

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 729 257**

51 Int. Cl.:

H01S 5/14 (2006.01)

H01S 5/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.12.2009 PCT/GB2009/002880**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.06.2010 WO10070272**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.12.2009 E 09799373 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.05.2019 EP 2377212**

54 Título: **Dispositivo láser de frecuencia sintonizable**

30 Prioridad:

18.12.2008 GB 0823084

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

31.10.2019

73 Titular/es:

**RENISHAW PLC (100.0%)
New Mills Wotton-Under-Edge
Gloucestershire GL12 8JR, GB**

72 Inventor/es:

**MCMURTRY, DAVID, ROBERTS y
HOLLOWAY, ALAN, JAMES**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 729 257 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

Dispositivo láser de frecuencia sintonizable

La presente invención se relaciona con un dispositivo láser de frecuencia controlable. En particular, la invención se refiere a un dispositivo láser de frecuencia controlable que es capaz de ser modulado o gorjeado a una alta frecuencia.

Se conocen dispositivos láser con gorjeo de frecuencia (*chirp*) que se emplean en interferometría y similares. En particular, se conocen dispositivos láser que implementan un denominado esquema de Littrow en donde la cavidad de láser incluye una red de difracción a la cual se dirige la luz colimada. La inclinación de la red de difracción permite que la frecuencia y la longitud de cavidad del láser se alteren simultáneamente para proporcionar la sintonización de frecuencia requerida sin salto de modo. La disposición de Littrow presenta, sin embargo, la desventaja de que la red de difracción se debe rotar alrededor de un punto de pivote bien definido. La disposición mecánica críticamente estable requerida para proporcionar la precisión necesaria de movimiento de red dificulta, por lo tanto, la obtención de velocidades de modulación de frecuencia alta.

El documento US6049554 describe varios ejemplos de cavidades de láser basadas en el esquema de Littrow mencionado más arriba y el esquema de Littman similar. En particular, el documento US6049554 describe en forma detallada cómo el punto de pivote para una red de difracción o espejo pueden ser derivados matemáticamente para proporcionar el cambio sincrónico en la frecuencia de láser y en la longitud de cavidad que permita que la frecuencia de salida sea cambiada sin introducir efectos de salto de modo no deseados.

El documento US 2004/0109487 describe una disposición óptica en la que se logra una sintonización sin salto de modo utilizando un prisma y un filtro montados en una plataforma que es se mueve en vaivén. La solicitud US 2006/0109872 describe un dispositivo que proporciona un efecto de sintonización alterando el ángulo de incidencia de luz sobre una red de difracción, lo que excita distintos modos.

Según la presente invención, se proporciona un dispositivo láser de frecuencia sintonizable según la reivindicación 1. Las características preferidas se encuentran detalladas en las reivindicaciones dependientes.

Los presentes inventores han reconocido que una desventaja de los láseres de frecuencia sintonizable conocidos basados en los esquemas de Littrow y Littman es que el movimiento pivotante del componente móvil (por ejemplo, la red de difracción o el reflector posterior que controla el ángulo de incidencia de luz sobre la red de difracción) debe ser controlado con mucha precisión. Cualquier movimiento del punto de pivote que cause una inclinación o traslación incontrolable del componente móvil provoca que la longitud de cavidad y la frecuencia de sintonización se salgan de sincronización; ello puede derivar en que ocurran efectos de salto de modo no deseados durante la sintonización. En dispositivos de la técnica anterior, el punto alrededor del cual pivota el componente móvil es, por lo tanto, controlado empleando disposiciones de control de movimiento de alta precisión (por lo tanto, de un coste relativamente alto). La vida útil de dicho aparato de control de movimiento también puede ser algo limitada.

A diferencia de dispositivos de la técnica anterior, el dispositivo láser de la presente invención está dispuesto de modo que la longitud de trayecto óptico efectiva y la frecuencia de sintonización sean sustancialmente insensibles a cualquier pequeño movimiento de dicho al menos un componente óptico móvil en grados de libertad distintos del primer grado de libertad. Dicho de otro modo, los cambios simultáneos requeridos en la longitud de trayecto y la sintonización de frecuencia surgen, principalmente, del movimiento de un componente óptico en un (es decir, un primer) grado de libertad y toleran cualquier movimiento en otros grados de libertad. Ello presenta la ventaja que el control de movimiento solo se requiere en el primer grado de libertad y que se puede tolerar el movimiento incontrolado en otros grados de libertad. La presente invención ofrece, por lo tanto, la capacidad de emplear un aparato de control de movimiento de menor complejidad (por ejemplo, menos costoso) y/o de accionar el aparato de control de movimiento a una velocidad mayor.

Habiendo reconocido el problema y encontrado la solución descritos más arriba, los inventores han ideado una disposición óptica en la que el control sobre un grado de libertad de un/os componente/s óptico/s móvil/es puede ser utilizado para controlar tanto la longitud de cavidad efectiva y la sintonización de frecuencia proporcionada por el elemento de sintonización espectral.

Es importante destacar que la definición del movimiento de un cuerpo en determinados grados de libertad es bien conocida en mecánica. En particular, el movimiento de un objeto respecto a un punto estático u otro cuerpo (por ejemplo, el movimiento de un componente óptico respecto a la carcasa del dispositivo o un determinado punto fijo en el espacio) puede ser descrito en función de los grados de libertad del objeto. En tres dimensiones, un objeto sin restricciones puede moverse en seis grados de libertad. Estos seis grados de libertad incluyen tres grados de libertad traslacionales (es decir, el objeto puede moverse a lo largo de tres ejes lineales ortogonales entre sí) y tres grados de libertad rotacionales (es decir, el objeto puede cabecear, alabear y guñar). En los esquemas de Littrow y Littman de la técnica anterior, es necesario controlar el movimiento del componente óptico móvil en los seis grados de libertad proporcionando una disposición de pivotante con grandes restricciones. Por el contrario, la presente invención requiere que se proporcione control únicamente en un primer grado de libertad porque el movimiento en

los restantes grados de libertad tiene un efecto reducido, insubstancial o insignificante sobre el cambio en la longitud de cavidad efectiva y la sintonización de frecuencia que surgen del movimiento en el primer grado de libertad.

5 Ventajosamente, el dispositivo láser comprende un accionador para controlar el movimiento de dicho al menos un componente óptico móvil en el primer grado de libertad. El accionador puede proporcionar un control limitado o no proporcionar ningún tipo de control sobre el movimiento del al menos un componente óptico móvil en otros grados de libertad. Se pueden utilizar una serie de distintos accionadores. Por ejemplo, el accionador puede comprender uno o más elementos piezoeléctricos para impartir movimiento lineal a un componente óptico móvil y/o a un motor para rotar un componente óptico móvil. El sistema accionador es preferiblemente simple, fiable y robusto. Por ejemplo, el accionador convenientemente comprende un mecanismo de flexión. Aunque es habitual que los mecanismos de flexión proporcionen un control de movimiento relativamente deficiente, ello puede tolerarse en el dispositivo de la presente invención. Los mecanismos de flexión también tienen la ventaja de ser compactos y altamente fiables. El accionador también puede comprender un sistema mecánico oscilatorio equilibrado o disposición de diapasón como se describe con mayor detalle más abajo.

15 Preferiblemente, el accionador permite un movimiento rápido (por ejemplo, oscilatorio o giratorio) de dicho al menos un componente óptico móvil. Convenientemente, dicho movimiento permite que la modulación de frecuencia de la salida de láser se produzca a una tasa de repetición superior a 5 Hz, más preferiblemente superior a 10 Hz, más preferiblemente superior a 50 Hz, más preferiblemente superior a 100 Hz, más preferiblemente superior a 200 Hz, más preferiblemente superior a 500Hz y más preferiblemente superior a 1KHz. La presente invención facilita dichas altas tasas de repetición altas porque solo es necesario controlar el movimiento del al menos un componente óptico móvil en el primer grado de libertad; el movimiento no controlado del componente óptico móvil en otros grados de libertad que se produce al incrementarse la tasa de repetición tiene un efecto mínimo en el cambio de la longitud de cavidad efectiva y la frecuencia de sintonización relacionada. Dichas tasas de repetición son mucho mayores que en los esquemas de Littman o Littrow de la técnica anterior en los que la tasa de repetición de 1Hz es muy difícil de lograr.

25 Debe tenerse en cuenta que se prefiere que se incluya también un filtro de selección de modo del etalón. Dicho filtro de selección de modo del etalón tiene, preferiblemente, una banda de paso igual o inferior al segmento espectral del etalón. Ello estimula la operación monomodal del láser, pero no es esencial.

A continuación se describirá la invención, a modo de ejemplo únicamente, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que;

- 30 la Figura 1 muestra un láser configurado según el esquema de Littrow de la técnica anterior,
 la Figura 2 muestra un dispositivo láser con gorjeo que comprende un etalón y un espejo trasladable linealmente,
 la Figura 3 muestra un láser con gorjeo alternativo a aquél que se muestra en la Figura 2, que comprende una red de difracción,
 la Figura 4 muestra cómo un espejo puede ser efectivamente trasladado linealmente mediante un giro fuera de eje,
 35 la Figura 5 muestra un mecanismo oscilatorio equilibrado para mover un espejo,
 La Figura 6 muestra un láser con gorjeo alternativo que comprende un etalón y una placa de vidrio móvil,
 la Figura 7 muestra un dispositivo láser de trayecto de haz plegado que incorpora un espejo que es giratorio sobre un eje,
 la Figura 8 muestra un dispositivo láser que tiene una configuración de haz plegado alternativa,
 40 La Figura 9 muestra un láser gorjeado que comprende una lente trasladable linealmente,
 La Figura 10 muestra un dispositivo láser gorjeado que comprende un etalón y una red de difracción,
 la Figura 11 muestra una disposición de láser alternativa que comprende un etalón estático,
 La Figura 12 muestra un láser con gorjeo alternativo que comprende una red de difracción o etalón fijo y un prisma de vidrio inclinable,
 45 La Figura 13 muestra un láser con gorjeo que comprende un etalón fijo y un par de prismas de vidrio inclinables,
 la Figura 14 muestra un láser con gorjeo que comprende un etalón fijo y un par de prismas de vidrio giratorios sobre un eje desalineado respecto al eje óptico,
 la Figura 15 muestra un dispositivo láser con gorjeo alternativo que comprende un par de espejos portados por una carcasa y un etalón fijo,

la Figura 16 muestra un dispositivo láser con gorjeo alternativo que comprende un par de espejos con bisagra y un etalón fijo,

la Figura 17 muestra un láser con gorjeo alternativo que comprende un etalón fijo ubicado entre un par de prismas móviles portados por una disposición oscilatoria de diapason,

5 la Figura 18 muestra una variante del dispositivo de la Figura 17 que comprende una red de difracción combinada con el etalón fijo,

la Figura 19 muestra un bobinador que tiene un par de superficies reflectantes que controlan el paso de luz a través de un etalón fijo,

la Figura 20 muestra un láser con gorjeo que tiene un etalón de cuña giratorio, y

10 la Figura 21 muestra un láser con gorjeo que tiene un etalón de cuña móvil linealmente.

Con referencia a la Figura 1, se ilustra un dispositivo láser con gorjeo de la técnica anterior que implementa el denominado esquema de Littrow para proporcionar una cavidad láser externa. La luz de un diodo 2 láser se colima en una red de difracción 4 por una lente 6. La red de difracción actúa como un elemento selectivo de longitud de onda. Pivotar la red de difracción 4 alrededor del punto 8 de pivote definido permite que tanto la frecuencia de paso y la longitud de cavidad se alteren simultáneamente, lo que permite que la frecuencia de salida del dispositivo láser se cambie sin salto de modo. Pivotar en vaivén la red de difracción permite, por lo tanto, que la frecuencia de la salida de luz proveniente de la cavidad sea gorjeada.

Los dispositivos láser con gorjeo implementados utilizando el esquema de Littrow de la técnica anterior presentan varias desventajas. Por ejemplo, el movimiento pivotante de la red de difracción 4 alrededor del punto 8 de pivote debe ser controlado con precisión. En particular, la red de difracción debe ser pivotada en vaivén sobre el punto 8 de pivote en el plano del dibujo sin ningún movimiento de inclinación o traslación. Un movimiento de inclinación o traslación de este tipo puede introducir efectos de salto de modo debido a que la longitud de trayecto óptico de cavidad de láser se desincroniza con las propiedades de sintonización espectral de la red de difracción. Asimismo, el radio amplio sobre el cual se requiere el movimiento de la red de difracción limita la velocidad en la que pueden lograrse cambios de frecuencia, lo que limita la frecuencia máxima en la que se puede gorjear el dispositivo.

Los presentes inventores han reconocido que los esquemas láser sintonizables de cavidad externa sin salto de modo requieren ajustes simultáneos de la longitud de trayecto óptico de cavidad de láser y un elemento de sintonización espectral. La longitud de onda λ del $m_c^{\text{ésimo}}$ modo de cavidad de láser está dada por:

$$\lambda = \frac{2 n_c L_c}{m_c} \quad (1)$$

30 donde $n_c L_c$ es el trayecto óptico efectivo que atraviesa la cavidad de láser y m_c es un número entero.

Si el elemento de sintonización espectral es una red de difracción en la configuración de Littrow, la longitud de onda del primer orden que regresa difractada por la trayectoria del haz incidente está dada por:

$$\lambda = 2 n_g p_g \text{Sin}(\theta_g) \quad (2)$$

35 donde n_g es el índice de refracción del medio antes de la red, P_g es el período de red y θ_g es el ángulo de incidencia de luz láser en la red.

Si el elemento de sintonización espectral es un etalón en lugar de una red de difracción, la longitud de onda del $m_e^{\text{ésimo}}$ modo del etalón está dada por:

$$\lambda = \frac{2 n_e L_e \text{Cos}(\theta_e)}{m_e} \quad (3)$$

40 donde n_e es el índice de refracción de la cavidad de etalón, L_e es la separación de los espejos del etalón, θ_e es el ángulo de incidencia de luz dentro del etalón y m_e es un número entero.

Igualar las expresiones (1) y (2) proporciona la longitud de trayecto óptico de cavidad de láser como una función del ángulo de incidencia sobre la red de difracción:

$$n_c L_c = m_c n_g p_g \text{Sin}(\theta_g) \quad (4)$$

Igualar las expresiones (1) y (3) proporciona la longitud de trayecto óptico de cavidad de láser como una función del ángulo de incidencia sobre el etalón:

$$n_c L_c = \frac{m_c n_e p_e \cos(\theta_e)}{m_e} \quad (5)$$

Se puede ver en las ecuaciones (4) y (5) que, para un esquema particular, es posible predecir el cambio necesario en la longitud de trayecto óptico del láser para un cambio dado en el ángulo de incidencia sobre la luz en el elemento de sintonización (por ejemplo, en la red de difracción o el etalón). Por lo tanto, a continuación se describen varios esquemas que funcionan cambiando el ángulo de incidencia del haz de láser en un elemento de sintonización espectral (por ejemplo, un elemento difractivo, como por ejemplo una red de difracción o un etalón) mientras que ajustan, simultáneamente, la longitud de trayecto óptico de cavidad de láser nominalmente según las expresiones (4) o (5) anteriores.

Se describirá ahora, respecto a las Figuras 2 a 10, cómo puede proporcionarse un dispositivo láser en el que mover uno de los múltiples componentes ópticos en un primer grado de libertad puede ser utilizado para alterar simultáneamente la longitud de trayecto óptico efectiva de la cavidad de láser y la frecuencia de sintonización del elemento de sintonización espectral para proporcionar sintonización de frecuencia en la que se suprime el salto de modo. En estos ejemplos, la longitud de trayecto óptico efectiva y la frecuencia de sintonización son también sustancialmente insensibles a cualquier movimiento de dicho al menos un componente óptico móvil en grados de libertad distintos del primer grado de libertad.

Con referencia a la Figura 2, se muestra un dispositivo láser con gorjeo. El dispositivo láser con gorjeo comprende un diodo 20 láser, lentes 22, 24 y 26, un etalón 28, un espejo 30 estático y un espejo 32 móvil. Las lentes 24 y 26 se encuentran separadas ventajosamente por la suma de sus longitudes focales para minimizar la separación lateral de los haces de salida y de retorno. La disposición de la Figura 2 forma una cavidad resonante, siendo el espejo 30 estático, el espejo 32 móvil o la faceta posterior del diodo 20 láser parcialmente transmisivos para proporcionar un haz de salida. Como alternativa, puede extraerse luz del dispositivo incluyendo un componente divisor de haz adicional (que no se muestra), a partir de un reflejo del etalón 28 o utilizando espejos 30 y 32 parcialmente reflectantes. La cara anterior del diodo 20 láser puede tener recubrimiento antirreflejo (AR).

La traslación lineal del espejo 32 móvil en la dirección que muestra la flecha 34 altera el ángulo de incidencia de luz en el etalón 28 (lo que altera la frecuencia de la banda de paso del etalón) y simultáneamente altera la longitud de trayecto de la cavidad. La oscilación en vaivén del espejo 32 proporciona, entonces, la salida con gorjeo de frecuencia requerida (alterando la longitud de la cavidad) a la vez que altera simultáneamente la frecuencia de paso del etalón para suprimir el salto de modo.

Es importante destacar que el espejo 32 está ubicado dentro de la profundidad focal de las lentes 22 y 24 y, por lo tanto, cualesquiera otros pequeños movimientos (por ejemplo, inclinación) del espejo 32 tienen un efecto insignificante; es decir, la posición lineal del espejo 32 en la dirección 34 es el único grado de libertad de movimiento que necesita ser controlado con precisión. El rendimiento del dispositivo en la Figura 2 es, por lo tanto, mayormente independiente de las pequeñas inclinaciones y traslaciones en el plano del espejo 32. El espejo 32 también puede ser un componente relativamente pequeño y liviano que puede, por lo tanto, ser trasladado rápidamente en la dirección 34, lo que permite el gorjeo a una frecuencia relativamente alta.

Los presentes inventores también contemplan un número de variantes del dispositivo que se muestra en la Figura 2. Por ejemplo, el diodo 20 láser ilustrado en la Figura 2 puede ser reemplazado por un extremo de fibra óptica o cualquier otro elemento que emita luz láser. También debe destacarse que el ángulo A está dibujado como un ángulo recto en la Figura 2, pero no es necesario que así sea. Para el espejo 32 móvil, cuanto más agudo sea el ángulo A, mayores serán los cambios de trayecto óptico respecto al mismo cambio en la incidencia angular en el etalón 28. Un filtro (que no se muestra) se incluye requiere preferiblemente para favorecer la acción del láser en un único modo del etalón 28; un recubrimiento óptico en cualquiera de las superficies ópticas podría ventajosamente cumplir este fin.

El cambio en el cambio de trayecto óptico de la cavidad de láser puede ser implementado por un desplazamiento de espejo 32 a lo largo de la dirección 34 como se describe más arriba. Dicho cambio en la longitud de trayecto óptico podría también, o como alternativa, ser implementado por uno o más desplazamientos laterales de lente 22, un desplazamiento lateral de lente 24 y un desplazamiento axial del diodo 20 láser. Asimismo, la falta de cuadratura del espejo 30 fijo respecto al eje óptico podría ser utilizada para proporcionar algunos o todos los cambios de longitud de trayecto óptico requeridos; ello se debe al movimiento del punto de reflexión en el espejo. Del mismo modo, podría proporcionarse una placa de vidrio (que no se muestra) entre la lente 24 y la lente 26 para efectuar un cambio de longitud de trayecto óptico.

El cambio en el ángulo de luz que atraviesa el etalón 28 estático puede ser implementado por un desplazamiento normal de espejo 32 en la dirección 34 como se describe más arriba. Dicho cambio en el ángulo podría también, o como alternativa, ser implementado por uno o más de un desplazamiento lateral de lente 22, un desplazamiento

lateral de lente 24 y un desplazamiento lateral de diodo 20 láser. Si la lente 22 y/o la lente 24 están desplazadas linealmente, una compensación lateral inicial podría proporcionar una respuesta más lineal (menos parabólica) para un desplazamiento lateral determinado. Del mismo modo, la sintonización del etalón 28 puede ser seleccionada de modo que sea más lineal (menos parabólica) con el ángulo de incidencia de luz proporcionándole una rotación inicial (como se ilustra en la Figura 2).

Con referencia a la Figura 3, se ilustra una variante del dispositivo láser con gorjeo que se muestra en la Figura 2. El dispositivo comprende una red de difracción 42 en lugar del etalón 28, una lente 26 y un espejo 30 que se proporcionan en el dispositivo de la Figura 2. Un efecto similar es, por lo tanto, proporcionado utilizando las propiedades dependientes de la longitud de onda de la red de difracción 42 en lugar de un etalón. Aunque se muestra una red de difracción 42, podría incluirse cualquier elemento difractivo con un orden difractivo adecuadamente fuerte. Para la disposición de la Figura 3, una salida láser también podría ser proporcionada por un orden de difracción reflejado o transmitido proveniente de la red de difracción 42.

Con referencia a la Figura 4, se muestra una técnica diferente para mover los espejos móviles de los sistemas descritos con referencia a las Figuras 2 a 3. En lugar de trasladar el espejo en vaivén, el espejo 60 se monta a un árbol 62 giratorio. El plano del espejo 60 de superficie está dispuesto de modo no perpendicular al eje de la rotación del árbol 62. Dicho de otro modo, el ángulo θ que se muestra en la Figura 4 es superior a 0° ; se establece este ángulo para brindar la magnitud deseada de desplazamiento lineal del espejo en un determinado radio de espejo.

Con referencia a la Figura 5, se muestra una técnica adicional para mover el espejo móvil de los sistemas descritos con referencia a las Figuras 2 a 3. La luz proveniente de una fuente 180 láser se focaliza en un primer espejo 195 por la lente 184. El primer espejo 195 y un segundo espejo 196 están montados en un miembro 197 oscilatorio. El miembro 197 puede ser accionado para resonar con el fin de mover acercando y alejando al primer y al segundo espejo 195 y 196 uno respecto al otro en sincronía. Una cara reflectante del primer espejo 195 está ubicada en el trayecto óptico de modo que la oscilación del primer espejo 195 altere tanto la dirección de haz que atraviesa el etalón 188 y la longitud de trayecto óptico efectiva de la cavidad. El segundo espejo 196 se proporciona meramente como equilibrador mecánico y por lo tanto podría, por lo tanto, ser reemplazado por un componente no óptico o contrapeso. Una segunda lente 198 también se incluye dentro del trayecto óptico de la cavidad de láser junto con un espejo 194.

Con referencia a la Figura 6, se ilustra una variante transmisiva de las disposiciones reflectantes de las Figuras 2 a 5. En lugar del espejo 32 móvil que se muestra en la Figura 2, la disposición de la Figura 6 incluye una placa 64 de transmisión de vidrio inclinable ubicada cerca del foco del haz óptico. El cambio en el ángulo de luz que atraviesa el etalón 28 puede ser afectado por la rotación de la placa 64 sobre un eje sustancialmente normal al plano del diagrama. Dicha rotación también puede proporcionar el cambio de longitud de trayecto requerido; ello puede surgir a partir de cambios en la longitud de trayecto efectiva que atraviesa la placa 64 misma y/o de cambios en el ángulo o posición del haz de luz incidente a otros componentes ópticos (por ejemplo, el etalón 28) debido al efecto de orientación de la placa 64. De esta manera, el movimiento giratorio de la placa 64 de vidrio alrededor de un eje puede controlar las propiedades selectivas de tanto la longitud de trayecto como la longitud de onda del etalón. El sistema es, por lo tanto, en gran parte independiente de las pequeñas traslaciones de la placa 64 de vidrio y se inclina sobre el normal de superficie. Las inclinaciones sobre el otro eje en el plano son en gran parte parabólicas y, por lo tanto, ineficaces para el sistema.

Debe destacarse que el efecto de inclinar la placa 64 de vidrio puede ser seleccionado de modo que sea más lineal (menos parabólico) proporcionándole una rotación inicial respecto al normal al eje óptico (como se ilustra en el diagrama). Asimismo, uno o más componentes ópticos adicionales (que se no muestran) se pueden incluir para corregir cualquier astigmatismo introducido por la placa 64 de vidrio.

La Figura 7 ilustra un ejemplo adicional en la forma de una cavidad de láser de tipo de anillo en la que se disponen cuatro espejos 220 estáticos de modo que proporcionen un trayecto óptico plegado. Una fuente 222 láser y una lente 224 dirigen luz hacia una primera superficie de un espejo 232 giratorio. La luz que se refleja desde la primera superficie del espejo 232 sigue un trayecto en sentido horario alrededor de los cuatro espejos 220 antes de reflejarse desde la segunda superficie del espejo 232 (o desde la cara posterior de la primera superficie del espejo 232) y, posteriormente, pasar al espejo 234 de retorno. La luz que se refleja desde el espejo 234 de retorno regresa por el trayecto óptico en sentido antihorario hacia la fuente 222 láser. Un etalón 230 está ubicado en el trayecto óptico.

El espejo 232 giratorio está dispuesto de modo que gire en un grado de libertad alrededor de un eje (por ejemplo, el eje R que se muestra en la Figura 7) que es en esencia perpendicular a su normal de superficie. El ángulo del haz que atraviesa el etalón 230, por lo tanto, cambia con el giro del espejo 232, pero, debido a la reflexión proveniente de la segunda superficie del espejo 232, el ángulo de incidencia sobre el espejo 234 de retorno no cambia. En el presente ejemplo, el espejo 232 giratorio tiene un par de caras reflectantes paralelas; esto es ventajoso porque cualquier traslación del espejo 232 no afecta, por lo tanto, al sistema. Los giros sobre el normal de la superficie del espejo 232 giratorio no tienen efecto alguno y el giro sobre otros ejes tiene una pequeña sensibilidad parabólica. El trayecto óptico de cavidad, por lo tanto, cambia junto con el ángulo de incidencia de luz sobre el etalón 230 a medida que gira el espejo 232. Un cambio adicional de longitud de trayecto puede ser proporcionado permitiendo la

propagación de haz dentro del espejo 232 o incluyendo un componente fijo, como por ejemplo una placa de vidrio (que no se muestra) antes del espejo 234 de retorno.

5 Cualquiera de las superficies estáticas (por ejemplo, espejos 220) podrían ser un elemento difractivo (por ejemplo, una red) para seleccionar un modo único a partir del etalón 230 y, por lo tanto, ampliar el segmento de sintonización del sistema. Las superficies móviles del espejo 232 podrían igualmente ser difractivas si la sensibilidad resultante a la traslación del componente se pudiese tolerar. En cualquier sistema, podrían utilizarse pares de superficies difractivas para estabilizar el ángulo de haz contra los efectos ambientales como, por ejemplo, una expansión del sustrato y variaciones en el índice de refracción, etc. El ejemplo que se muestra en la Figura 7 incluye un cambio de trayecto óptico que es simétrico con giros del espejo 232 en sentido horario y antihorario. También sería posible
10 compensar nominalmente la simetría de la cavidad para lograr una linealidad mejorada del cambio de trayecto óptico con giro del espejo 232.

Debe tenerse en cuenta que un experto apreciaría las diversas disposiciones de tipo anillo alternativas que podrían ser implementadas en lugar de aquella que se ilustra en la Figura 7. Por ejemplo, podrían proporcionarse más o menos espejos 220 estáticos. Preferiblemente, se incluyen por lo menos tres espejos.

15 La Figura 8 ilustra una variante del sistema que se muestra en la Figura 7 que incluye dos espejos 220 estáticos y un espejo 234 de retorno estático. En esta disposición, el haz del láser se refleja desde el espejo 232 y sigue un trayecto en sentido horario antes de reflejarse una segunda vez desde la cara posterior del espejo 232 y regresar desde el espejo 234 de retorno. El giro del espejo 232 giratorio sobre el eje R de giro se utiliza otra vez para alterar la longitud de trayecto óptico de la cavidad junto con el cambio del ángulo de incidencia de luz sobre el etalón.

20 La Figura 9 muestra aún otro ejemplo. Una fuente 240 láser hace atravesar luz por una primera lente 242, un etalón 244 fijo y una segunda lente 246. La luz vuelve reflejada por un espejo 248 para formar una cavidad resonante. La lente 242 es móvil. Por ejemplo, puede ser trasladada linealmente en la dirección que muestra la flecha 250. En realidad, cualquier movimiento de la lente 242 que tenga un componente en la dirección de la flecha 250 es suficiente. El movimiento de la lente distinto de aquel sobre el eje lineal que muestra la flecha 250 (es decir, distinto de en el único grado de libertad) tiene un efecto insignificante en la sintonización de frecuencia y en el cambio de longitud de la cavidad. El movimiento de la lente en este único grado de libertad lineal puede ser utilizado para alterar el ángulo de incidencia de luz en el etalón 244 (lo que provoca el cambio de la frecuencia de paso de banda) y también alterará la longitud de trayecto de la cavidad. El movimiento rápido en vaivén de la lente puede, por lo tanto, proporcionar el efecto de gorjeo de frecuencia requerido. El movimiento de otros componentes del sistema
25 (por ejemplo, la segunda lente 246 o fuente 240 láser) puede proporcionar un efecto similar.

La Figura 10 ilustra una variante del sistema descrito con referencia a la Figura 3. La cavidad de láser nuevamente comprende una fuente 20 láser, una primera lente 22, un espejo 32 linealmente trasladable, una segunda lente 24 y una red de difracción 42. También se incluye un etalón 300 ubicado en el trayecto óptico entre la segunda lente 24 y la red de difracción 42. Si bien no se muestra, el etalón 300 y la red de difracción 42 podrían ser combinados para formar un único componente.
35

El agregado del etalón 300 proporciona la supresión de modo lateral mejorada de los modos de cavidad de láser contiguos (en comparación con utilizar solamente la red de difracción 42), mientras que la red de difracción 42 proporciona supresión de modo lateral de los modos de cavidad del etalón contiguos para asegurar la operación monomodal. La ventaja clave de dicho esquema es que la curva de filtro de la red de difracción 42 depende del ángulo de incidencia y puede ser realizado de forma que se mueva con el modo de efecto láser seleccionado por el etalón 300. En esta configuración, la red de difracción 42, por lo tanto, actúa efectivamente como un filtro de paso de banda de longitud de onda variable en el que el paso de banda de longitud de onda varía al unísono con el cambio en la longitud de onda de la luz que es seleccionada por el etalón 300. En consecuencia, la sintonización más allá del segmento espectral libre (FSR, por su sigla en inglés) o separación de modo del etalón 300 se torna posible; esto debería ser contrastado con un filtro de longitud de onda fijo (por ejemplo, un recubrimiento multicapa, etc.) en el que el segmento de sintonización libre de saltos de modo se encuentra limitado necesariamente al FSR del etalón.
40
45

Los ejemplos descritos anteriormente son tolerantes al movimiento del componente óptico móvil en grados de libertad distintos de un único (el primer) grado de libertad que controla las propiedades de longitud de trayecto y de frecuencia de sintonización de la cavidad de láser. Varios de estos ejemplos incluyen un etalón que puede quedar fijo. Ahora se describirán ejemplos adicionales que comprenden un etalón fijo.
50

Con referencia a la Figura 11, se ilustra un dispositivo láser en el que la luz proveniente de diodo 20 láser atraviesa una lente 22 y se refleja desde un espejo 52 móvil. La luz que se refleja desde el espejo atraviesa un etalón 50 y es focalizada en un espejo 58 estático por una lente 56. El espejo 52 móvil se traslada y gira de manera que el rayo central del haz reflejado atraviese sustancialmente el foco 54 de la lente 56. De esta manera, la longitud de cavidad y la frecuencia de paso del etalón pueden ser alteradas simultáneamente por el movimiento del espejo 52. El espejo 52 móvil se gira preferiblemente alrededor del punto 54, aunque ello no es esencial. Aunque operable, la disposición de la Figura 11 es más sensible a traslaciones accidentales del espejo 52 que las disposiciones descritas con referencia a la Figura 3.
55

Con referencia a la Figura 12, se muestra un dispositivo láser alternativo. La luz proveniente de un diodo 70 láser es dirigida hacia una sintonización espectral o elemento 72 selectivo de longitud de onda que puede comprender un etalón (con una disposición de lente adecuada) o una red de difracción. Un prisma 74 inclinable se utiliza para alterar tanto la longitud de trayecto dentro de la cavidad como del ángulo de incidencia de luz en el elemento selectivo de longitud de onda. De esta manera, la longitud de cavidad y la frecuencia de paso de banda pueden ser ajustadas simultáneamente. En lugar del prisma 74 inclinable, sería posible proporcionar una cuña estática con un índice de refracción variable (por ejemplo, una cuña que incluye cristal líquido o que tiene una presión de aire interna variable).

La Figura 13 muestra un dispositivo láser adicional. Un diodo 100 láser genera luz que atraviesa una lente 102, un primer prisma 104 inclinable, un etalón 106 fijo y un segundo prisma 108 inclinable antes de volver reflejada por un espejo 110. En la práctica, el primer prisma 104 inclinable y el segundo prisma 108 inclinable están inclinados en direcciones opuestas (por ejemplo, hacia las posiciones 104' y 108'), lo que altera el ángulo de incidencia de luz sobre el etalón 106 a la vez que altera también la longitud de cavidad.

La Figura 14 muestra un dispositivo láser adicional. Una fuente 120 láser dirige luz a través de una lente 122, un primer prisma 124 giratorio, un etalón 126 fijo y un segundo prisma 128 giratorio hacia un espejo 130. El primer prisma 124 giratorio y el segundo prisma 128 giratorio son giratorios alrededor de un eje común A. El primer prisma 124 giratorio y el segundo prisma 128 giratorio son girados sincrónicamente en la misma dirección; ello permite la variación de tanto el ángulo que atraviesa el etalón 126 y la longitud de trayecto. El primer prisma 124 giratorio y el segundo prisma 128 giratorio pueden ser igualados. El giro de los prismas de esta manera permite que la frecuencia de la salida sea con gorjeo sin efectos de salto de modo.

Con referencia a la Figura 15, se muestra un dispositivo láser con gorjeo que constituye una realización de la presente invención. El dispositivo comprende un diodo 140 láser y una lente 142. Un primer espejo 144 y un segundo espejo 146 son acarreados por un miembro 148 móvil. El primer espejo 144 y un segundo espejo 146 tienen una posición fija uno respecto al otro y tienen superficies reflectantes enfrentadas hacia el interior que son sustancialmente paralelas. El miembro 148 móvil (y, por consiguiente, el primer y el segundo espejo 144 y 146) es giratorio en la dirección que muestra la flecha 149. Un etalón 150 fijo se inserta en el trayecto óptico entre el primer y el segundo espejo 144 y 146. El etalón 150 está anclado en posición y no se encuentra acoplado al miembro 148 móvil y tampoco se mueve con él.

En la práctica, la luz proveniente del diodo 140 láser se refleja desde el primer espejo 144 hacia el segundo espejo 146 a través del etalón 150. Luego, esta luz es dirigida hacia un espejo 152 de posición fija, y se refleja desde allí, y regresa al diodo 140 láser por el mismo trayecto óptico, lo que forma una cavidad resonante. Se puede observar que el giro del miembro 148 móvil altera el ángulo en el que la luz atraviesa el etalón 150 a la vez que cambia la longitud de cavidad. La oscilación en vaivén del miembro 148 móvil, por lo tanto, gorjea la frecuencia de salida y suprime el salto de modo.

La Figura 16 muestra una variante del dispositivo de la Figura 15. Un etalón 150 está ubicado entre un primer espejo 170 y un segundo espejo 172. Una cavidad resonante se forma otra vez con un diodo láser 140, una lente 142 y un espejo 152 fijo. El movimiento simultáneo del primer y segundo espejo se logra acoplando un extremo de cada espejo a un punto 174 de pivote de posición fija. El otro extremo de cada espejo está acoplado a un miembro 176 trasladable linealmente mediante pivotes 178 (que pueden incluir una flexión). La traslación del miembro 176 trasladable (por ejemplo, "hacia arriba y hacia abajo" en la Figura 11) altera el ángulo de los espejos, pero mantiene a dicho espejo paralelo. El ángulo de incidencia de luz sobre el etalón 150 puede, por lo tanto, ser alterado y dicha alteración proporciona un consecuente cambio en la longitud de cavidad. La frecuencia de salida puede, por lo tanto, ser con gorjeo sin efectos de salto de modo.

La Figura 17 muestra un dispositivo láser que utiliza una disposición oscilatoria similar a aquella descrita con referencia a la Figura 5 más arriba. Un diodo 180 láser genera luz que pasa hacia un espejo 182 a través de una lente 184, una primera cuña o prisma 186, un etalón 188 y una segunda cuña o prisma 190. El primer y el segundo prisma 186 y 190 están montados a un miembro 192 oscilatorio. El miembro 192 puede ser accionado para resonar con el fin de mover el primer y segundo prisma 186 y 190 acercándolo y alejándolo del etalón 188 en sincronía. Esto puede pensarse como un tipo de disposición de diapasón de sintonización. Simultáneamente, inclinar el primer y el segundo prisma 186 y 190 de esta manera permite que el ángulo de incidencia de luz sobre el etalón 188 varíe conjuntamente con la alteración de la longitud de cavidad.

La Figura 18 ilustra una variante reflectante de la disposición de la Figura 17. Un elemento 194 difractivo reflectante está ubicado entre el etalón 188 y el segundo prisma 190. Los beneficios de usar un etalón junto con un elemento difractivo se describen con mayor más arriba con referencia a la Figura 10. En este ejemplo, el segundo prisma 190 se proporciona meramente para equilibrio mecánico y podría, por lo tanto, ser reemplazado por un componente no óptico o contrapeso.

Los ejemplos descritos con referencia a las Figuras 5, 17 y 18 muestran movimientos oscilatorios bidimensionales y compensados. Dicho movimiento compensado es ventajoso dado que minimiza las perturbaciones mecánicas al resto del sistema. También debe destacarse que, aunque los ejemplos descritos más arriba se muestran en dos dimensiones, los mecanismos oscilatorios equilibrados de tres o más componentes que oscilan en oposición

alrededor de un eje normal a la página (por ejemplo) son igualmente viables. Además de las oscilaciones de movimiento opuesto que proporcionan un mecanismo denominado “quieto”, se pueden proporcionar esquemas que incorporen superficies rotatorias, como se describe más abajo.

5 La Figura 19 ilustra un dispositivo láser adicional. Se proporciona un bobinador o anillo 200 que tiene una primera superficie 202 reflectante y una segunda superficie 203 reflectante. El anillo 200 es giratorio sobre un eje R giratorio y un etalón 204 está ubicado en posición adyacente al anillo 200. Un diodo 206 láser y lente 208 dirigen un haz de luz hacia la primera superficie 202 reflectante del anillo 200 que se orienta hacia la segunda superficie 203 reflectante a través del etalón 204. La luz que se refleja la segunda superficie 203 reflectante se dirige hacia un espejo 214 fijo. La luz que vuelve reflejada del espejo 214 regresa al diodo 206 láser por el mismo trayecto óptico, lo que forma una cavidad resonante. Las ópticas 216 y 218 cilíndricas proporcionan un haz colimado a través del etalón 204. El eje R giratorio se encuentra apenas desalineado respecto a la línea de simetría del bobinador 200 de manera que, a medida que gira el bobinador, las superficies 202 y 203 reflectantes se desplazan con oscilaciones respecto al haz de láser de entrada, lo que hace variar la longitud de trayecto efectiva y el ángulo de incidencia de luz en el talón 204. Los expertos en la técnica apreciarían los diversos esquemas alternativos de disco giratorio y de tipo placa con superficies reflectantes internas y externas que serían posibles.

10 La Figura 20 ilustra un dispositivo láser alternativo en el que la luz proveniente de una fuente 80 láser atraviesa un etalón 82 móvil para llegar a un espejo 84. El etalón 82 está formado a partir de una primera placa 86 de vidrio y una segunda placa 88 de vidrio. Las caras internas de la primera y la segunda placa de vidrio están recubiertas con espejos y están colocadas de forma sustancialmente paralela una respecto a la otra por elementos 90 espaciadores. Aunque se muestra una cavidad hueca, la cavidad puede estar formada con vidrio. La segunda placa 88 de vidrio es un prisma con un ángulo de cuña que orienta la luz hacia el espejo 84. Girar el etalón 82 como se indica con la flecha 92 lleva al ángulo de incidencia de luz hacia el etalón, alterando así la frecuencia de paso. El mismo movimiento giratorio del etalón 82 también altera la longitud de cavidad del dispositivo alterando la longitud de trayecto a través de la cuña de la segunda placa 88 de vidrio. La frecuencia del paso de banda y la longitud de la cavidad pueden, por lo tanto, ser controladas juntas.

Con referencia a la Figura 21, se muestra otro dispositivo láser. Una fuente 260 láser hace pasar luz a través de una primera lente 262, un etalón 264 y una segunda lente 266. La luz vuelve reflejada por un espejo 268 para formar una cavidad resonante. El etalón 264 comprende una primera placa 270 de vidrio y una segunda placa 272 de vidrio. A diferencia de un etalón estándar en el que se usan superficies internas, espejadas y paralelas, las caras 271 y 273 internas recubiertas con espejo de la primera y segunda placa 270 y 272 de vidrio están ligeramente en ángulo una respecto a la otra; por ejemplo, el ángulo de cuña es preferiblemente menor a λ/D en donde λ es la longitud de onda y D, el diámetro de haz. Las superficies externas de la primera y segunda placa 270 y 272 de vidrio también son, preferiblemente, no paralelas una respecto a la otra y también preferiblemente no paralelas a las superficies internas.

35 El ángulo de cuña de la superficie interna espejada del etalón significa que la frecuencia de paso se alterará a lo largo de la longitud o cambiará en el ángulo de cuña del etalón. También puede proporcionarse el consecuente cambio en la longitud de trayecto seleccionando adecuadamente los ángulos externos de la primera y segunda placa vidrio. De esta manera, la traslación lineal del etalón 264 en la dirección que muestra la flecha 274 tiene el efecto de alterar la frecuencia de paso (es decir, cambiando el espaciamiento de la superficie interna del etalón en el trayecto de luz) y, a la vez, alterar la longitud de trayecto. En lugar de trasladar el etalón, se pueden proporcionar elementos de orientación de haz adecuados para alterar la posición en la que el haz óptico intersecta el etalón. Por ejemplo, el haz de luz podría ser trasladado utilizando una placa de vidrio inclinada o un prisma desplazado.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo láser de frecuencia sintonizable que comprende una cavidad de láser formada a partir de múltiples componentes ópticos,
 - 5 los múltiples componentes ópticos que comprenden una fuente (140) láser para generar un haz de luz, un elemento (150) de sintonización espectral y uno o más componentes (142, 144, 146, 152) ópticos adicionales para dirigir el haz de luz al elemento (150) de sintonización espectral,
 - 10 en donde al menos uno de los múltiples componentes (144, 146) ópticos es móvil en un primer grado de libertad (149) y dicho movimiento de dicho al menos un componente óptico móvil (144, 146) en el primer grado de libertad (149) altera simultáneamente la longitud de trayecto óptico efectiva de la cavidad de láser y la frecuencia de sintonización del elemento (150) de sintonización espectral, lo que proporciona sintonización de frecuencia en la que se suprime el salto de modo,
 - 15 en donde la longitud de trayecto óptico efectiva y la frecuencia de sintonización son sustancialmente insensibles a cualquier movimiento de dicho al menos un componente (144, 146) óptico móvil en grados de libertad distintos del primer grado de libertad (149),
 - 15 y caracterizado por que:
 - 20 el al menos un componente (144, 146) óptico móvil en el primer grado de libertad (149) comprende un primer espejo (144) y un segundo espejo (146) portado por un miembro (148) móvil, el primer y segundo espejo (144, 146) tienen una posición fija uno respecto al otro y superficies reflectantes enfrentadas hacia el interior que son sustancialmente paralelas,
 - 20 el elemento (150) de sintonización espectral comprende un etalón (150) fijo dispuesto en el trayecto óptico entre el primer y el segundo espejo (144, 146), en donde el etalón (150) está anclado en posición, y no está acoplado al miembro (148) móvil, ni se mueve con éste,
 - 25 en la práctica, la luz proveniente de la fuente (140) láser se refleja desde el primer espejo (144) hacia el segundo espejo (146) a través del etalón (150), con la luz dirigiéndose hacia un espejo (152) de posición fija, y reflejándose desde éste, y regresando a la fuente (140) láser por el mismo trayecto óptico, lo que forma una cavidad resonante,
 - 25 el movimiento del al menos un componente (144, 146) óptico móvil en el primer grado de libertad (149) comprende el giro (149) del miembro (148) móvil y, en consecuencia, del primer y segundo espejo (144, 146) alrededor de un eje de giro que es sustancialmente paralelo a las superficies reflectantes de los espejos (144, 146) y sustancialmente perpendicular al trayecto óptico entre los espejos (144, 146),
 - 30 y el giro del miembro (148) móvil alrededor del eje de giro altera el ángulo en el que la luz atraviesa el etalón (150) y, por consiguiente, altera simultáneamente la frecuencia de sintonización del etalón (150) y la longitud de trayecto óptico efectiva de la cavidad de láser.
 - 35 2. Un dispositivo láser según la reivindicación 1, que comprende un accionador para controlar el movimiento de dicho al menos un componente óptico móvil en el primer grado de libertad.
 3. Un dispositivo láser según la reivindicación 2, en donde el accionador permite el movimiento de dicho al menos un componente óptico móvil que proporciona modulación de frecuencia a una tasa de repetición mayor a 50Hz.
 4. Un dispositivo láser según las reivindicaciones 1, 2 o 3, en donde uno o más de los componentes ópticos adicionales coliman el haz de luz que es incidente en el elemento de sintonización espectral.

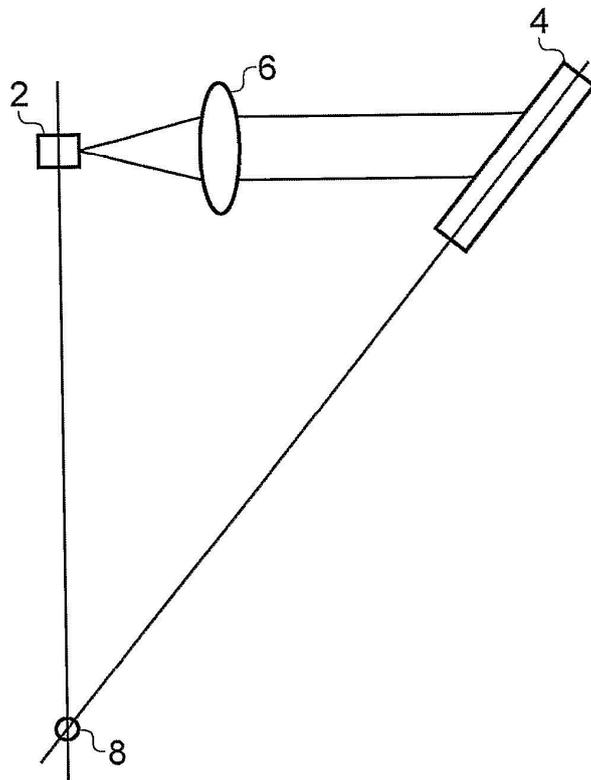


FIG. 1 (Técnica anterior)

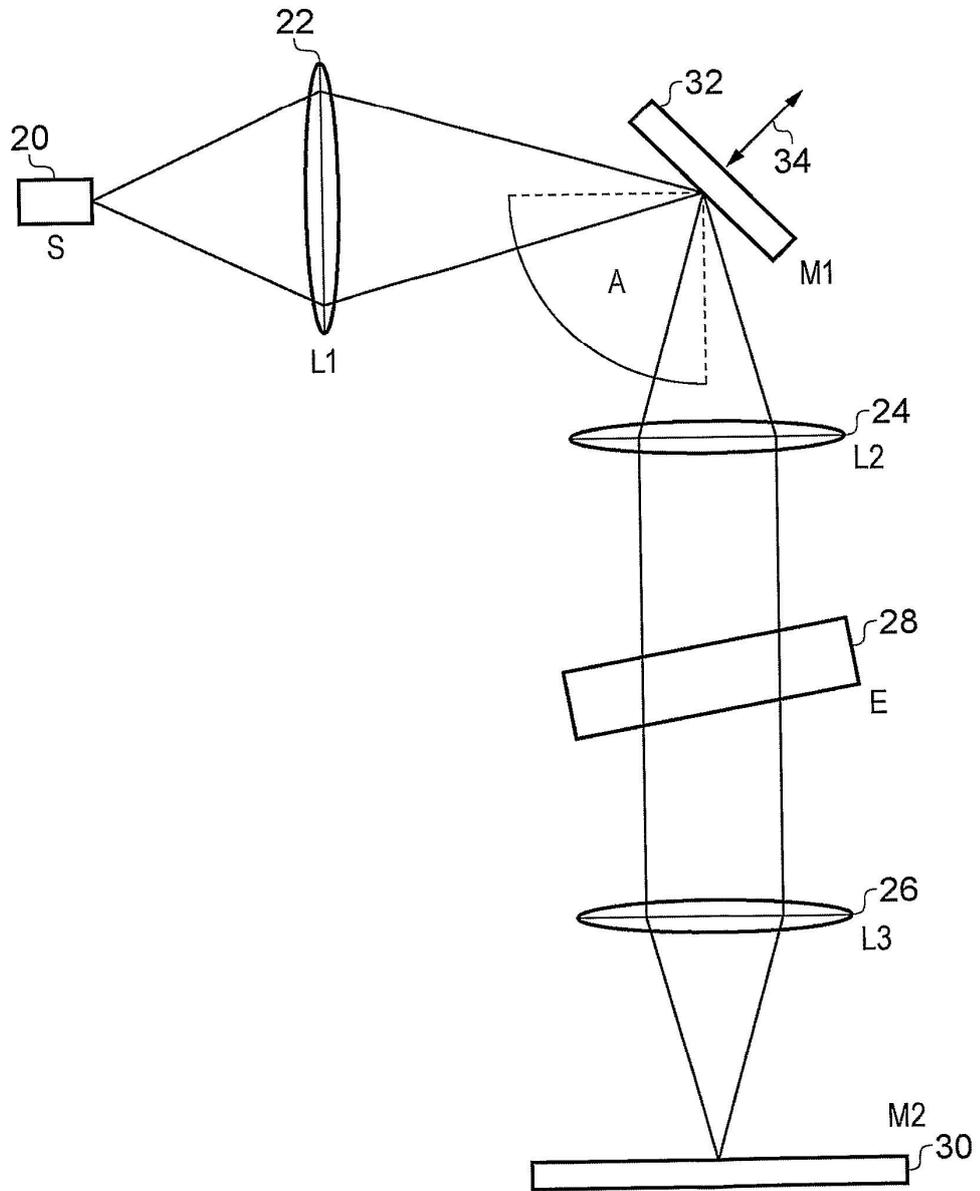


FIG. 2

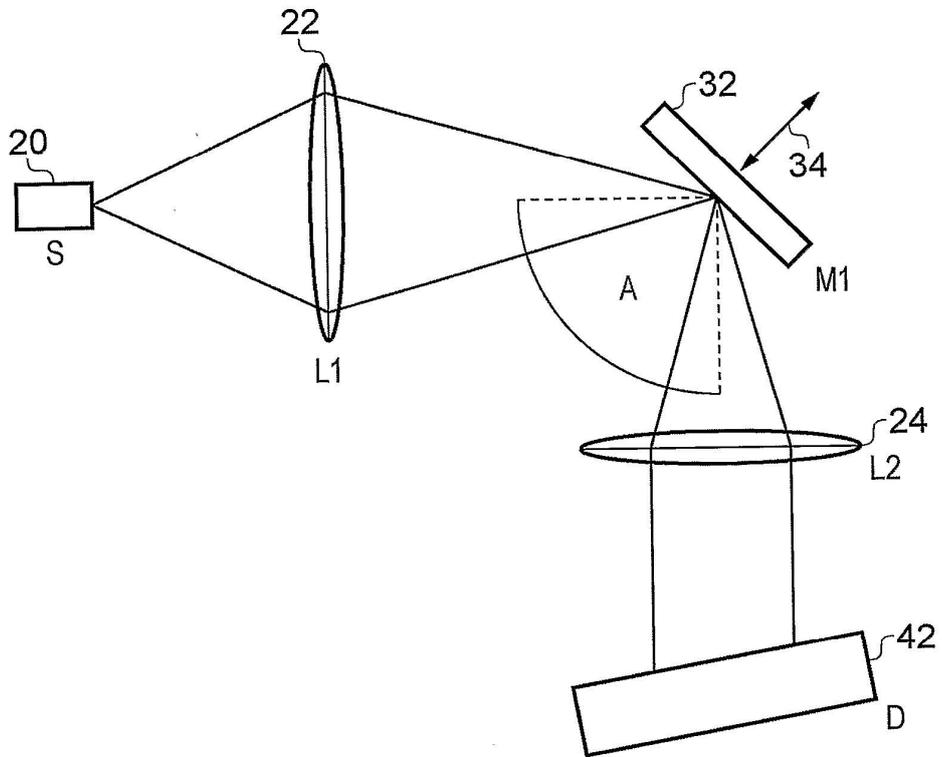


FIG. 3

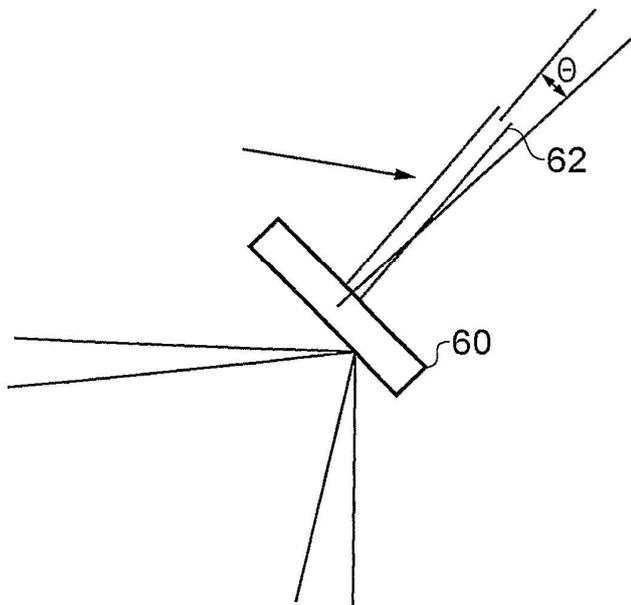


FIG. 4

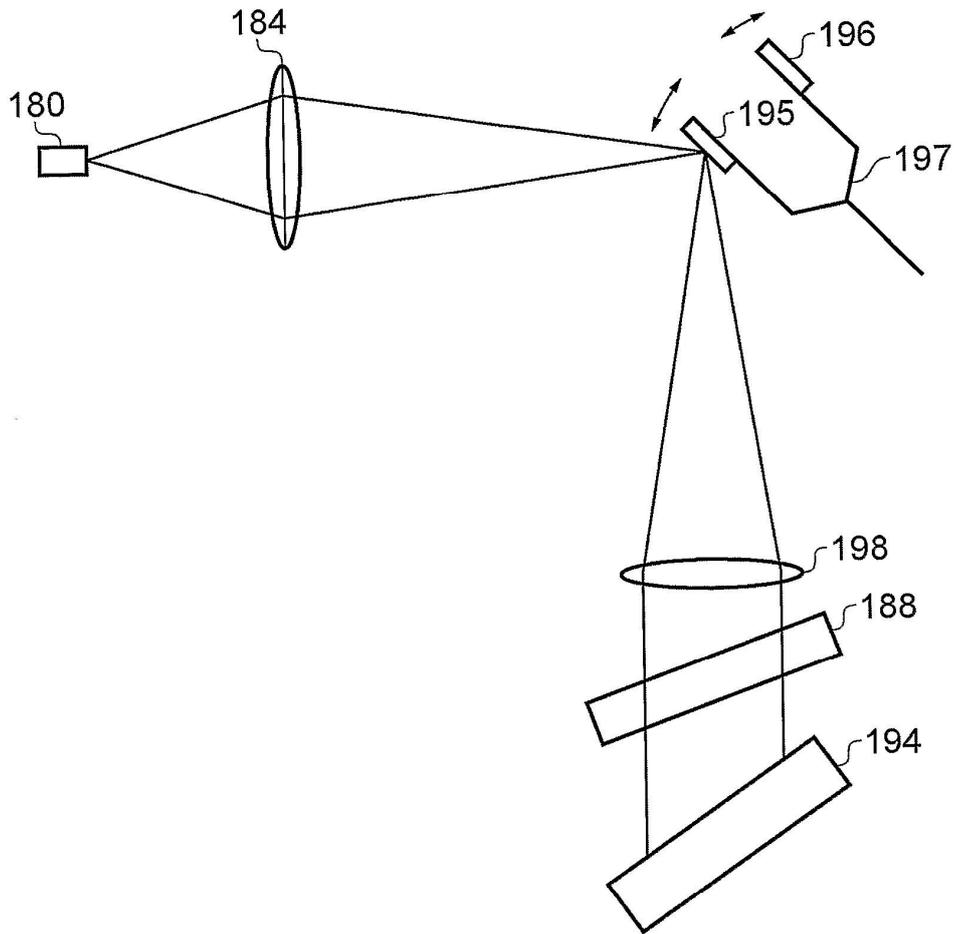


FIG. 5

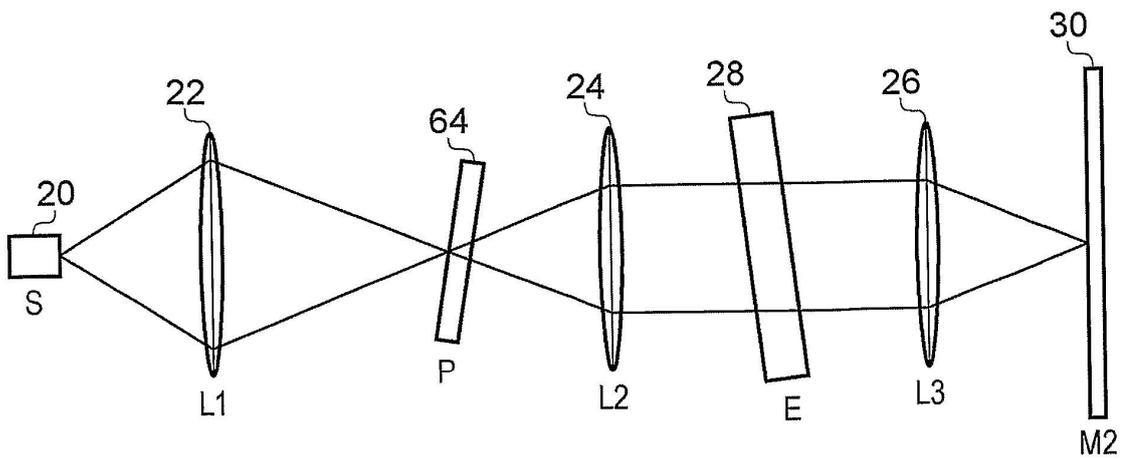


FIG. 6

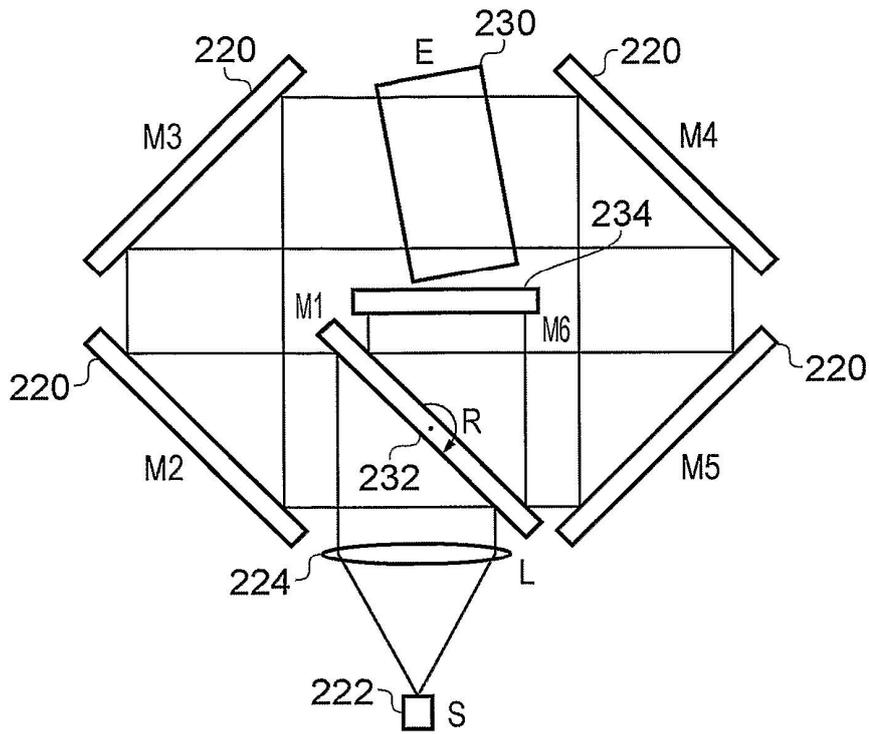


FIG. 7

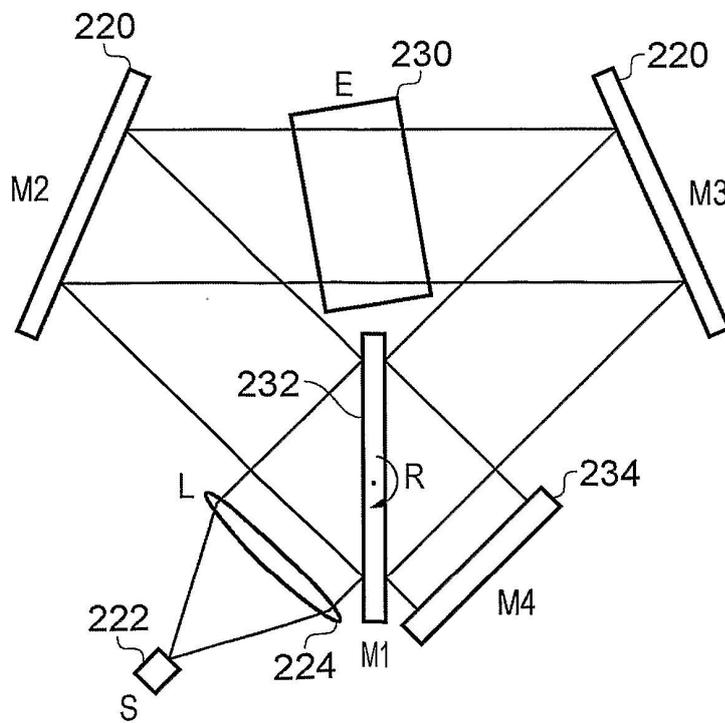


FIG. 8

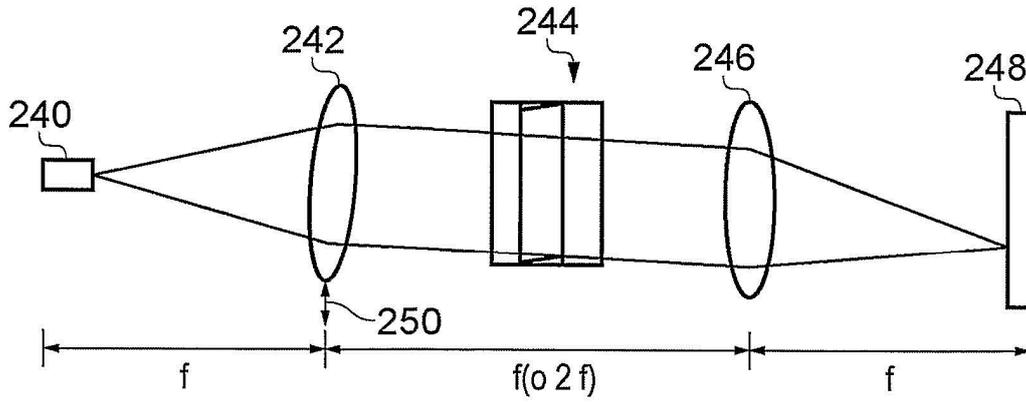


FIG. 9

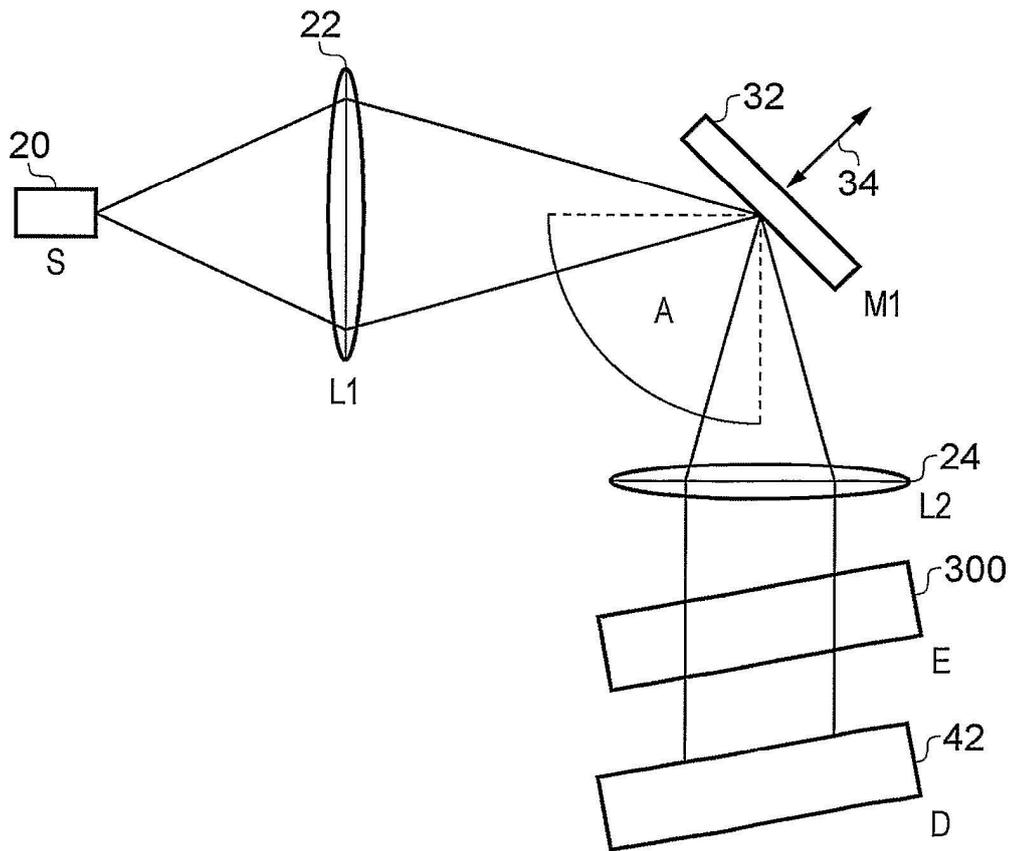


FIG. 10

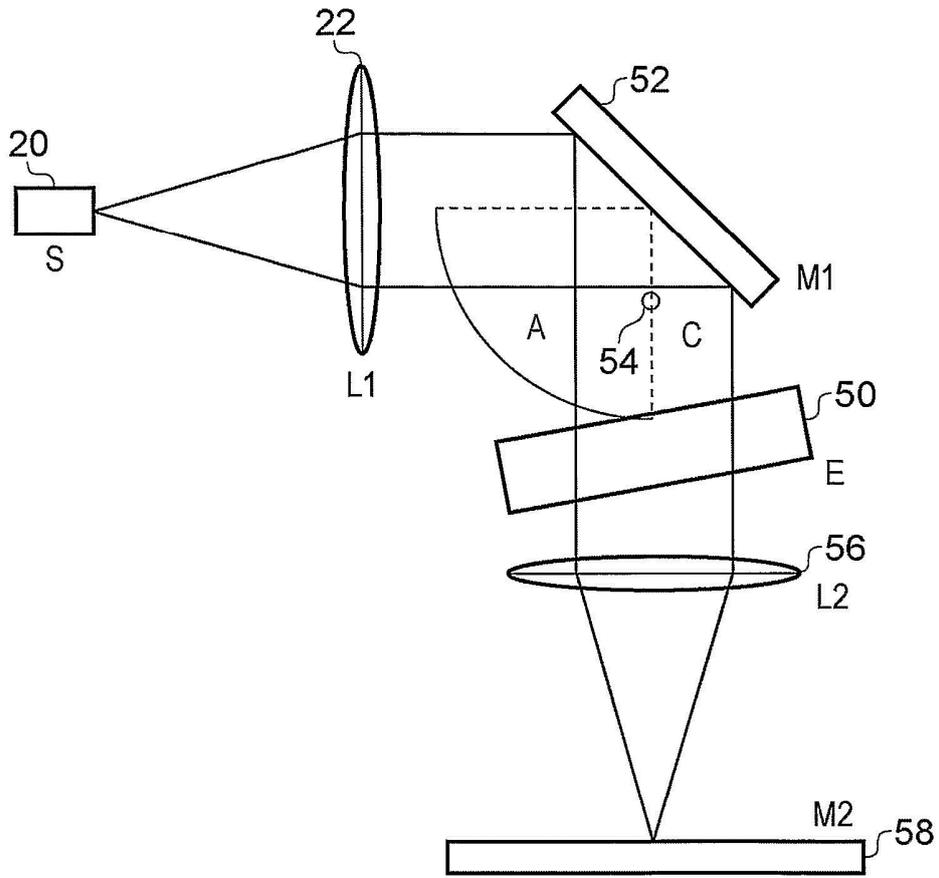


FIG. 11

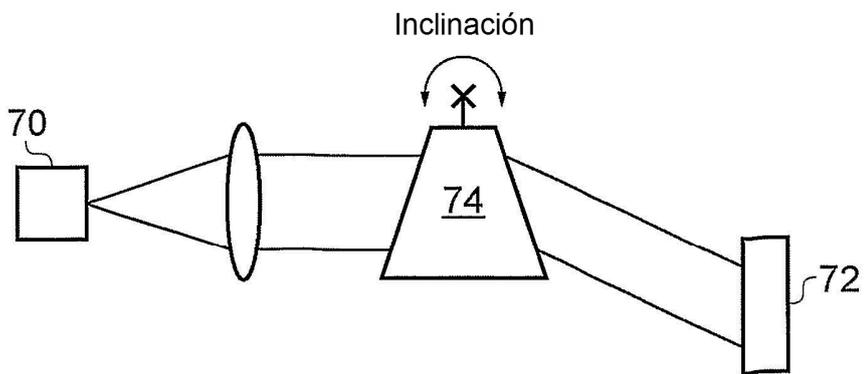


FIG. 12

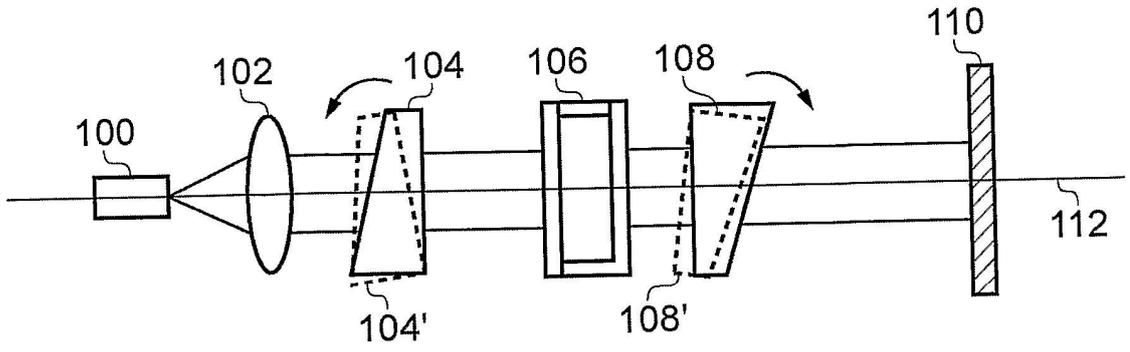


FIG. 13

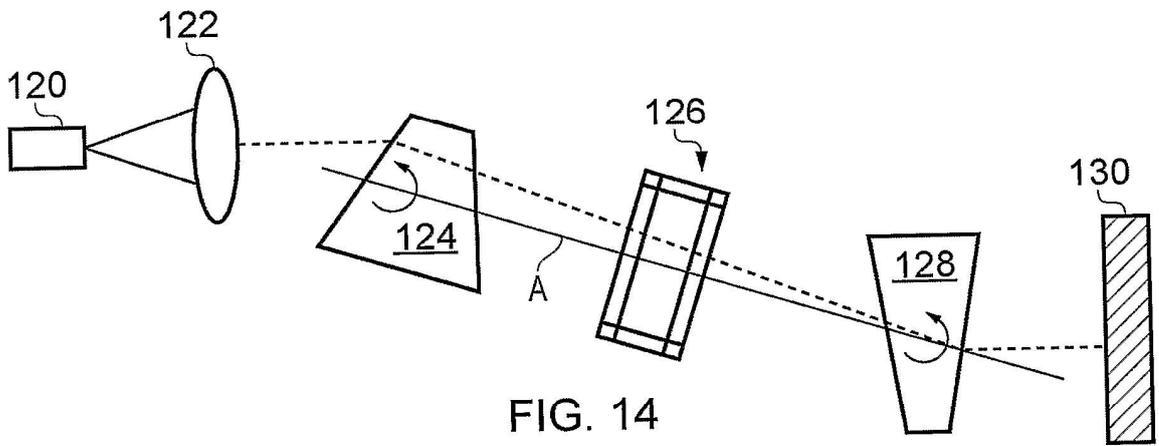


FIG. 14

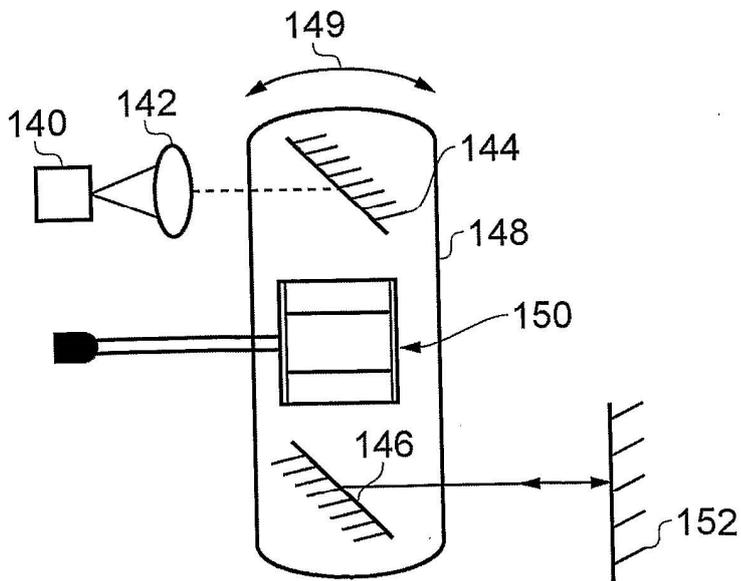


FIG. 15

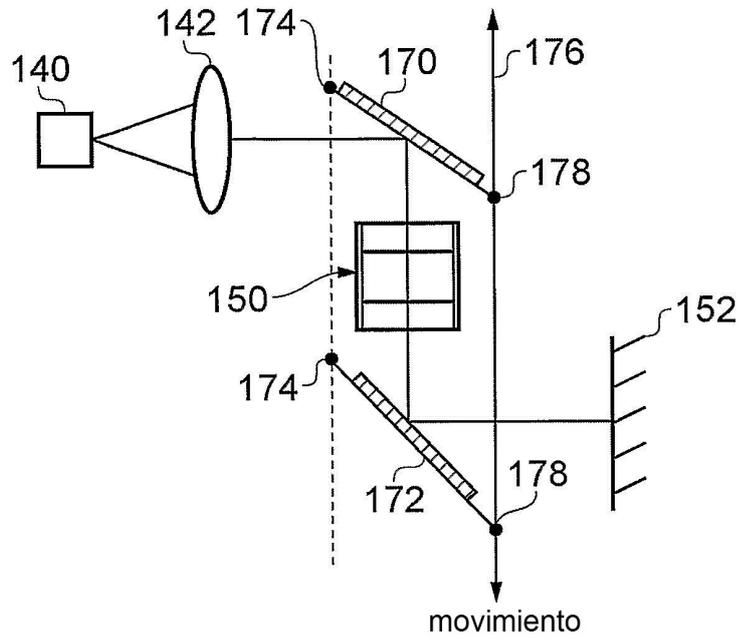


FIG. 16

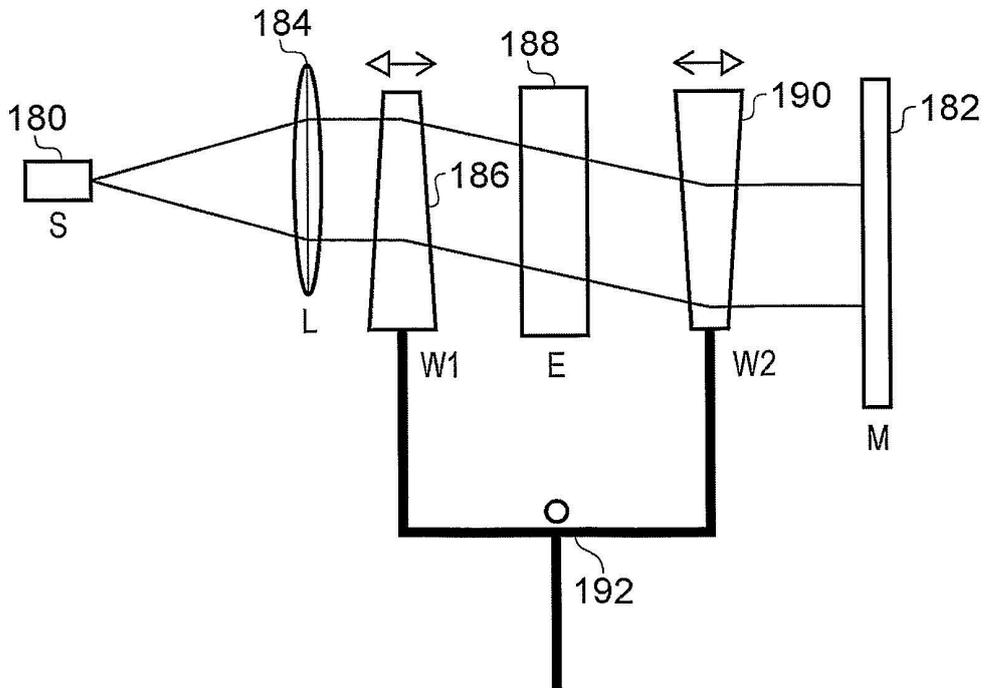


FIG. 17

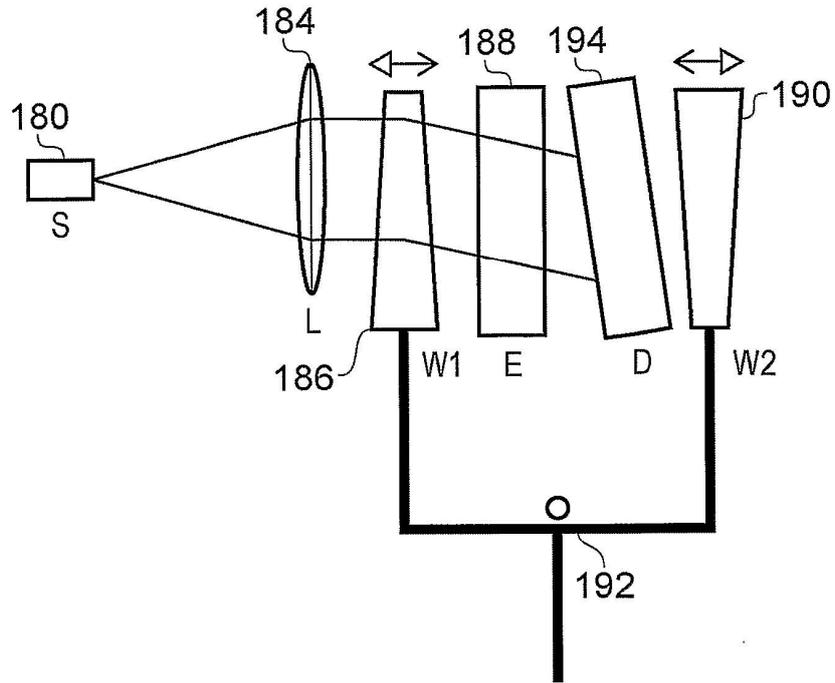


FIG. 18

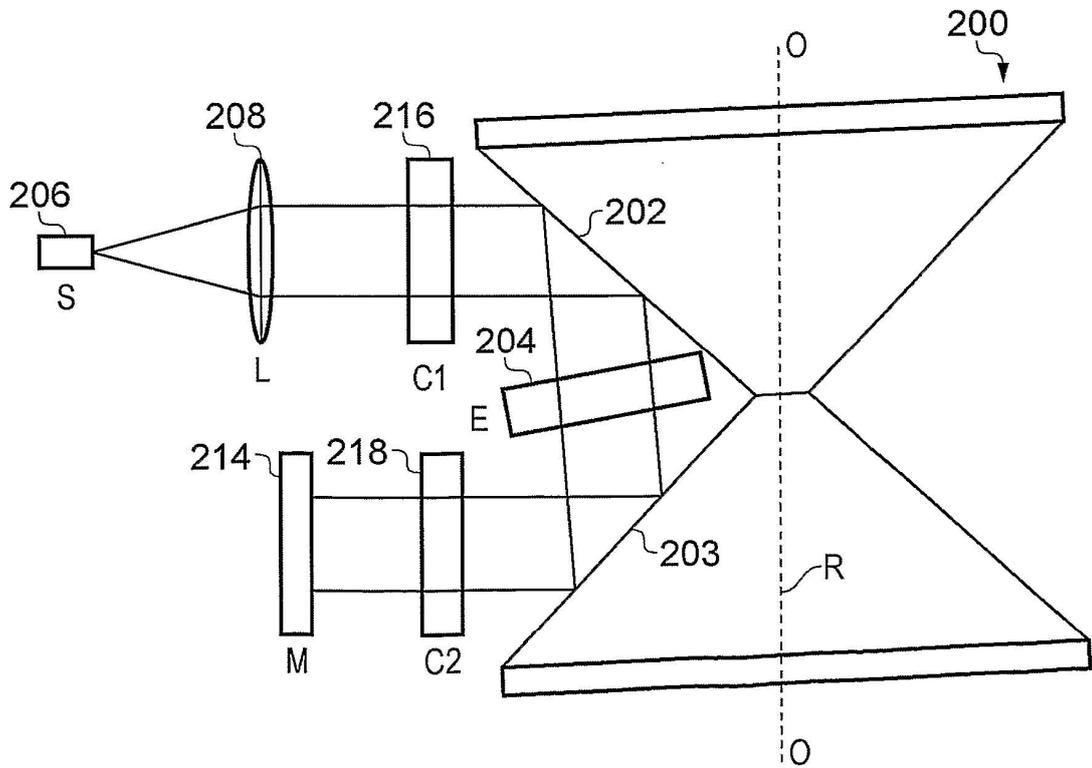


FIG. 19

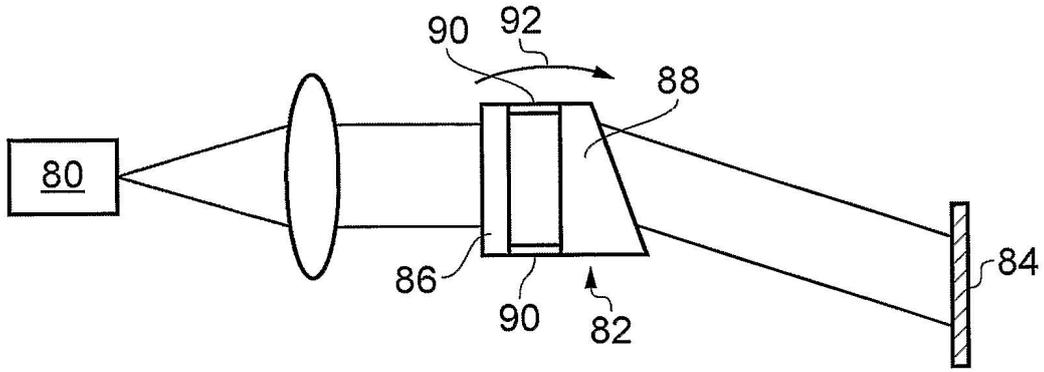


FIG. 20

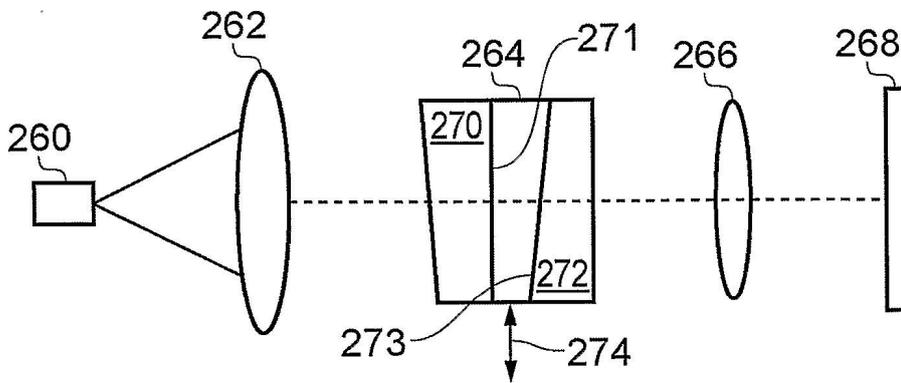


FIG. 21