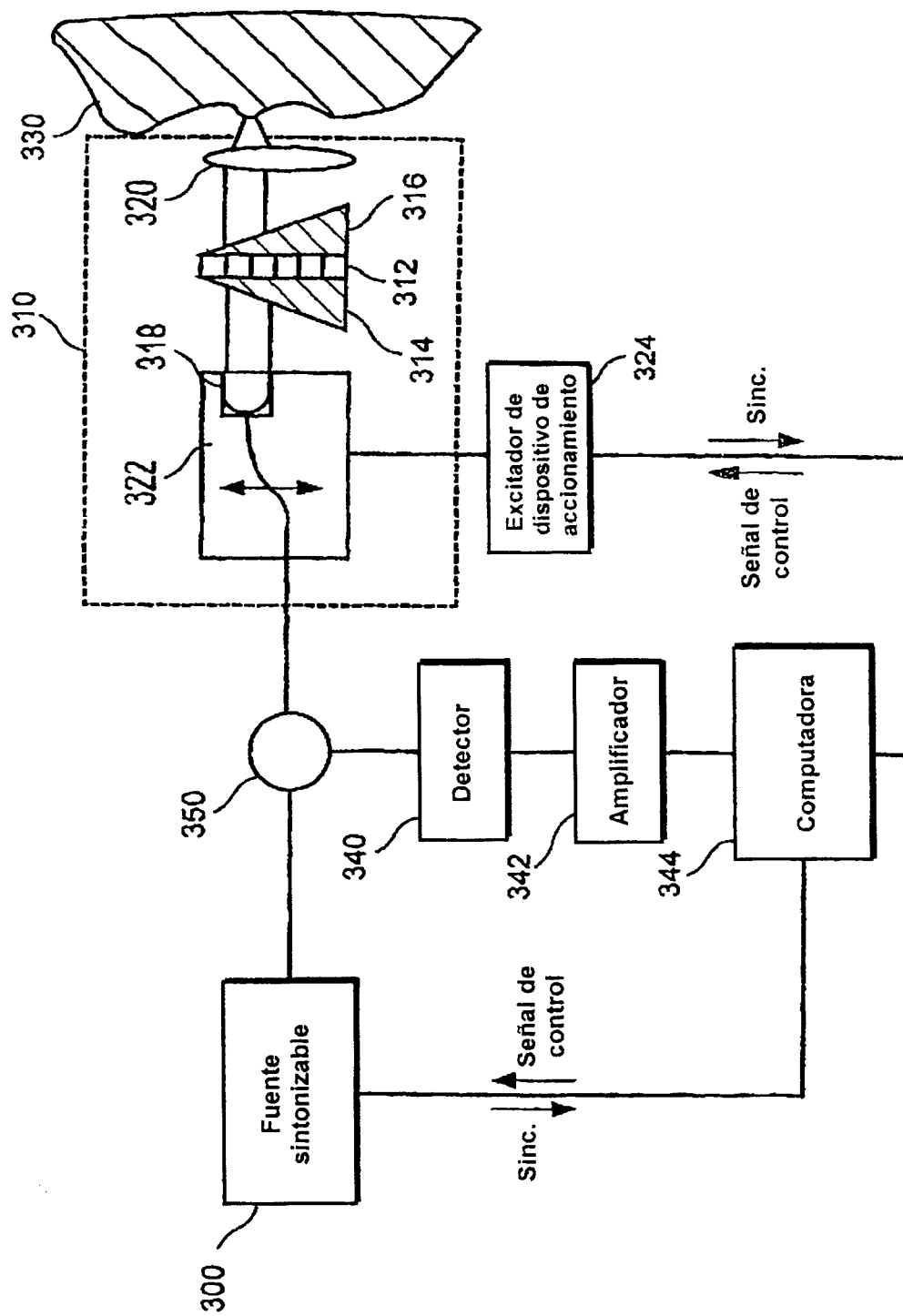


FIG. 8

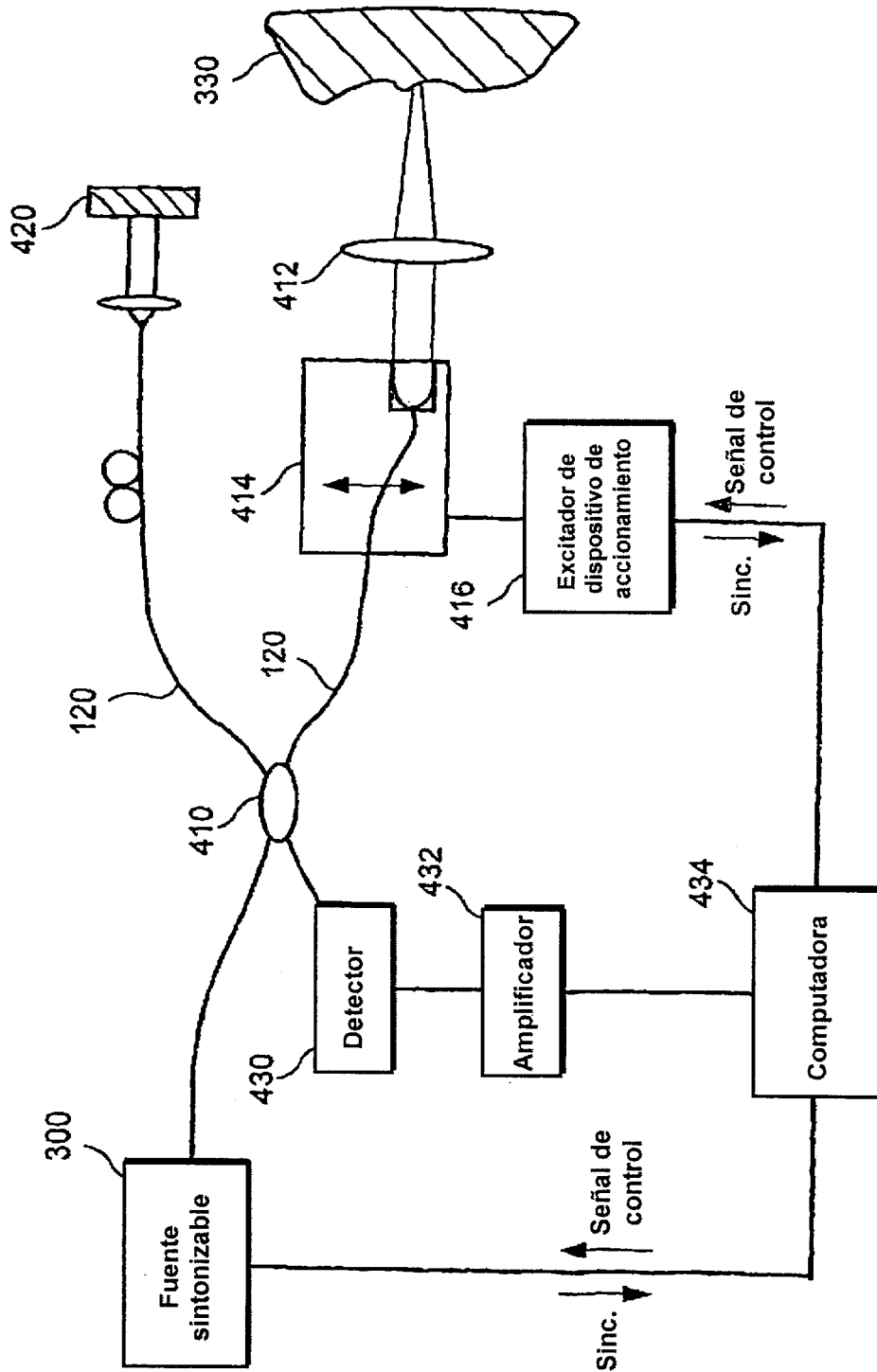


FIG. 9

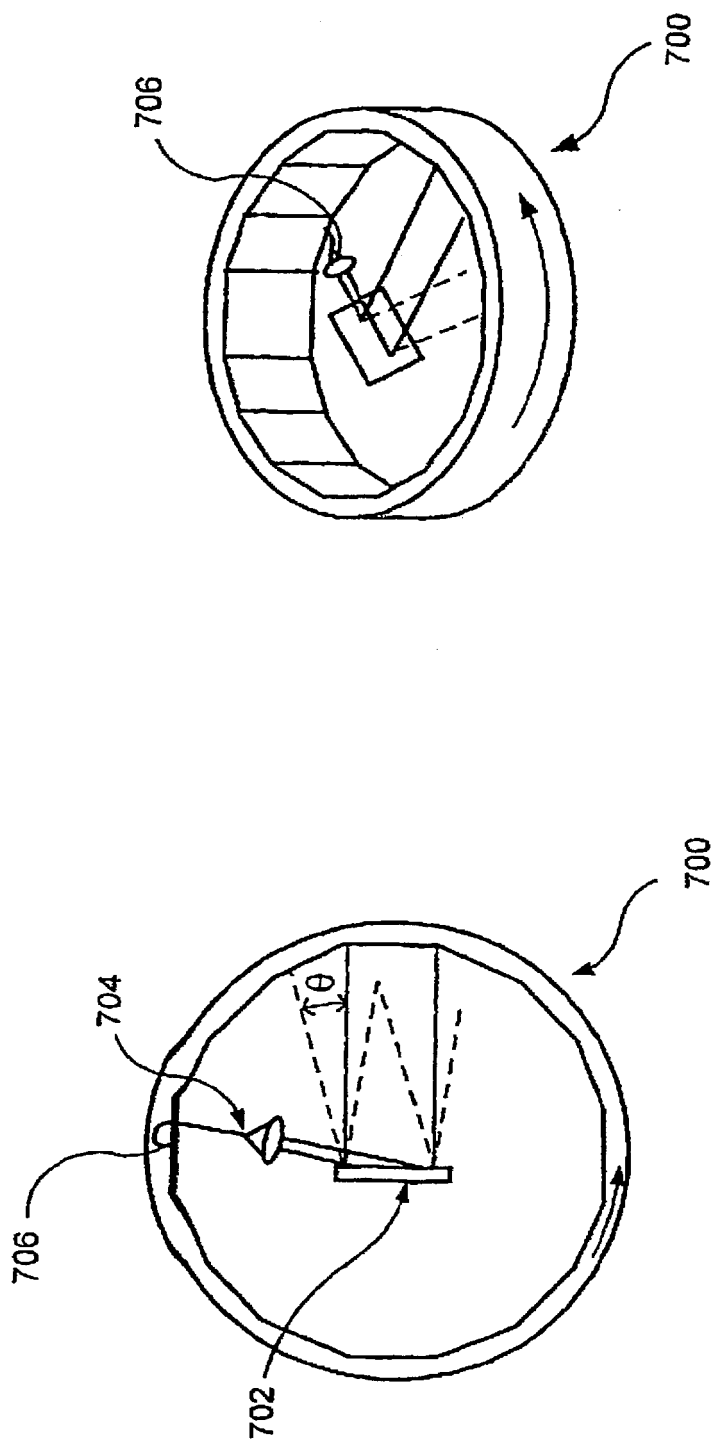


FIG. 10B

FIG. 10A