(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 334 787**

(51) Int. Cl.:
H01S 5/14 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Número de solicitud europea: **03775324 .1**
(96) Fecha de presentación : **07.11.2003**
(97) Número de publicación de la solicitud: **1668752**
(97) Fecha de publicación de la solicitud: **14.06.2006**

(54) Título: **Control de la longitud de onda de un láser sintonizable de cavidad externa.**

(30) Prioridad: **30.09.2003 PCT/EP03/10856**

(45) Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.03.2010

(45) Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.03.2010

(73) Titular/es: **PGT Photonics S.p.A.**
Viale Sarca, 222
20126 Milano, IT
Telecom Italia S.p.A.

(72) Inventor/es: **Cattelan, Susanna Maria;**
Romano, Andrea;
De Donno, Marco y
Pianciola, Aurelio

(74) Agente: **Mir Plaja, Mireia**

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).

Venta de fascículos: Oficina Española de Patentes y Marcas. Pº de la Castellana, 75 – 28071 Madrid

DESCRIPCIÓN

Control de la longitud de onda de un láser sintonizable de cavidad externa.

La invención se refiere a un láser sintonizable de cavidad externa que está especialmente adaptado para redes de comunicación óptica multiplexada por división de longitud de onda. En particular, la invención se refiere a un método para seleccionar y controlar la posición de un elemento sintonizable en un láser sintonizable de cavidad externa.

Técnica afín

El uso de láseres como fuente luminosa sintonizable puede mejorar en gran medida la reconfigurabilidad de los sistemas multiplexados por división de longitud de onda (WDM) o del recientemente desarrollado WDM denso (DWDM). Por ejemplo, pueden asignarse distintos canales a un nodo simplemente a base de sintonizar la longitud de onda. También pueden usarse láseres sintonizables para formar redes privadas virtuales basadas en el encaminamiento de longitud de onda, es decir, redes fotónicas.

Pueden usarse distintos enfoques para contar con láseres sintonizables, láseres de reflector de Bragg distribuido, láseres VCSEL con un espejo superior móvil, o láseres diodo de cavidad externa. Los láseres sintonizables de cavidad externa ofrecen varias ventajas, tales como una alta potencia de salida, una amplia gama de sintonización, buena supresión de modo lateral y pequeño ancho de línea. Han sido desarrollados varios mecanismos de sintonización de láseres para disponer de selección de longitud de onda en la cavidad externa, tales como elementos selectores intracavidad ajustables mecánicamente o activados eléctricamente.

La patente U.S. 6.526.071 describe un láser sintonizable de cavidad externa que puede ser utilizado en aplicaciones de telecom para generar las longitudes de onda centrales para cualquier canal en la red de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU). El láser sintonizable que se da a conocer incluye un medio de ganancia, un generador rejilla y un selector de canales, estando tanto el generador rejilla como el selector de canales situados en el camino óptico del haz. El generador rejilla selecciona modos longitudinales periódicos de la cavidad a intervalos correspondientes al espaciamiento entre canales y rechaza los modos contiguos. El selector de canales selecciona un canal dentro de la red de longitudes de onda y rechaza otros canales.

A fin de acomodar el creciente tráfico de comunicaciones ópticas, están en fase de desarrollo sistemas DWDM con un espaciamiento entre canales de 50 GHz y con el tiempo de 25 GHz. Los sistemas DWDM con un espaciamiento entre canales de 50 GHz típicamente requieren una precisión de frecuencia de ± 2,5 GHz, mientras que los sistemas con 25 GHz generalmente requieren una precisión de ± 1,25 GHz. Puesto que el DWDM usa un más estrecho espaciamiento entre canales, la precisión y el control del posicionamiento de los elementos sintonizables asociados a los láseres transmisores dentro de toda la gama de temperaturas de funcionamiento y de sintonización ha llegado a convertirse en un problema importante. Un posicionamiento no óptimo de los elementos sintonizables redunda en pérdidas espaciales y en una reducida potencia de salida del transmisor. Una fiable estrategia de supervisión de la longitud de onda para ajustar rápida y correctamente y mantener la deseada longitud de onda de servicio es por consiguiente deseable en el montaje y el funcionamiento de los elementos sintonizables asociados a los láseres sintonizables.

En los sistemas láser sintonizables de cavidad externa se ponen generalmente en ejecución sistemas de control activo de la longitud de onda láser y de otros parámetros de salida. A menudo estos sistemas de control activo se basan en sincronizar la longitud de onda láser con la deseada longitud de onda de servicio. Las técnicas de sincronización comunes pueden usar una señal de realimentación para mantener la longitud de onda centrada al valor deseado mediante realimentación ya sea de corriente o de temperatura. Los sistemas de sincronización de la longitud de onda pueden estar presentes en forma de circuitería de soporte externo, o bien pueden estar integrados en el módulo láser.

La patente U.S. Nº 6.366.592 describe un láser sintonizable que incluye una cavidad de Fabry-Perot (FP) sintonizable y un modulador de longitud de cavidad que controla la longitud óptica de la cavidad. La cavidad FP es primeramente sintonizada a la deseada longitud de onda de servicio, y luego el modulador de la longitud de cavidad es accionado para variar la longitud física de la cavidad láser en una cantidad que es típicamente menor que una longitud de onda de luz a la longitud de onda de servicio. La fina sintonización de modo intercavidad se logra por referencia a la longitud de onda absoluta según detección efectuada por un sincronizador de longitud de onda. Como alternativa se ajusta la longitud de cavidad hasta haber sido maximizada la potencia de salida, lo cual ocurrirá cuando el modo de cavidad esté centrado en la longitud de onda central del filtro FP. Se dice que la solución descrita en la patente es principalmente aplicable a los láseres sintonizables que tienen cavidades láser cortas, preferiblemente de menos de 3 cm, y en una realización preferida de menos de 1 cm.

Los inventores han observado que la selección de longitud de onda discreta de un elemento intracavidad que es sintonizable continuamente puede limitar la precisión de la sintonización de la longitud de onda y hace uso de un sistema de sincronización de la longitud de onda que es necesario para mantener la longitud de onda al nivel del deseado valor de servicio. Dichos inventores han observado además que el uso de un sistema de sincronización de la longitud de onda, también si está integrado, incrementa el coste del módulo láser y puede ser perjudicial para la compacidad del sistema láser.

La solicitud de patente U.S. Nº 2003/0012239 describe un método para controlar una cavidad láser supervisando el voltaje a través del medio de ganancia y ajustando una característica de pérdida según el voltaje supervisado. Un elemento sintonizador electroóptico proporciona una señal de modulación de frecuencia o acción vibratoria a la cavidad externa y un mecanismo para sintonizar la longitud del camino óptico de la cavidad externa mediante el voltaje aplicado a través del elemento sintonizador.

Los inventores han observado que el supervisar el voltaje a través del medio de ganancia para examinar las pérdidas de la cavidad externa no es una medición directa del comportamiento de las características ópticas del láser, que puede ser influenciado por otros factores independientes de las señales ópticas.

La solicitud de patente U.S. Nº 2003/0007522 da a conocer un láser de cavidad externa que comprende un sintonizador selector de longitud de onda y un sintonizador de cavidad externa, donde el sintonizador de longitud de onda está desacoplado del sintonizador de cavidad externa. Puede introducirse modulación de la longitud del camino óptico de la cavidad externa mediante vibración de frecuencia para producir variaciones de intensidad en la potencia de salida de la cavidad para evaluar las pérdidas de la cavidad externa.

Se describe en la solicitud de patente U.S. Nº 2003/0007526 un sistema láser que incluye un controlador para supervisar varias funciones de un conjunto láser. El controlador láser puede incluir un circuito sintonizador de la longitud de onda para ajustar o sincronizar la longitud de onda de la cavidad externa. El circuito sintonizador puede incluir un generador de señales de modulación para darle una señal de modulación a un elemento de transmisión seleccionado que ocasiona una correspondiente modulación del camino óptico de la cavidad externa del láser.

Los inventores han observado que el ajustar la longitud de la cavidad para llevar la longitud de onda a un máximo local del espectro de transmisión del etalón rejilla supone movimientos mecánicos de al menos un elemento de la cavidad láser, como p. ej. el espejo final, los cuales pueden afectar a la fiabilidad del sistema láser.

Han sido desarrollados los de una serie de dispositivos de cristal líquido (LC) como filtros espectrales electrónicamente sintonizables para selección de longitud de onda en láseres y otros componentes de sistemas WDM.

Los filtros de cristal líquido son a menudo accionados por un voltaje de corriente alterna (c.a.) para impedir la degradación del cristal líquido debido a efectos electroquímicos. En "Frequency locking of a tunable liquid-crystal filter", publicado en la revista Journal of Applied Physics, vol. 71 (1992), páginas 2464-66, se describe una técnica para la sincronización de frecuencia de un filtro de cristal líquido de Fabry-Perot (FP) sintonizable usado para sistemas DWDM. El voltaje de c.a. a la frecuencia ω, que es aplicado al filtro de cristal líquido FP para controlar la resonancia del filtro, ocasiona una pequeña modulación a 2ω en la intensidad de luz transmitida. Para compensar las fluctuaciones de temperatura es llevado a cabo seguimiento de frecuencia del filtro FP por un sistema de realimentación que minimiza la señal derivada resultante de la señal 2ω.

La patente U.S. Nº 6.205.159 da a conocer un láser semiconductor de cavidad externa que sintoniza para un conjunto discreto de longitudes de onda variando el voltaje a un interferómetro FP de cristal líquido. El conjunto discreto de longitudes de onda a las que puede sintonizarse está definido por un etalón intracavidad estático. Para acoplar la fase del modo de la cavidad externa a la transmisión del etalón estático, la longitud del camino óptico se ajusta de forma tal que es igual a una semilongitud de onda múltiple de las longitudes de onda de transmisión seleccionadas por el etalón estático. Esto puede llevarse a cabo usando un modulador de fase de cristal líquido para ajustar la longitud del camino óptico o variar mecánicamente la longitud de la cavidad con un transductor piezoeléctrico.

Los inventores han observado que la modulación de frecuencia del voltaje aplicado induce variaciones del índice refractivo de un material de cristal líquido. Las variaciones de fase son proporcionales al espesor del material de cristal líquido que es atravesado por el haz óptico. En el caso de un filtro FP, el haz óptico experimenta múltiples reflexiones al atravesar el filtro FP, o en otras palabras pasa a través del material de cristal líquido muchas veces, y normalmente decenas o cientos de veces. El paso múltiple del haz óptico induce relativamente altas variaciones de fase, que a su vez incrementan la ondulación de la señal modulada. Los inventores han observado que, para aplicaciones a láseres sintonizables de modo único, las relativamente altas variaciones de fase ocasionan una relativamente gran oscilación de la longitud de onda y variación de la intensidad, lo cual puede ocasionar inestabilidad de la señal de salida del láser y/o ensanchamiento del ancho de línea espectral.

La selección de la longitud de onda y la sintonización de una cavidad láser pueden ser llevadas a cabo usando un espejo sintonizable activo. Está descrito en la patente U.S. Nº 6.215.928 un elemento controlado electroópticamente que emplea cristal líquido y puede ser usado como espejo sintonizable activo. La longitud de onda de laserización del láser es determinada por el espejo sintonizable activo para ser la longitud de onda de resonancia del espejo. La longitud de onda resonante puede ser desplazada variando el voltaje o la corriente suministrado(a) al elemento controlado electroópticamente.

Breve exposición de la invención

La invención está definida en las reivindicaciones 1 y 10. Están definidas en las revindicaciones dependientes varias realizaciones.

La presente invención se refiere a un método para controlar un láser sintonizable de cavidad externa que comprende un espejo sintonizable selectivo de la longitud de onda, en el cual la selectividad de la longitud de onda se logra mediante una señal eléctrica. La señal eléctrica que se da para el funcionamiento del espejo sintonizable es un voltaje alterno. El espejo sintonizable de la presente invención comprende un material sintonizable electroópticamente, y preferiblemente un material de cristal líquido (LC), un retículo de difracción y un guiaondas planar que interactúa ópticamente con el retículo. El retículo de difracción y el guiaondas forman una estructura resonante que refleja solamente una longitud de onda de resonancia seleccionada de entre todas las otras longitudes de onda que inciden en la misma.

En dependencia de la amplitud del voltaje aplicado al espejo sintonizable, V_{TM}, el espejo sintonizable refleja radiación solamente a una longitud de onda dada λ_{TM}. La respuesta espectral del espejo sintonizable es generalmente una curva, con una forma similar por ejemplo a la de una curva lorentziana, centrada en λ_{TM} y caracterizada, inter alia, por el ancho de banda en el FWHM (FWHM = ancho total a la mitad del máximo). El espejo sintonizable es accionado con un voltaje alterno de amplitud V_{TM} y frecuencia f_A para impedir el deterioro del cristal líquido debido a fatiga por c.c.

La longitud de onda de salida de laserización del láser se selecciona para que corresponda a la longitud de onda de resonancia λ_{TM} del espejo sintonizable.

Los inventores han descubierto que la precisa selección de la longitud de onda (frecuencia) de emisión del láser sintonizable mediante el espejo sintonizable puede sacarse del análisis de la modulación de señal inducida por el voltaje de c.a. aplicado al espejo sintonizable. Los inventores han observado que la desalineación de la longitud de onda está relacionada con la profundidad de modulación de la señal modulada, correspondiendo el estado de alineación de la longitud de onda al mínimo de la profundidad de modulación.

La modulación de frecuencia del voltaje aplicado induce variaciones del índice refractivo del material de cristal líquido, lo cual a su vez induce un desplazamiento de fase del haz óptico que ha interactuado con el material de cristal líquido. En una primera aproximación, los desplazamientos de fase son proporcionales al espesor del material de cristal líquido que es atravesado por el haz óptico. En los láseres sintonizables de modo único, los desplazamientos de fase relativamente altos inducen relativamente grandes modulaciones de frecuencia de la señal de salida del láser. Este efecto es particularmente perjudicial si está presente en la cavidad láser un elemento de pérdida espectralmente selectivo, tal como un etalón rejilla, porque el mismo incrementa la modulación de amplitud de la señal de salida del láser.

A fin de comprender el efecto de un espejo sintonizable que comprende un material sintonizable y opera con un voltaje alternativo, se considera un láser sintonizable configurado para emitir un único modo longitudinal que tiene un ancho de línea espectral al FWHM de 50 kHz. El voltaje alterno aplicado al espejo sintonizable induce una oscilación de la longitud de onda central λ_{TM} de la respuesta espectral del espejo sintonizable. Esta oscilación induce una modulación de amplitud de la línea espectral de emisión del láser. Los desplazamientos de fase debidos a la interacción con el material de cristal líquido ocasionan modulaciones de frecuencia de la línea espectral del láser, es decir que el modo longitudinal oscila en vaivén de forma tal que el efecto resultante es una línea espectral ensanchada, p. ej. del orden de 100 MHz o más. A pesar de que no se trata aquí sobre ello, también pueden surgir de los otros elementos ópticos incluidos en la cavidad láser contribuciones al desplazamiento de fase de la línea espectral.

Los inventores han comprendido que en el caso de un espejo sintonizable que comprenda un retículo, un guiaondas y un material de cristal líquido los desplazamientos de fase ocasionados por el voltaje alternativo se mantienen relativamente bajos. Esto es particularmente cierto si la incidencia de la luz es tal que el haz luminoso incide primero en el retículo y luego en el material de cristal líquido. En este caso, el haz incidente interactúa tan sólo con una primera capa delgada de la película de cristal líquido antes de ser reflejado por el retículo, siendo muy probablemente tan sólo un 10-20% del espesor total del material de cristal líquido atravesado por el haz. También en caso de que la incidencia del haz luminoso sea tal que la luz pase a través del cristal líquido antes de incidir en el retículo, el haz luminoso atraviesa el cristal líquido a lo sumo dos veces antes de salir del espejo, es decir que no experimenta una pluralidad de reflexiones, como sucede por ejemplo en el caso de un filtro de cristal líquido de Fabry-Perot.

De ello resulta que las variaciones de fase y las variaciones de intensidad de la señal reflejada, que son inducidas por el voltaje de c.a. aplicado, son relativamente bajas, debido al relativamente pequeño espesor del material de cristal líquido que interactúa con el haz incidente.

El espesor del material de cristal líquido es preferiblemente de no más de poco más o menos 2 μm, y más preferiblemente es de poco más o menos 1 μm.

En una realización preferida, el espejo sintonizable tiene una variación del índice refractivo de 0,2 para una gama de sintonización de la longitud de onda (sintonizabilidad del espejo) de 45 nm, variando dicho índice refractivo por ejemplo desde 1,6 hasta 1,8 para amplitudes de voltaje que van desde 0 V hasta 5 V aplicados al material de cristal líquido. El ancho de banda al FWHM de la respuesta espectral del espejo sintonizable es de 100 GHz. En un láser que tenía un espaciamiento entre los modos de la cavidad de 3,5 GHz, la medición del ancho de línea espectral del láser arrojó un valor de aproximadamente de 100 MHz, el cual corresponde a un desplazamiento de fase de aproximadamente 0,18 rad.

A efectos comparativos, los inventores han considerado un filtro FP que tiene el mismo ancho de banda al FWHM de 100 GHz y la misma gama de sintonización de 45 nm. El filtro FP comprende dos espejos reflectores que están mutuamente encarados y separados por un espacio intermedio que está llenado con un material de cristal líquido que tiene una variación del índice refractivo de 0,05 en la gama de sintonización. A fin de tener unas características espectrales similares a las del espejo sintonizable de la realización preferida anteriormente descrita, la reflectividad de los espejos es del 98,2% y el espesor del cristal líquido es de 5 μm. El haz luminoso experimenta al menos cien reflexiones al atravesar el filtro FP. Las simulaciones han demostrado que el desplazamiento de fase resultante del haz luminoso transmitido es de 0,8 rad, lo cual corresponde, en un láser que tiene un espaciamiento entre los modos de la cavidad de 3,5 GHz, a un ensanchamiento del ancho de línea espectral del láser de aproximadamente 400 MHz, el cual es un valor que es cuatro veces más alto que el inducido por el espejo sintonizable que tiene un cristal líquido y características espectrales similares.

Los inventores han observado que la profundidad de modulación presenta una considerable dependencia de la magnitud del V_{TM}, y que por consiguiente la profundidad de modulación cambia ligeramente para distintos canales. A mayores valores de amplitud del voltaje aplicado, devienen más pronunciadas las variaciones del índice refractivo en el material de cristal líquido.

En uno de sus aspectos, la invención se refiere a un método que es por ejemplo puesto en ejecución por un algoritmo de control que controla que la profundidad de modulación de la señal de salida del láser no sea de más de aproximadamente ±2% en toda la gama de sintonización del láser, p. ej. de 1530 a 1565 nm. Preferiblemente, la profundidad de modulación es controlada para que no sea de más de aproximadamente un 1%.

Se presentarán distintos procedimientos de realimentación óptica y de análisis de la señal modulada. En una realización preferida, la alineación de la longitud de onda de resonancia del espejo sintonizable con la longitud de onda de laserización puede ser realizada en concurrencia con la supervisión de la estabilidad de la salida del láser, como p. ej. la estabilidad de la potencia de salida.

En una adicional realización preferida se analiza la componente modulada de la potencia óptica a la salida del láser a fin de alinear la longitud de onda de resonancia del espejo sintonizable con un modo de cavidad seleccionado, p. ej. por medio de un fotodiodo puesto en la salida del láser. Preferiblemente, la alineación de la longitud de onda de resonancia se realiza variando ligeramente la amplitud del voltaje aplicado al espejo sintonizable.

El análisis de la componente modular de la potencia de salida del láser puede ser llevado a cabo junto (o secuencialmente) con el análisis de la potencia de salida (la señal de salida total que comprende también la componente modulada) a fin de centrar el modo de cavidad con un elemento de pérdida espectralmente selectivo, tal como un etalón rejilla. En una realización preferida el elemento de pérdida es un etalón rejilla que define una pluralidad de bandas pasantes que están en sustancia alineadas con correspondientes canales de una red de longitudes de onda. El centraje del modo de cavidad con una banda pasante del elemento de pérdida espectralmente selectivo, es decir, la estabilización de modo de la señal de salida del láser, puede lograrse maximizando la potencia de salida del láser. Las mediciones de la componente modulada y de la potencia de salida "total" pueden ventajosamente realizarse por medio del mismo fotodiodo situado en la salida del láser.

El uso de un espejo sintonizable como selector de canales puede ventajosamente permitir contar con una cavidad láser relativamente corta, porque son necesarios menos elementos dentro de la cavidad láser. Puede preferirse una cavidad láser corta por limitaciones de tamaño cuando el sistema láser se ensamble en un paquete estándar, como p. ej. un paquete mariposa. Además, como quedará claro a la luz de lo que se expone a continuación, una cavidad corta presenta una mejor supresión de modo de los modos transmitidos a través del etalón, en comparación con una cavidad más larga. A la supresión efectuada por parte del etalón de los modos de cavidad contiguos al modo de laserización se la denominará de aquí en adelante la supresión lateral por parte del etalón espectral (ESS). Preferiblemente, el láser sintonizable de la invención tiene una longitud de cavidad de no más de aproximadamente 15 mm, y más preferiblemente de no más de poco más o menos 12 mm. Deberá entenderse sin embargo que la presente invención puede generarlizarse a cavidades láser más largas.

La disminución de la longitud de la cavidad láser conduce a un incremento del espaciamiento entre los modos longitudinales de cavidad, es decir, de la gama espectral libre de la cavidad láser, a la que se denomina de aquí en adelante $(FSR)_{cavidad}$, debido a la relación

$$(FSR)_{cavidad} = \frac{c_0}{2\sum_i n_i L_i} \qquad (1)$$

donde c_0 es la velocidad de la luz *in vacuo*, n_i (i = 1, ..., m) es el índice refractivo del medio que llena el elemento óptico $i^{ésimo}$ que la luz se encuentra en la cavidad o de la propia cavidad (es decir, del espacio libre) y L_i es la longitud física del camino de luz del $i^{ésimo}$ elemento. Al camino óptico de la luz en la cavidad láser se le denomina longitud efectiva de la cavidad L_{ef}, que está definida como

$$L_{ef} = \sum_i n_i L_i \,. \qquad (2)$$

La longitud efectiva de la cavidad está naturalmente relacionada con la longitud física de la cavidad externa L_0. La cavidad externa del láser puede concebirse como un resonador óptico que se compone de dos superficies enfrentadas y reflectoras y en general paralelas separadas por una longitud que está definida como la longitud física de la cavidad L_0. En general, $L_{ef} \geq L_0$.

Es posible reescribir la Ecuación (1) como

$$(FSR)_{cavidad} = \frac{c_0}{2L_{ef}} \qquad (3)$$

Para los láseres de cavidad externa que tienen una L_0 de menos de 15 mm, la $(FSR)_{cavidad}$ es típicamente de más de poco más o menos 8-10 GHz.

En uno de sus aspectos, la invención se refiere a un módulo láser sintonizable configurado para emitir radiación de salida en un único modo longitudinal a una longitud de onda de emisión láser, comprendiendo el módulo láser

una cavidad externa que define una pluralidad de modos de cavidad;

un medio de ganancia para emitir un haz luminoso al interior de la cavidad externa;

un espejo sintonizable que comprende un retículo de difracción y un guiaondas planar que interactúa ópticamente con dicho retículo de difracción, formando el retículo de difracción y el guiaondas planar una estructura resonante, comprendiendo el espejo sintonizable adicionalmente un material transmisor de la luz que tiene un índice de refracción que varía en respuesta a un campo eléctrico aplicado al material transmisor de la luz, haciendo al espejo sintonizable sintonizable eléctricamente en respuesta a un voltaje alterno de amplitud V_{TM} y frecuencia f_A para así seleccionar una longitud de onda de resonancia λ_{TM} y para así modular en amplitud el haz luminoso reflejado o transmitido por el espejo sintonizable, y

un dispositivo controlador que es apto para alinear la longitud de onda de resonancia λ_{TM} del espejo sintonizable con al menos uno de los modos de cavidad analizando la componente modulada del haz luminoso reflejado o transmitido por el espejo sintonizable.

Breve descripción de los dibujos

La Fig. 1 es una ilustración simplificada del espejo sintonizable según una realización preferida de la invención.

La Fig. 2 es una ilustración gráfica de los modos longitudinales de la cavidad externa (A), de los modos de transmisión de la red de asignación de canales (B) y del ancho de banda del selector de canales, es decir, del elemento sintonizable (C).

La Fig. 3(a) es una ilustración gráfica de los modos longitudinales de cavidad dentro de la banda pasante de la red de asignación de canales seleccionados por el elemento sintonizable cuando el estado de oscilación del láser está en salto de modo.

La Fig. 3(b) es una ilustración gráfica de los modos longitudinales de cavidad dentro de la banda pasante de la red de asignación de canales seleccionados por el elemento sintonizable en estado de sincronismo de fase.

La Fig. 4(a) es una vista esquemática del conjunto láser sintonizable según una realización preferida de la invención.

La Fig. 4(b) es una vista esquemática del conjunto láser sintonizable según otra realización preferida de la invención.

La Fig. 5 es un diagrama que ilustra las pérdidas ópticas de la cavidad láser en función del ancho de banda al FWHM de un etalón FP que tiene una FSR de 50 GHz y está posicionado en la cavidad con un ángulo de inclinación con respecto a la perpendicular al haz óptico de 0,5º.

La Fig. 6 es un ejemplo de medición que muestra la potencia de salida del láser (línea continua) y la frecuencia óptica de salida (línea de trazos) en función de la corriente de inyección del diodo láser.

La Fig. 7 es una diagrama que ilustra la respuesta espectral del espejo sintonizable, que presenta una oscilación debido al voltaje de c.a. aplicado.

La Fig. 8 es una diagrama que ilustra la respuesta espectral del espejo sintonizable, mostrando también la dependencia de la profundidad de modulación con respecto a la longitud de onda incidente.

La Fig. 9 es un ejemplo de medición de la potencia de salida integrada del láser en función de la longitud de onda (línea fina continua) y de las componentes de c.a. de la potencia de salida del láser, a la frecuencia f_A (línea gruesa continua) y a $2f_A$ (línea de trazos).

La Fig. 10 es una vista esquemática de un circuito de control para la estabilización de la longitud de onda de un láser sintonizable según una realización de la invención.

Descripción de las realizaciones preferidas

El espejo sintonizable es un elemento electroóptico en el cual la sintonizabilidad se logra usando un material con índice refractivo dependiente del voltaje, y preferiblemente un material de cristal líquido (LC). Se muestra en la Fig. 1 una realización preferida del espejo sintonizable. El espejo sintonizable 1 comprende un guiaondas 2 formado sobre un sustrato 3 y un retículo de difracción 4 formado sobre el guiaondas 2. Sobre el retículo de difracción 4 está formada una capa de revestimiento 5 que llena al menos los intersticios de retículo de difracción, estando dicha capa de revestimiento hecha de un material de cristal líquido. El espesor del material de cristal líquido es preferiblemente de no más de 2 μm, y más preferiblemente es de poco más o menos 1 μm. Opcionalmente puede haber un recubrimiento antirreflexión 6 sobre la capa de revestimiento y/o un recubrimiento antirreflexión 7 sobre la superficie del sustrato 3 que es la opuesta al guiaondas. Dos conductores transparentes 8 y 9 están puestos sobre superficies opuestas de la capa de cristal líquido. Se da en la U.S. 6.215.928 una descripción más detallada de la estructura de un espejo sintonizable según esta realización preferida de la invención.

Un haz óptico 10, como p. ej. el haz emitido por un medio de ganancia (no ilustrado), incide en el espejo sintonizable en el lado del sustrato 3, que está preferiblemente hecho de silicio. El espejo sintonizable entonces refleja un haz modulado 21, siendo la modulación del haz ocasionada por el voltaje de c.a. aplicado. Debe entenderse que, a pesar de que se prefiere la incidencia del haz luminoso en el lado del sustrato, la incidencia de la luz puede también producirse en el lado opuesto del espejo.

En dependencia del voltaje o de la corriente a través del voltaje aplicado a los conductores, el espejo sintonizable refleja radiación solamente a una longitud de onda determinada (λ_{TM}). La radiación a todas las otras longitudes de onda pasa a través del espejo sintonizable. El espejo sintonizable está situado en uno de los extremos de la cavidad láser, es decir que forma una de las dos superficies reflectoras que definen la longitud de la cavidad externa. Así, el espejo sintonizable funciona tanto como elemento selectivo de la longitud de onda como como espejo final de la cavidad.

Está representado esquemáticamente en la Fig. 4(a) un sistema láser sintonizable según una realización preferida de la presente invención. El medio de ganancia 19 está basado en un diodo láser semiconductor, como por ejemplo un chip de ganancia FP de pozo cuántico múltiple de InGaAs/InP especialmente diseñado para aplicaciones láser de cavidad externa. El diodo comprende una faceta delantera 17 y una faceta trasera 16. La faceta trasera 16 del diodo es una faceta intracavidad y tiene un recubrimiento antirreflexión con una reflectancia residual medida del orden de $10^{-4}/10^{-5}$. Preferiblemente, el guiaondas del chip de ganancia está doblado de forma tal que tiene una incidencia a ángulo en la faceta trasera a fin de reducir adicionalmente las retrorreflexiones. La faceta delantera 17 es parcialmente reflectora y sirve de uno de los espejos finales de la cavidad externa. La reflectividad de la faceta delantera varía entre un 5% y un 30%. El haz emergente de la faceta trasera del diodo es colimado por una lente colimadora 11 que colima el haz sobre un elemento de pérdida espectralmente selectivo, que en la presente realización es un filtro etalón FP 12. En una realización preferida, el ancho de banda de ganancia del diodo láser es de aproximadamente 100 nm.

El láser puede ser diseñado de forma tal que las longitudes de onda de servicio queden alineadas con la red de canales de la ITU. En este caso, la longitud de onda láser es centrada con la red de la ITU por medio del etalón FP 12, que está estructurado y configurado para definir una pluralidad de picos de transmisión. El espaciamiento entre picos de transmisión, es decir, la gama espectral libre $(FSR)_{FP}$, que corresponde al espaciamiento entre canales, puede ser de p. ej. 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz o 25 GHz. La agudeza de los picos de transmisión (o bandas pasantes) está representada por el ancho de banda al FWHM del etalón FP, que de aquí en adelante se denomina $(FWHM)_{FP}$, o por la fineza, que es la relación de la FSR del etalón al ancho de banda FWHM.

Preferiblemente, el etalón FP está colocado en la cavidad con un ligero ángulo de inclinación con respecto a la perpendicular al haz óptico 15 a fin de impedir que la luz reflejada del etalón FP vuelva al diodo láser. El ángulo de inclinación del etalón FP está preferiblemente comprendido entre 0,4º y 0,8º, y más preferiblemente es de poco más o menos 0,5º.

Después del etalón FP 12, el haz llega a un espejo sintonizable 13, que junto con el primer espejo final define la longitud física L_0 de la cavidad. El espejo sintonizable 13 refleja la señal luminosa de regreso al medio de ganancia, lo cual redunda en un comportamiento resonante en la cavidad entre el espejo sintonizable y la faceta delantera 17 del medio de ganancia. En otras palabras, el camino óptico desde la faceta trasera del medio de ganancia hasta el espejo sintonizable forma un resonador que tiene una $(FSR)_{cavidad}$ que depende inversamente de la longitud efectiva L_{ef} de la cavidad externa [Ecuación (3)]. El haz láser es acoplado fuera de la cavidad externa por la faceta delantera parcialmente reflectora 17 del medio de ganancia. Opcionalmente puede estar situada una lente colimadora 14 a lo largo del camino óptico del haz de salida del láser.

El conjunto láser está diseñado para producir radiación en modo longitudinal prácticamente único y preferiblemente en modo transversal. Los modos longitudinales se refieren a la laserización simultánea a varias frecuencias discretas dentro de la cavidad láser. Los modos transversales corresponden a la variación espacial en la sección transversal de la intensidad del haz en la dirección transversal de la radiación de laserización. Generalmente una apropiada elección del medio de ganancia, como p. ej. un diodo láser semiconductor disponible comercialmente que incluya un guiaondas, garantiza un funcionamiento en modo espacial único o transversal.

El láser es configurado para emitir una radiación de salida a una frecuencia seleccionada de las de una pluralidad de frecuencias de salida igualmente espaciadas que coincidan con las frecuencias de canal igualmente espaciadas en un sistema WDM o DWDM. El láser es operativo para emitir una salida en modo longitudinal único a la longitud de onda λ_{CM} (CM = modo de cavidad), que depende de la respuesta espectral de los elementos ópticos de dentro de la cavidad y de la fase de la cavidad.

Para que se produzca el efecto láser en la cavidad láser, deben cumplirse dos condiciones: la condición para la resonancia y la condición para la ganancia, que pueden ser expresadas respectivamente mediante las ecuaciones siguientes

$$2j\Phi_{LD} + 2j\Phi_{FS} + 2j\Phi_{FP} + j\Phi_{R2} = 2jN\pi \quad (4)$$

$$G_{LD}^2(\lambda)\, G_{FP}^2(\lambda) \cdot R_1 \cdot R_2(\lambda) = 1 \quad (5)$$

donde N es un número entero, G_{LD} es la ganancia espectral del diodo láser, Φ_{LD} es el retardo de fase introducido por el diodo láser, Φ_{FP} es el retardo de fase introducido por el etalón FP, Φ_{FS} es el retardo de fase introducido por el espacio libre, G_{FP} es el espectro de transmisión del etalón FP, R_1 es la reflectividad de la faceta delantera del diodo láser, R_2 (λ) es la reflectividad del espejo sintonizable, y Φ_{R2} es el retardo de fase introducido por el espejo sintonizable. El retardo de fase del etalón Φ_{FP} está relacionado con la reflectividad de los espejos del etalón. Es sabido que la agudeza de la transmisión, representada por la fineza, aumenta con la reflectividad de los espejos del etalón. Así, el Φ_{FP} está relacionado, a través de una función apropiada, con el $(FWHM)_{FP}$. Combinando las ecuaciones (4) y (5) se obtiene la ecuación siguiente:

$$G_{LD}^2(\lambda)\, e^{2j\Phi_{LD}} \cdot e^{2j\Phi_{FS}} \cdot G_{FP}^2(\lambda) \cdot e^{2j\Phi_{FP}} \cdot R_1 \cdot R_2(\lambda) \cdot e^{j\Phi_{R2}} = e^{2jN\pi} \quad (6)$$

Los inventores han observado que el etalón FP introduce la contribución predominante a la alinealidad de fase en la cavidad láser en comparación con las contribuciones que son introducidas por los otros elementos que están presentes en la cavidad y por la propia cavidad. El elemento sintonizable selecciona uno de los picos del etalón. La alinealidad de fase del pico de etalón seleccionado puede así ser considerada como la alinealidad del etalón FP combinada con la del elemento sintonizable.

La Figura 2 es un diagrama que ilustra los distintos modos dentro de una cavidad láser que comprende un etalón de Fabry-Perot (FP) que tiene una pluralidad de bandas pasantes alineadas con la red de canales de la ITU como elemento de pérdida espectralmente selectivo. Se muestran en (A) los modos de cavidad inducidos por la cavidad externa resonante, es decir, mutuamente espaciados por la $(FSR)_{cavidad}$; en (B) se muestran los modos del etalón FP que tienen las posiciones de los picos sincronizadas con la red estándar de la ITU; y (C) es la banda pasante del elemento sintonizable, es decir, del espejo sintonizable. En el ejemplo ilustrado, la FSR del etalón FP rejilla, que se denomina de aquí en adelante $(FSR)_{FP}$, corresponde al espaciamiento entre las líneas de red de la red ITU de 100 GHz.

Para un espaciamiento entre los modos de cavidad "intrínseco" dado, $(FSR)_{cavidad}$, el espaciamiento entre los modos de cavidad dentro de los picos de transmisión del etalón, incluyendo el efecto de la alinealidad de fase del etalón, varía desde un espaciamiento entre los modos mínimo $s_{mín}$ hasta un espaciamiento entre los modos máximo $s_{máx}$. Con referencia a la Fig. 3(a), el $s_{mín}$ corresponde al estado en el que hay al menos dos modos de cavidad dentro de un

pico de transmisión del etalón y los dos modos que son adyacentes a la frecuencia f_{FP} que corresponde al máximo del pico de etalón (seleccionado) son prácticamente equidistantes de dicha frecuencia f_{FP}. En este estado no hay frecuencia dominante suficiente para proporcionar la necesaria longitud de coherencia, y puede producirse salto de modo longitudinal. En estado de salto de modo, el modo salta entre modos longitudinales de cavidad redundando en una repentina y discontinua variación de la longitud de onda y potencia de salida del láser. Las posiciones de los modos de cavidad fuera y dentro del pico del etalón están ilustradas en la Fig. 3(a) con cuadrados en blanco.

Con referencia a la Fig. 3(b), el $s_{máx}$ corresponde al estado en el que la frecuencia de un modo de cavidad prácticamente se superpone a la f_{FP}, que corresponde al óptimo funcionamiento del láser en modo único, es decir, a la laserización estable con (pleno) sincronismo de fase.

Los inventores han observado que las ventajosas características de filtración del etalón rejilla están relacionadas con la deseada precisión de frecuencia (longitud de onda) que se desea obtener en el sistema láser sintonizable. Dichos inventores han descubierto que, para una precisión de frecuencia dada, $+\Delta v$, el $(FWHM)_{FP}$ debería ser seleccionado de forma tal que se satisfaga la relación siguiente:

$$s_{min} \leq 2\Delta v \qquad (7)$$

Cuando se satisface la condición expresada por la Ecuación (7), se logra un *cuasi*-sincronismo de la cavidad láser.

El cumplir con la condición del *cuasi*-sincronismo de fase permite contar con flexibilidad en el diseño del láser, que puede por ejemplo hacerse a la medida de las distintas necesidades de los clientes. Según la presente invención son alcanzables precisiones de frecuencia en la frecuencia de salida del láser de hasta aproximadamente 0,5 GHz.

Los inventores han observado una bastante débil dependencia del $s_{mín}$ con respecto al ancho de banda de resolución del elemento sintonizable, es decir, del espejo sintonizable. Se han hallado variaciones de 0,1-0,2 GHz del $(FWHM)_{FP}$ para FWHM del elemento sintonizable que van desde aproximadamente 50 hasta 200 GHz.

Por medio de la Ecuación (6) es posible obtener el valor o la gama de valores del retardo de fase del etalón FP, y por consiguiente del $(FWHM)_{FP}$, para un valor deseado de $s_{mín}$. El valor deseado de $s_{mín}$ está relacionado con la precisión de frecuencia requerida o deseada del láser sintonizable.

El etalón FP introduce un retardo de fase en la cavidad láser que induce una compresión de los modos de cavidad, es decir, una reducción del espaciamiento entre los modos de la cavidad, en correspondencia con los picos de transmisión del etalón. Haciendo referencia a la Fig. 3(a), el $(FWHM)_{FP}$ es seleccionado para obtener los deseados valores de $s_{mín}$ teniendo en cuenta el efecto de compresión de los modos de la cavidad. Los valores de $s_{mín}$ están relacionados con la requerida precisión de frecuencia del láser, Δv, por medio de la Ecuación (7).

Las Tablas I y II indican varios valores de $s_{mín}$, $s_{máx}$ y de supresión lateral por parte del etalón (ESS) para distintos valores de $(FWHM)_{FP}$ para $(FSR)_{FP}$ = 100 GHz. Los valores fueron obtenidos de simulaciones numéricas de la Ecuación (6). La Tabla I se refiere a una cavidad láser relativamente larga, es decir de L_0 = 25 mm, y la Tabla II se refiere a una cavidad láser relativamente corta, es decir de L_0 = 12,5 mm. Tanto para la Tabla I como para la Tabla II, el ancho de banda FWHM del espejo sintonizable, $(FWHM)_{TM}$, es de 100 GHz. Se hallaron diferencias de 0,1-0,2 GHz en los valores de $(FWHM)_{FP}$ para $(FWHM)_{TM}$ que van desde 50 a 200 GHz, lo cual indica una débil dependencia del $(FWHM)_{FP}$ con respecto al $(FWHM)_{TM}$ dentro de la gama considerada.

TABLA I

L_0 = 25 mm	$(FSR)_{cavidad}$ = 5,3 GHz		$(FSR)_{FP}$ = 100 GHz	
$(FWHM)_{FP}$ (GHz)	$(Fineza)_{FP}$	$s_{mín}$ (GHz)	$s_{máx}$ (GHz)	ESS (dB)
1,97	50,8	1,4	1,9	12,8
4,07	25,6	2,3	2,6	8,0
5,94	16,8	2,8	3,1	6,0
7,92	12,6	3,2	3,4	4,6
10,05	9,9	3,6	3,7	3,6

TABLA II

L_0 = 12,5 mm	$(FSR)_{cavidad}$ = 9,6 GHz		$(FSR)_{FP}$ = 100 GHz	
$(FWHM)_{FP}$ (GHz)	$(Fineza)_{FP}$	$s_{mín}$ (GHz)	$s_{máx}$ (GHz)	ESS (dB)
1,97	50,8	1,6	2,8	19,8
4,07	25,6	2,9	3,9	13,8
5,94	16,8	3,7	4,7	10,9
7,92	12,6	4,5	5,3	8,9
10,05	9,9	5,2	5,9	7,4

Como queda claro a la luz de las Tablas I y II, la compresión de los modos de la cavidad se incrementa al disminuir el valor de $(FWHM)_{FP}$ y se acrecienta en el caso de las longitudes de cavidad más cortas. Por ejemplo, para $(FWHM)_{FP}$ = 4,07 GHz, el espaciamiento mínimo entre los modos de la cavidad se ve reducido en aproximadamente un 57% en el caso de L_0 = 25 mm, mientras que la reducción del espaciamiento entre los modos es de aproximadamente un 70% en el caso de L_0 = 12,5 mm. Además, los resultados que se indican en las Tablas I y II indican que la ESS es más pronunciada en una cavidad láser más corta, a igualdad de todos los otros parámetros láser.

Por consiguiente, las longitudes de cavidad relativamente pequeñas tienen la ventaja de tener una ESS relativamente grande, es decir, un elemento de pérdida espectralmente selectivo, tal como un etalón FP tiene una mejor selectivamente espectral en las cavidades láser más cortas. Preferiblemente, las longitudes de la cavidad no deberían ser de más de aproximadamente 15 mm para permitir un diseño del láser en el cual el elemento rejilla tenga una buena selectividad espectral.

Las Tablas III y IV indican valores del $(FWHM)_{FP}$, de la fineza y del $s_{mín}$ para una longitud de cavidad L_0 = 12,5 mm y una $(FSR)_{FP}$ de 50 y 25 GHz, respectivamente.

TABLA III

L_0 = 25 mm $(FSR)_{cavidad}$ = 9,6 GHz

$(FSR)_{FP}$ = 50 GHz

$(FWHM)_{FP}$ (GHz)	$(Fineza)_{FP}$	$s_{mín}$ (GHz)
1,97	25,4	1,8
4,07	12,3	3,0
5,94	8,42	4,0
7,92	6,3	4,8
10,05	5,0	5,5

TABLA IV

L_0 = 12,5 mm $(FSR)_{cavidad}$ = 9,6 GHz

$(FSR)_{FP}$ = 25 GHz

$(FWHM)_{FP}$ (GHz)	$(Fineza)_{FP}$	$s_{mín}$ (GHz)
1,97	12,7	1,8
4,07	6,1	3,3
5,94	4,2	4,5
7,92	3,2	5,5
10,05	2,5	6,2

Los resultados indican que una $(FSR)_{FP}$ más baja requiere un etalón ligeramente más selectivo, es decir, con menores anchos de banda de transmisión, si debe lograrse una relativamente alta precisión de frecuencia.

La Tabla V indica valores del $(FWHM)_{FP}$ y del $s_{mín}$ para distintos valores de $(FSR)_{FP}$ para una cavidad láser de una longitud de cavidad L_0 = 10 mm.

TABLA V

L_0 = 10 mm $(FSR)_{cavidad}$ = 12 GHz

$(FSR)_{FP}$=	25 GHz	50 GHz	100 GHz
$(FWHM)_{FP}$ (GHz)	$s_{mín}$ (GHz)	$s_{mín}$ (GHz)	$s_{mín}$ (GHz)
1,97	1,9	1,8	1,7
4,07	3,6	3,2	3,0
5,94	5,0	4,3	4,0
7,92	6,2	5,3	4,9
10,05	7,1	6,2	5,7

Como ejemplo de la posible relación entre $(FWHM)_{FP}$ y $s_{mín}$, los inventores han inferido de los ejemplos que se indican en las Tablas I a V una dependencia aproximadamente lineal entre $(FWHM)_{FP}$ y $s_{mín}$, que puede expresarse mediante la relación siguiente:

$$(FWHM)_{FP} = \alpha + \beta \cdot s_{min}. \qquad (8)$$

Por ejemplo, con referencia a los datos que se indican en la Tabla V para L_0 = 10 mm y $(FSR)_{FP}$ = 100 GHz, $\alpha \cong$ -1,7 GHz y $\beta \cong 2{,}0$. Si la Δv requerida es de ± 1,25 GHz y $s_{mín} \approx 2\Delta v$ [de la Ecuación (7)], $(FWHM)_{FP} \approx$ 3,3 GHz.

Haciendo de nuevo referencia al ejemplo que se indica en la Tabla 2, para L_0 = 12,5 mm, $(FSR)_{FP}$ = 100 GHz y Δv es ± 1,25 GHz, $(FWHM)_{FP} \approx$ 3,6 GHz. Considerando todos los ejemplos que se indican en las Tablas I a V, para una longitud de cavidad de entre 10 y 12,5 mm y una $(FSR)_{FP}$ que vaya de 25 a 100 GHz, una precisión de frecuencia de ± 1,25 GHz corresponde a un valor de $(FWHM)_{FP}$ que va desde aproximadamente 2,6 GHz hasta aproximadamente 3,6 GHz.

La intersección con el eje del $(FWHM)_{FP}$ y la pendiente dependen de la longitud de la cavidad y del espaciamiento entre canales, $\alpha=\alpha[(FSR)_{FP}, L_{ef}]$ y $\beta=\beta[(FSR)_{FP}, L_{ef}]$. Para una L_0 comprendida entre 7,5 y 15 mm y un espaciamiento entre canales comprendido entre 25 y 100 GHz, α va aproximadamente desde -0,8 hasta -2,7 GHz y β va aproximadamente desde 1,2 hasta 2,6. La pendiente y la intersección aumentan en valor absoluto al aumentar el espaciamiento entre canales y al aumentar la L_{ef} (L_0).

Los inventores han descubierto que, para una longitud del camino óptico de no más de aproximadamente 15 mm, se logra *cuasi*-sincronismo de fase para valores de $(FWHM)_{FP}$ de no más de aproximadamente 8 GHz. Preferiblemente, el $(FWHM)_{FP}$ es de no más de 6 GHz.

Para la elección del $(FWHM)_{FP}$ óptimo debería también tenerse en cuenta que las pérdidas ópticas en la cavidad láser aumentan con la selectividad espectral del etalón. Por añadidura, con la disminución del $(FWHM)_{FP}$ aumenta la densidad de potencia óptica en el etalón, lo cual conduce a posible inestabilidades en la respuesta espectral del etalón ocasionadas por efectos termoópticos. Estas consideraciones establecen en la práctica un límite inferior en la elección del valor óptimo de $(FWHM)_{FP}$.

La Figura 5 muestra una creciente pérdida óptica con un $(FWHM)_{FP}$ decreciente para un etalón FP que está posicionado a un ángulo de inclinación de 0,5º y tiene una $(FSR)_{FP}$ = 50 GHz y un diámetro de campo de modo (MFD) de 500 μm. Para un $(FWHM)_{FP}$ de menos de aproximadamente 3 GHz, las pérdidas ópticas devienen de más de 2 dB, mientras que para un $(FWHM)_{FP}$ de 2 GHz las pérdidas ópticas son de más de 3 dB.

El $(FWHM)_{FP}$ es entonces preferiblemente de más de aproximadamente 2 GHz, y más preferiblemente es de más de aproximadamente 3 GHz.

Cuando se cumple la condición del *cuasi*-sincronismo pasivo de fase de la frecuencia de laserización, es decir, cuando está correctamente seleccionado el $(FWHM)_{FP}$ del etalón, es posible poner en ejecución un control en circuito cerrado que haga que el láser opere a la deseada longitud de onda que corresponde al pico del etalón (el seleccionado por el espejo sintonizable), y por consiguiente a un máximo local de la potencia de salida del láser.

El control en circuito cerrado para alinear el modo de laserización con el pico de etalón seleccionado puede realizarse por ejemplo ajustando la corriente de inyección del medio de ganancia, o sea p. ej. del diodo láser. Una variación de la corriente de inyección del diodo láser induce una variación del índice de refracción del medio de ganancia y por consiguiente una variación de la fase de la salida láser. Entonces pueden usarse pequeños ajustes de la corriente de inyección del diodo láser para maximizar la potencia de salida.

La Figura 6 muestra la potencia de salida del láser (línea continua) en función de la corriente del diodo láser de inyección, I_{LD}, para un ejemplo de láser sintonizable según la invención. En los máximos locales de la potencia de salida se obtiene alineación del modo de cavidad con el pico de etalón (seleccionado). Los mínimos locales corresponden al estado de salto de modo. La Figura 6 muestra también la dependencia de la frecuencia láser con respecto a la I_{LD} (línea de trazos). La diferencia entre la frecuencia máxima y la frecuencia mínima corresponde a la distancia mínima entre dos modos de cavidad adyacentes dentro del pico de etalón seleccionado, es decir, a $s_{mín}$.

Puede verse por la Fig. 6 que puede lograrse más de un estado de funcionamiento estable para el láser, correspondiendo los estados de funcionamiento estable a los picos de la potencia de salida. La potencia de salida puede ser seleccionada variando la corriente de inyección para que la misma corresponda a uno de los de una serie de valores discretos, siendo cada valor de potencia en torno a los máximos locales estable a lo largo del tiempo.

Si el láser entrase en deriva por alguna razón, como p. ej. por causa de efectos térmicos o de envejecimiento, bastaría con ajustar solamente la corriente de inyección para corregir la frecuencia, evitando así que se produzca salto de modo a base de centrar rápidamente y con precisión la frecuencia.

El láser sintonizable se conecta conectando el diodo láser con una determinada corriente de inyección comprendida dentro de la gama que garantiza el funcionamiento en modo único. A cualquier valor inicial de la corriente de inyección dentro de la gama de funcionamiento en modo único, la configuración del láser sintonizable permite un rápido y preciso centraje de la frecuencia de canal, incluso considerando las posibles desviaciones de la corriente debidas a efectos térmicos o de envejecimiento.

Puede ponerse en ejecución un sencillo algoritmo que maximice la potencia de salida del láser para la fina sintonización del modo de cavidad bajo el pico del modo del etalón.

El espejo sintonizable en la cavidad láser sirve de elemento de sintonización aproximada que discrimina entre los picos del etalón FP. La precisión y el control del posicionamiento del elemento sintonizable con respecto a la frecuencia de canal seleccionada es de gran importancia, especialmente cuando se requieren grandes precisiones de la frecuencia láser.

En las realizaciones preferidas, el elemento sintonizable es un espejo sintonizable. Haciendo de nuevo referencia a la Fig. 4(a), la estructura del espejo sintonizable 13 según una de las realizaciones preferidas está ilustrada en la Fig. 1. El espejo sintonizable se hace funcionar con un voltaje alterno de amplitud V_{TM} a una frecuencia f_A para impedir el deterioro del cristal líquido debido a la fatiga por c.c. La frecuencia del voltaje aplicado puede ir desde 20 kHz hasta 200 kHz. La respuesta espectral del espejo sintonizable es una curva con una forma por ejemplo similar a la de una curva lorentziana, centrada en λ_{TM}, que tiene un ancho de banda $(FWHM)_{TM}$ situado dentro de la gama de valores que va desde aproximadamente 50 GHz hasta aproximadamente 250 GHz. En una realización particular, la λ_{TM} puede ser sintonizada dentro de una gama de 80 nm.

En una realización preferida, la incidencia del haz es prácticamente perpendicular a las superficies del guiaondas del espejo sintonizable. Un haz incidente con potencia constante a una longitud de onda λ es reflejado por el espejo cuando la longitud de onda incidente coincide con λ_{TM} o es cercana a la misma. El haz reflejado por el espejo sintonizable es modulado en amplitud con frecuencia f_A y sus correspondientes armónicas de orden superior $2f_A$, $3f_A$, ..., nf_A, debido al voltaje de c.a. aplicado.

El voltaje de c.a. induce una oscilación de la longitud de onda central λ_{TM} de la respuesta espectral del espejo sintonizable. La Figura 7 ilustra esquemáticamente la respuesta espectral del espejo sintonizable registrando gráficamente la potencia reflejada normalizada en función de la longitud de onda, suponiendo que la respuesta espectral del espejo tiene una forma gaussiana. La curva espectral oscila con frecuencia f_A entre un valor de pico de $\lambda_{TMmín}$ y de la $\lambda_{TMmáx}$. En la Fig. 7, la línea continua representa la curva centrada en λ_{TM}, mientras que las líneas de trazos representan las curvas centradas en $\lambda_{TMmín}$ y en la $\lambda_{TMmáx}$. Esta oscilación induce una modulación de amplitud del haz reflejado, que depende de la posición de la longitud de onda incidente λ con respecto a la λ_{TM}. La Figura 8 ilustra el efecto de la modulación del haz reflejado para dos haces incidentes, teniendo el primero una longitud de onda aproximadamente igual a la del espejo sintonizable, es decir que $\lambda_1 \sim \lambda_{TM}$, y teniendo el segundo una longitud de onda distinta de λ_{TM}, como por ejemplo $\lambda_2 < \lambda_{TM}$. Para el haz incidente a λ_1, la oscilación de la curva espectral induce una modulación de amplitud a la frecuencia f_A (y a sus armónicas de orden superior) en el haz reflejado, teniendo la modulación una profundidad de modulación mínima. En contraste con ello, la oscilación de la curva espectral induce una modulación

con una profundidad de modulación relativamente mayor si la longitud de onda incidente λ_2 es considerablemente distinta de λ_{TM}, siendo la profundidad de modulación mayor al aumentar la diferencia de longitud de onda, en valor absoluto, $\Delta\lambda = I\lambda - \lambda_{TM}I$. En consecuencia, es posible sacar la diferencia de longitudes de onda $\Delta\lambda$ del análisis espectral de la componente modulada del haz reflejado.

Las profundidades de modulación pueden ir desde aproximadamente un 0,1% hasta aproximadamente un 10%, para una gama de frecuencias f_A de entre 20 y 200 kHz. La profundidad de modulación es también función de la amplitud del voltaje V_{TM}, siendo la modulación más profunda al aumentar la amplitud del voltaje. La amplitud del voltaje puede ir desde 3 V hasta 30 V como valor rms.

Las grandes profundidades de modulación corresponden al estado de desalineación del espejo sintonizable con el modo de cavidad incidente, mientras que la mínima profundidad de modulación corresponde al estado de alineación (óptima).

Una manera de obtener $\Delta\lambda$, es decir, el grado de centraje de la longitud de onda incidente con la longitud de onda resonante del espejo sintonizable, es la de medir la componente modulada de la potencia del haz reflejado. Es preferible medir la potencia del haz externamente a la cavidad para reducir los elementos ópticos en la cavidad láser, que pueden ser fuente de pérdidas de inserción o inducir una perturbación de fase. Haciendo referencia a la Fig. 4(b), el fotodetector 18 puede ponerse delante del medio de ganancia 10, en la salida del láser. Según esta realización, el haz de salida del láser es detectado tras haber sido dividido por medio de un divisor de haz 20, como p. ej. un bifurcador de 98%/2%.

Como alternativa puede medirse la componente modulada de la potencia transmitida a través del espejo sintonizable. Haciendo referencia a la Fig. 4(a), el espejo sintonizable 13 tiene una reflectividad típica de un 70%-95%, permitiendo que sea transmitida una (pequeña) parte de la luz incidente. Obviamente, el mínimo de transmitancia se da a la longitud de onda λ_{TM}. En la configuración láser que se ilustra en la Fig. 4(a), un fotodetector 18, como p. ej. un fotodiodo, está situado externamente a la cavidad para medir la luz transmitida a través del espejo sintonizable.

En ambas configuraciones que están ilustradas en las Figs. 4(a) y 4(b), la componente modulada de la luz transmitida externamente, como p. ej. la potencia transmitida en c.a. [Fig.4(a)], o la potencia de salida láser en c.a. [Fig.4(b)], P_f, pueden ser medidas por medio del fotodetector seguido por o integrado en un analizador del espectro eléctrico, como p. ej. un osciloscopio (no ilustrado). Por ejemplo puede conectarse un fotodiodo directamente al osciloscopio. Debe entenderse que el análisis de la(s) componente(s) modulada(s) puede ser realizado por un circuito electrónico conectado al fotodiodo, el cual puede incluir un filtro electrónico que seleccione la frecuencia de modulación del voltaje de c.a. y opcionalmente un preamplificador entre el fotodiodo y el filtro electrónico.

La potencia transmitida o potencia de salida láser recibida por el fotodetector 18 es función de la longitud de onda. Considerando la configuración de la Fig. 4(b), si varía la longitud de onda del haz reflejado hay una variación de la potencia reflejada. La Figura 9 muestra un ejemplo de medición de la potencia reflejada referida a la longitud de onda. La línea continua delgada representa la potencia medida total P_i, que es la respuesta espectral del espejo sintonizable. El máximo de P_i corresponde a la longitud de onda resonante λ_{TM}. La línea continua gruesa representa la componente modulada de la potencia de salida del láser a la frecuencia f_A, P_f', que presenta un pronunciado mínimo en correspondencia con la longitud de onda resonante. Pueden también medirse las componentes moduladas de armónicas de orden superior. En la Fig. 9, la componente modulada a la frecuencia $2f_A$, P_f", está ilustrada con una línea de trazos. La Figura 9 muestra claramente que las componentes moduladas de la potencia de salida láser son en varios órdenes de magnitud más sensibles a las variaciones de la longitud de onda que la potencia integrada P_i. Puesto que tanto la potencia de salida como su componente modulada dependen de la potencia de entrada, es decir, de la potencia del haz incidente, la relación P_j/P_f puede ser supervisada para el control de la longitud de onda.

La amplitud de la modulación del haz reflejado [Fig. 4(b)] o transmitido [Fig. 4(a)] por el espejo sintonizable indica la magnitud del ajuste requerido para la alineación del selector de canales, es decir, del espejo sintonizable, con los modos de cavidad. La fase de la modulación del haz reflejado o transmitido indica la dirección del ajuste. Operativamente, en el conjunto láser, una componente de c.a. de la potencia óptica a la salida del láser y su correspondiente fase son medidas para evaluar la magnitud el signo de la diferencia de longitudes de onda entre la longitud de onda del modo de cavidad λ_{CM} y la longitud de onda de pico del espejo sintonizable λ_{TM}, es decir que $\Delta\lambda = \lambda_{CM} - \lambda_{TM}$. A fin de reducir o eliminar la diferencia de longitudes de onda $\Delta\lambda$, se busca la minimización de la componente de c.a. de la potencia óptica variando el voltaje V_{TM} aplicado al espejo sintonizable. Puede ponerse en ejecución con esta finalidad un bucle de realimentación electrónica.

El algoritmo de control para la alineación del espejo sintonizable asegura que la profundidad de modulación de la señal de salida del láser no sea de más de aproximadamente ±2% en toda la gama de sintonización del láser, o sea, p. ej. en la banda C, de 1530 a 1565 nm. De esta manera, el ensanchamiento del ancho de línea espectral de la señal de salida del láser es de no más de aproximadamente 100 MHz para longitudes de onda de emisión que van desde 1530 hasta 1565 nm.

La frecuencia de la modulación es seleccionada para que sea lo suficientemente baja como para evitar la interferencia con la señal portadora modulada proporcionada por el láser de cavidad externa durante la transmisión. Preferiblemente, la frecuencia de modulación está comprendida dentro de la gama que va desde 20 kHz hasta 200 kHz.

Con este sistema puede realizarse una supervisión de señal en tiempo real. Los puntos de funcionamiento inicial para todos los canales en la red de la ITU se guardan en una tabla de referencias. En la tabla de referencias cada canal está asociado a una amplitud de voltaje V_{TM} aplicada al espejo sintonizable, y por consiguiente a una longitud de onda de canal seleccionable λ_{TM}.

Preferiblemente, la estabilización del modo en la cavidad láser se logra alineando el modo de la cavidad a la longitud de onda λ_{CM}, con el centro del pico de transmisión del etalón a la longitud de onda λ_{FP}. Como se ha descrito anteriormente, el centraje del pico del etalón con el modo de la cavidad puede obtenerse ajustando la corriente de inyección I_{LD} del diodo láser y supervisando la potencia de salida del láser. La potencia de salida del láser puede ser medida por medio de un fotodetector situado delante del medio de ganancia, en la salida del láser, como se ilustra en la configuración de la Fig. 4(b). La tabla de referencias puede guardar también los valores operativos iniciales de la corriente de inyección I_{LD}, que están asociados a las frecuencias de canal.

En una realización preferida, la supervisión tanto de la potencia total del láser como de una de sus componentes moduladas, para alinear tanto el modo de cavidad con el pico del etalón como el espejo sintonizable con el modo de cavidad, es realizada por medio de un fotodiodo en la configuración que se muestra en la Fig. 4(b). Para alinear el espejo sintonizable con el modo de cavidad seleccionado, se analiza la componente de c.a. de la potencia de salida, mientras que para alinear el modo de cavidad con el pico del etalón se busca la maximización de la potencia de salida total. Pueden ser puestos en ejecución con esta finalidad dos algoritmos de control que operan secuencialmente.

Hay que señalar que los dos algoritmos de control pueden operar independientemente uno de otro, y así por ejemplo, el algoritmo de control para alinear el espejo sintonizable con el modo de cavidad funciona también si no se cumple la condición de pérdida mínima, es decir, de sincronismo de fase del modo de cavidad.

La Figura 10 muestra una estructuración esquemática de un circuito de control para estabilización de longitud de onda y modo de un sistema láser según una realización de la presente invención. Se dan los mismos números de referencia a los elementos del láser sintonizable que corresponden a los que se muestran en la Fig. 4(b) y se omite su explicación detallada. El conjunto láser encaja en un paquete mariposa de 14 patillas 56 con patillas conductoras 55 y rabillo de fibra 51. El paquete que aloja al conjunto láser con las conexiones de salida, como p. ej. patillas conductoras y/o rabillos de fibra, forma el módulo láser sintonizable 50. El fotodetector 18 está conectado eléctricamente a un controlador 53. El controlador pone en ejecución los algoritmos de control para el control de frecuencia y modo. Cuando el láser es conectado o cuando se pone un canal, el controlador lee en la tabla de referencias la corriente I_{LD} a aplicar al diodo láser y el voltaje V_{TM} a aplicar al espejo sintonizable. Entonces el controlador empieza a ejecutar en secuencia el algoritmo de circuito cerrado para que el control de modo alinee el modo de cavidad bajo el pico de etalón seleccionado y el algoritmo para el control de frecuencia para alinear el selector de canales con el modo de cavidad oscilante. En el sistema todas las corrientes son controladas por medio del controlador 53 por un programa que se ejecuta en un PC 54. La información de realimentación sobre la alineación del espejo sintonizable es proporcionada por un circuito de supervisión de la potencia óptica en tiempo real y el PC es usado como controlador para ajustar el voltaje de sintonización para alcanzar la longitud de onda deseada. El PC es también usado como controlador para ajustar la corriente de inyección del diodo láser para alcanzar el estado de sincronismo de fase. Debe entenderse que las funciones desempeñadas por el controlador y por el PC, o sea el dispositivo controlador, pueden estar integradas en una única tarjeta de circuito electrónico que puede ser integrada al módulo láser sintonizable. Con la expresión "módulo láser" nos referimos en este contexto a un sistema que comprende el conjunto láser, opcionalmente empaquetado en un paquete de alojamiento, y un dispositivo controlador tal como una tarjeta de circuito electrónico apta para alinear la longitud de onda de resonancia λ_{TM} del espejo sintonizable con al menos uno de los modos de cavidad analizando la componente modulada del haz luminoso reflejado o transmitido por el espejo sintonizable.

Preferiblemente, el módulo láser sintonizable es estabilizado en temperatura a fin de minimizar la deriva de la longitud de la cavidad óptica y/o estabilizar la fase de la cavidad láser. Con referencia a la Fig. 10, el medio de ganancia 10 y la lente delantera 14 pueden montarse en un refrigerador termoeléctrico (TEC) (no ilustrado) que tenga una estabilidad de temperatura de aproximadamente 0,2ºC.

El control de temperatura puede también permitir finos ajustes para estabilización de frecuencia. En este caso puede crearse antes del funcionamiento del láser una tabla de referencias en la cual cada canal de la red de la ITU esté asociado tanto a la corriente de inyección del diodo láser como a una temperatura T_1 del TEC, es decir, del medio de ganancia. Las ligeras variaciones de T_1 corresponden a pequeñas variaciones de la fase de la cavidad láser, que puede así ser ajustada para una fina sintonización de la longitud de onda del modo de cavidad con el pico de longitud de onda seleccionado del etalón de Fabry-Perot, es decir, $\lambda_{CM} \sim \lambda_{FP}$. Puede encontrarse un comportamiento similar al ilustrado en la Fig. 6 entre la potencia de salida y la temperatura del diodo láser. Sin embargo se prefiere el método de variar la corriente I_{LD} para la alineación del modo de cavidad debido a los grados de rampa en las variaciones de temperatura, lo cual hace que sea en general más lenta la respuesta del láser a la inestabilidad.

Preferiblemente, el etalón FP se pone en un TEC que tenga una estabilidad de temperatura de aproximadamente 0,2ºC. La estabilidad de temperatura del etalón FP es importante a fin de sincronizar los picos del etalón con las franjas de la ITU. Típicamente, para los etalones FP que están disponibles comercialmente la sensibilidad a la temperatura de la frecuencia de pico para alineación con la red de la ITU es de aproximadamente 1,3 GHz/ºC. La temperatura puede ser ajustada durante la caracterización inicial del sistema láser. El espejo sintonizable puede ponerse en el TEC con el etalón FP. La estabilización de la temperatura del espejo sintonizable es especialmente deseable en el caso de

los espejos sintonizables que incluyen un cristal líquido, puesto que las propiedades del cristal líquido pueden variar debido a las fluctuaciones térmicas.

Como alternativa, el chip de ganancia, el etalón FP y el opcionalmente el espejo sintonizable pueden ponerse en el mismo TEC. A pesar de que en este caso no es posible la sintonización de fase de la cavidad láser ajustando la temperatura, el uso de un único TEC puede ser ventajoso en cuanto al coste del paquete y a la simplificación del control de la temperatura.

Referencias citadas en la descripción

Esta lista de referencias que cita el solicitante se aporta solamente en calidad de información para el lector y no forma parte del documento de patente europea. A pesar de que se ha procedido con gran esmero al compilar las referencias, no puede excluirse la posibilidad de que se hayan producido errores u omisiones, y la OEP se exime de toda responsabilidad a este respecto.

Documentos de patente citados en la descripción

- US 6526071 B [0004]
- US 20030007526 A [0012]
- US 6366592 B [0007]
- US 6205159 B [0016]
- US 20030012239 A [0009]
- US 6215928 B [0018] [0042]
- US 20030007522 A [0011]

Literatura no de patentes que se cita en la descripción

- Frequency locking of a tunable liquid-crystal filter. *Journal of Applied Physics*, 1992, vol. 71, 2464-66 [0015]

REIVINDICACIONES

1. Método para seleccionar la longitud de onda de emisión de un láser sintonizable que tiene una cavidad externa que define una pluralidad de modos de cavidad, donde la selección se hace por medio de un espejo sintonizable (1; 13) que comprende un retículo de difracción (4) y un guiaondas planar, estando dicho retículo de difracción (4) formado sobre dicho guiaondas planar, formando el retículo de difracción y el guiaondas planar (2) una estructura resonante, comprendiendo el espejo sintonizable (1; 13) adicionalmente un material transmisor de la luz (5) que llena al menos los intersticios del retículo de difracción y tiene un índice de refracción que varía en respuesta a un campo eléctrico aplicado al material transmisor de la luz (5), haciendo al espejo sintonizable (1) sintonizable eléctricamente, comprendiendo dicho método los pasos de:

- emitir un haz luminoso (10) por parte de un medio de ganancia (19) a la cavidad externa;

- aplicar un voltaje alterno de amplitud V_{TM} al material transmisor de la luz (5) del espejo sintonizable (1; 13) a una frecuencia f_A seleccionando con ello una longitud de onda de resonancia λ_{TM} de la estructura de resonancia y modulando con ello en amplitud el haz luminoso (21) reflejado o transmitido por el espejo sintonizable (1; 13), y

- alinear la longitud de onda de resonancia λ_{TM} del espejo sintonizable (1; 13) con al menos uno de los modos de cavidad analizando la componente modulada del haz luminoso (21) reflejado o transmitido por el espejo sintonizable (1; 13) a base de variar la amplitud V_{TM} del voltaje aplicado al espejo sintonizable (1; 13) para así minimizar la amplitud de la componente modulada del haz luminoso (21) reflejado por el espejo sintonizable o transmitido a través del espejo sintonizable.

2. Método según la reivindicación 1, donde la modulación de amplitud del haz luminoso reflejado por el espejo sintonizable (1; 13) o transmitido a través del mismo es controlada para que no sea de más de ±2%.

3. Método según la reivindicación 2, donde la modulación de amplitud del haz luminoso reflejado por el espejo sintonizable (1; 13) o transmitido a través del mismo es controlada para que no sea de más de ±1%.

4. Método según la reivindicación 1, donde la componente modulada analizada está a la frecuencia f_A.

5. Método según la reivindicación 1, donde la componente modulada analizada está a la frecuencia $2f_A$.

6. Método según la reivindicación 1, donde la selección por medio del espejo sintonizable (1; 13) incluye la introducción de un elemento filtrante entre el medio de ganancia y el espejo sintonizable (1; 13), definiendo dicho elemento de pérdida espectralmente selectivo (12) al menos una banda pasante que comprende al modo de cavidad que es al menos uno de los modos de cavidad.

7. Método según la reivindicación 6, donde el elemento de pérdida espectralmente selectivo (12) es un elemento rejilla que define una pluralidad de bandas pasantes que están prácticamente alineadas con correspondientes canales de una red de longitudes de onda.

8. Método según las reivindicaciones 6 o 7, que comprende adicionalmente el paso de alinear una banda pasante del elemento de pérdida espectralmente selectivo con el modo de cavidad que es al menos uno de los modos de cavidad ajustando la corriente de inyección del medio de ganancia (19) para maximizar la potencia de salida del láser.

9. Método según la reivindicación 8, donde el paso de alinear una banda pasante del elemento de pérdida espectralmente selectivo (12) con el modo de cavidad que es al menos uno de los modos de cavidad y el paso de alinear la longitud de onda de resonancia λ_{TM} del espejo sintonizable (1; 13) con el modo de cavidad que es al menos uno de los modos de cavidad son realizados secuencialmente.

10. Módulo láser sintonizable configurado para emitir radiación de salida en un único modo longitudinal a una longitud de onda de emisión láser, comprendiendo el módulo láser

- una cavidad externa que define una pluralidad de modos de cavidad;

- un medio de ganancia (19) para emitir un haz luminoso al interior de la cavidad externa;

- un espejo sintonizable (1) que comprende un retículo de difracción (4) y un guiaondas planar (2), estando dicho retículo de difracción formado sobre dicho guiaondas planar, formando el retículo de difracción (4) y el guiaondas planar (2) una estructura resonante, comprendiendo el espejo sintonizable (1) adicionalmente un material transmisor de la luz (5) que llena al menos los intersticios del retículo de difracción y tiene un índice de refracción que varía en respuesta a un campo eléctrico aplicado al material transmisor de la luz (5), haciendo al espejo sintonizable eléctricamente sintonizable en respuesta a un voltaje alterno de amplitud V_{TM} y frecuencia f_A, para así seleccionar una longitud de onda de resonancia λ_{TM} y para así modular en amplitud el haz luminoso (21) reflejado o transmitido por el espejo sintonizable, y

- un dispositivo controlador apto para alinear la longitud de onda de resonancia λ_{TM} del espejo sintonizable (1) con al menos uno de los modos de cavidad analizando la componente modulada del haz luminoso (21) reflejado o transmitido por el espejo sintonizable (1), desempeñando dicho dispositivo controlador dicha función de analizar la componente modulada del haz luminoso (21) reflejado por el espejo sintonizable o transmitido a través del espejo sintonizable variando la amplitud V_{TM} del voltaje aplicado al espejo sintonizable (1) para así minimizar la amplitud de la componente modulada del haz luminoso.

11. Módulo láser sintonizable según la reivindicación 10, donde el dispositivo controlador está incluido en una tarjeta de circuito electrónico.

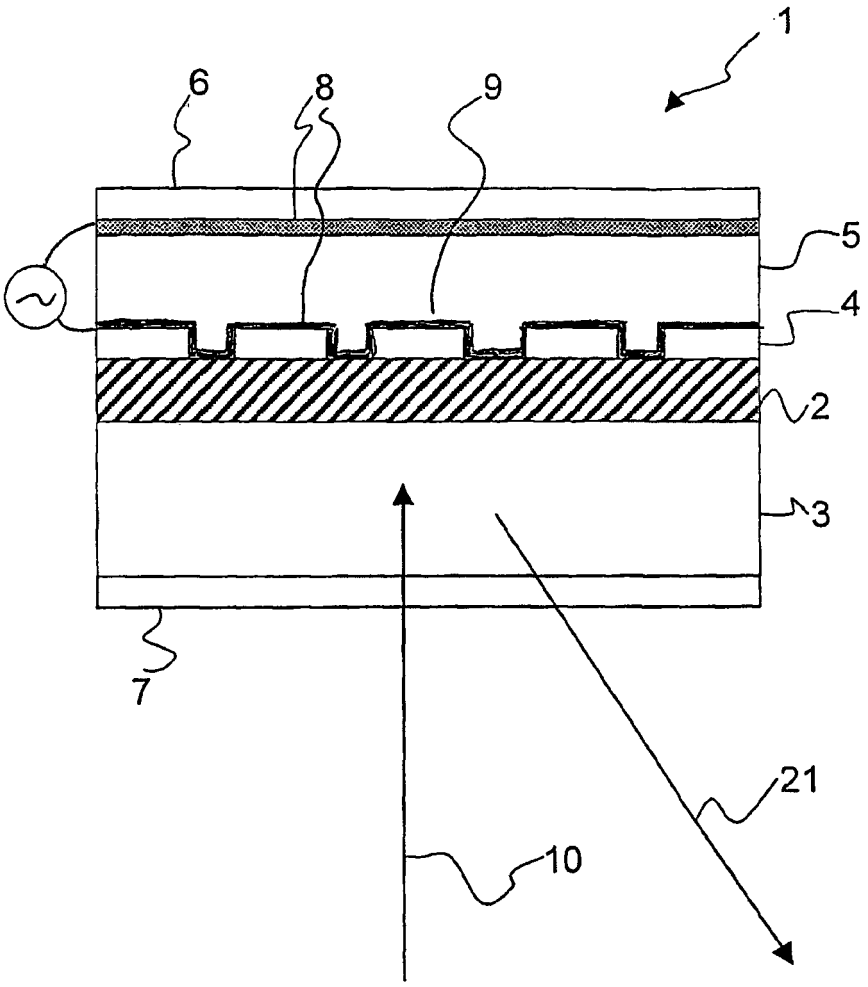

FIG. 1

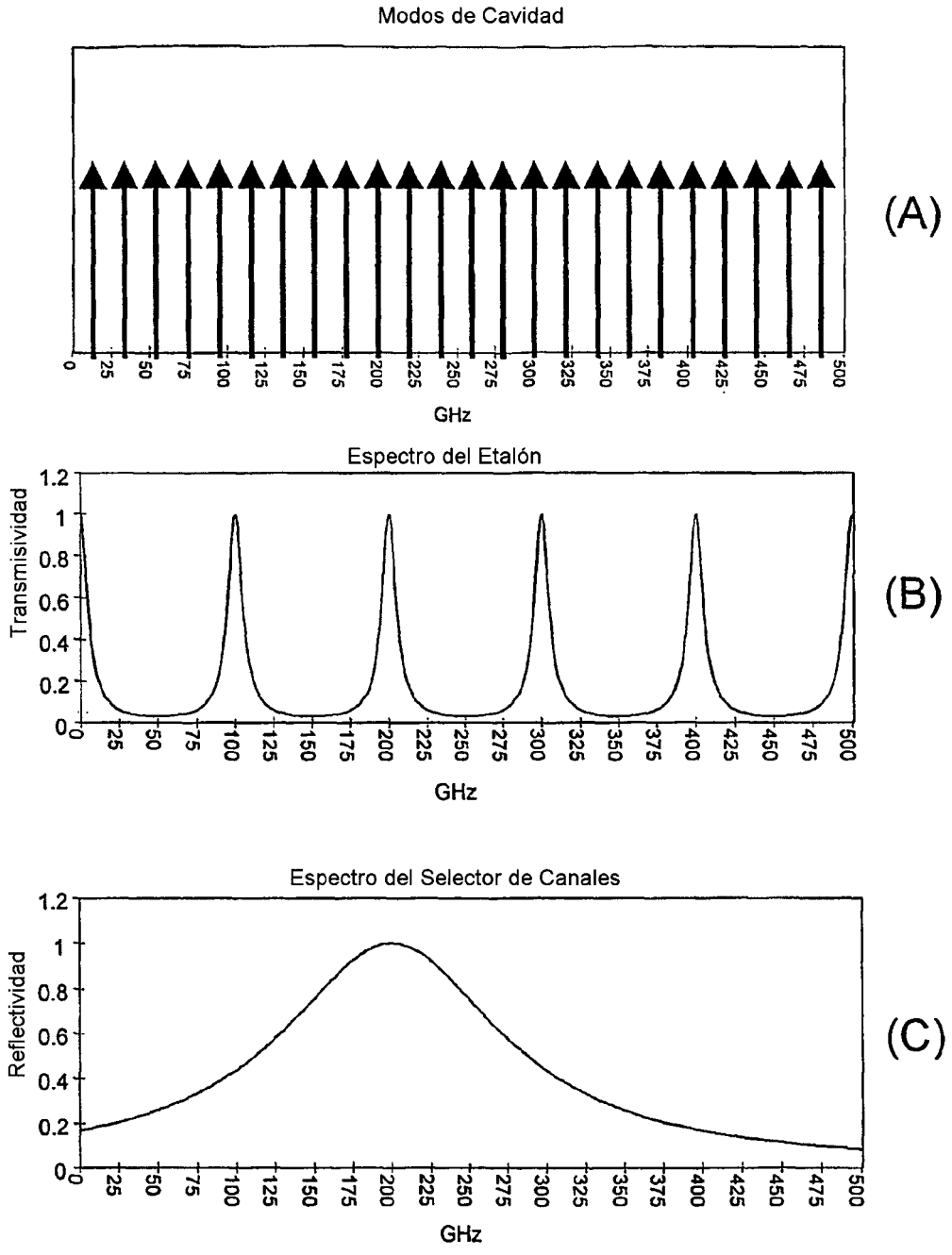
Modos de Cavidad
0
25
50
75
100
125
150
175
200
225
250
275
300
325
350
375
400
425
450
475
500
GHz
(A)
Espectro del Etalón
Transmisividad
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
GHz
(B)
Espectro del Selector de Canales
Reflectividad
GHz
(C)

FIG. 2

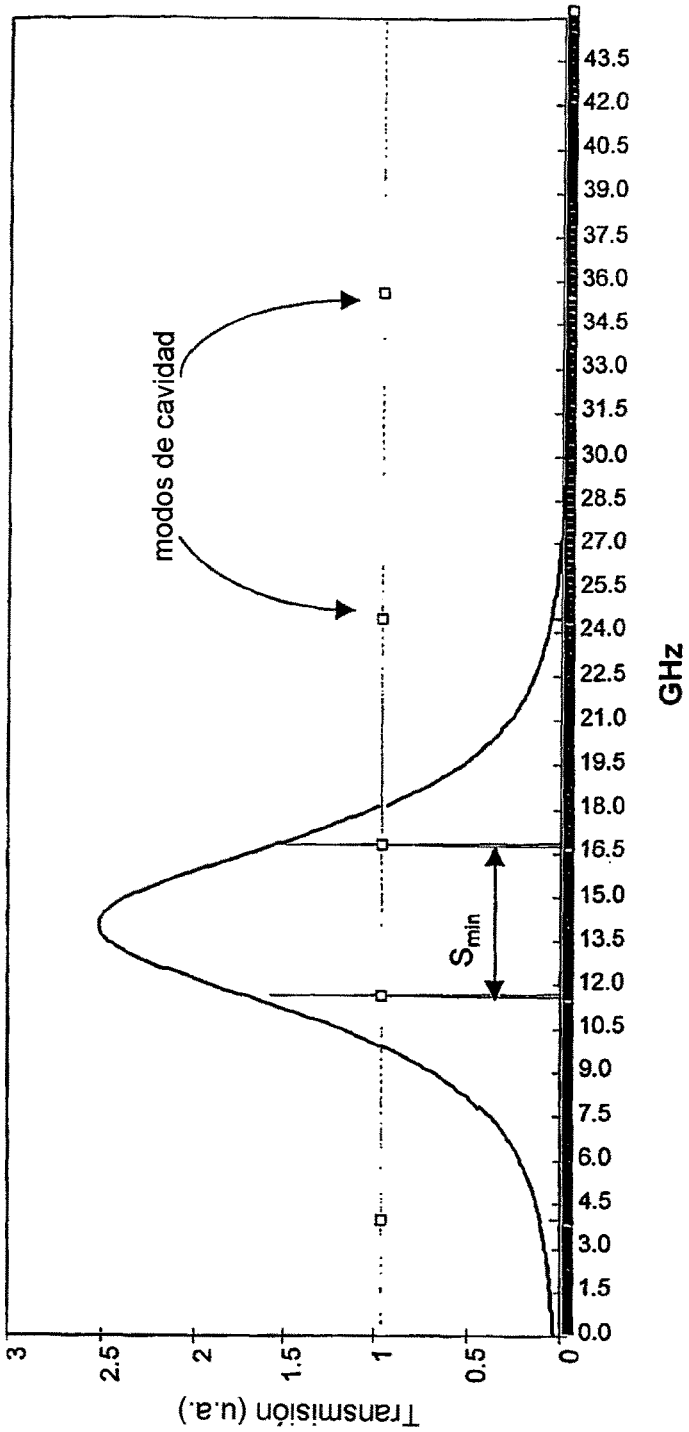
Transmisión (u.a.)
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
GHz
43.5
42.0
40.5
39.0
37.5
36.0
34.5
33.0
31.5
30.0
28.5
27.0
25.5
24.0
22.5
21.0
19.5
18.0
16.5
15.0
13.5
12.0
10.5
9.0
7.5
6.0
4.5
3.0
1.5
0.0
modos de cavidad
S_{min}

FIG. 3(a)

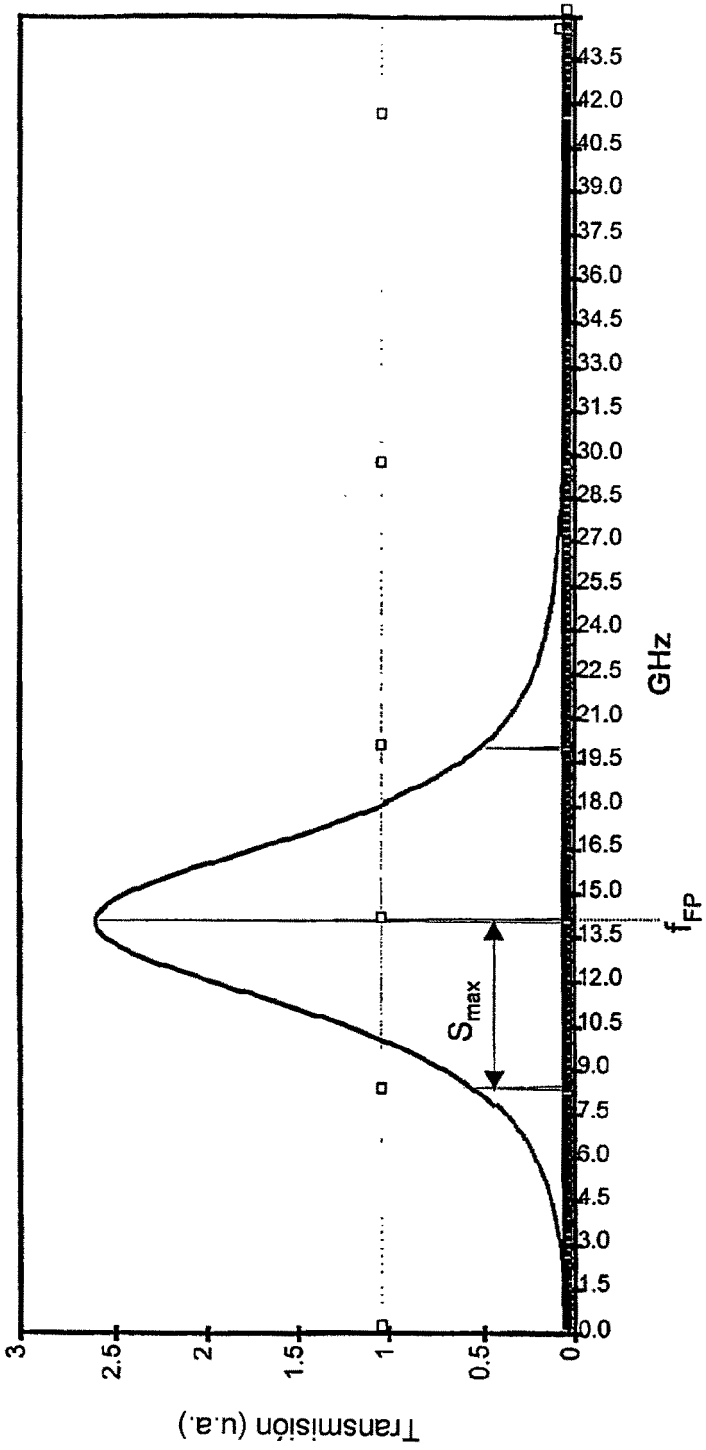
Transmisión (u.a.)
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
43.5
42.0
40.5
39.0
37.5
36.0
34.5
33.0
31.5
30.0
28.5
27.0
25.5
24.0
22.5
21.0
19.5
18.0
16.5
15.0
13.5
12.0
10.5
9.0
7.5
6.0
4.5
3.0
1.5
0.0
GHz
f_{FP}
S_{max}

FIG. 3(b)

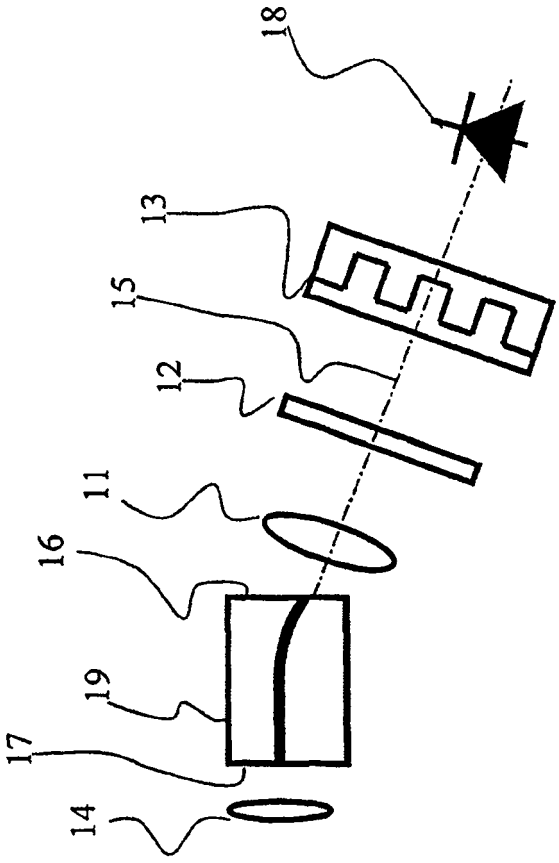

FIG. 4(a)

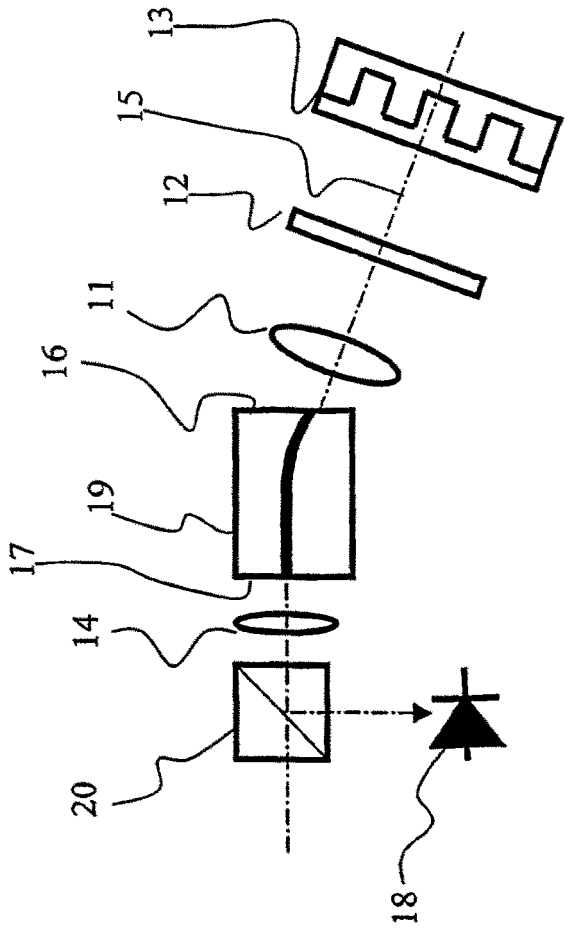

FIG. 4(b)

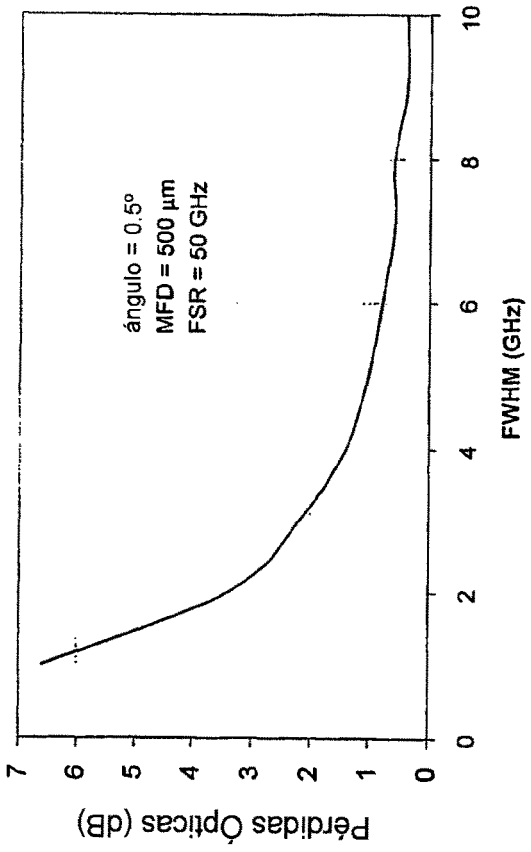
ángulo = 0.5º
MFD = 500 µm
FSR = 50 GHz
Pérdidas Ópticas (dB)
FWHM (GHz)
0
1
2
3
4
5
6
7
0
2
4
6
8
10

FIG. 5

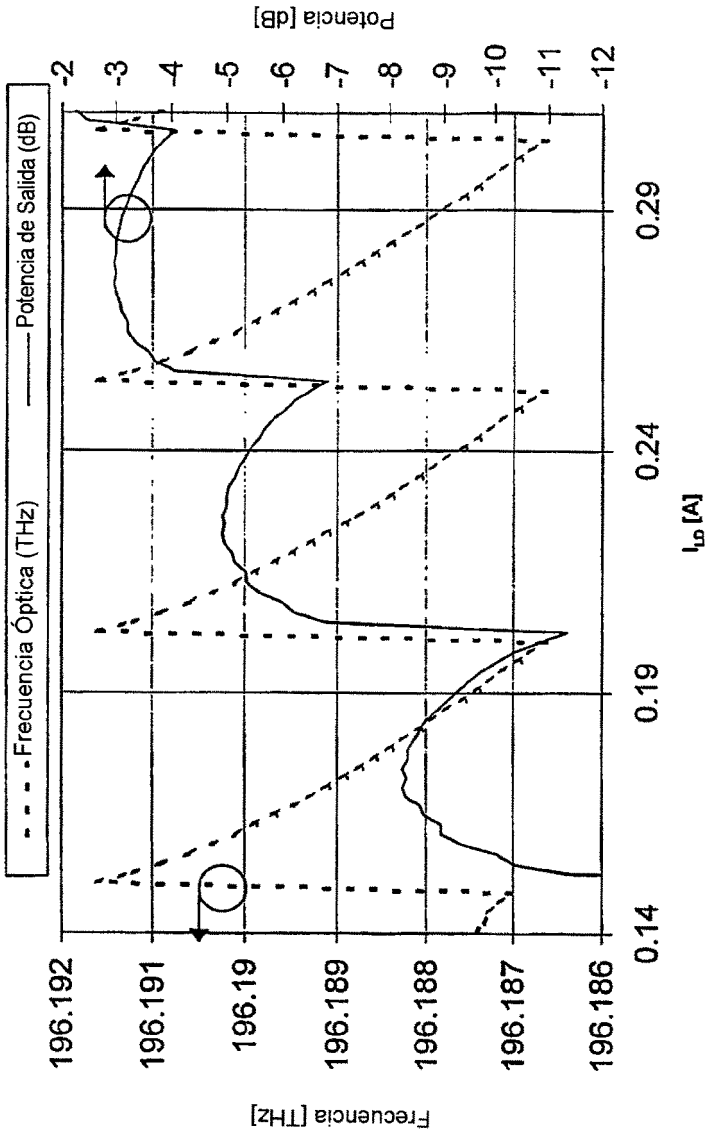
Potencia [dB]
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
Frecuencia Óptica (THz)
Potencia de Salida (dB)
196.192
196.191
196.19
196.189
196.188
196.187
196.186
Frecuencia [THz]
0.14
0.19
0.24
0.29
I_{LD} [A]

FIG. 6

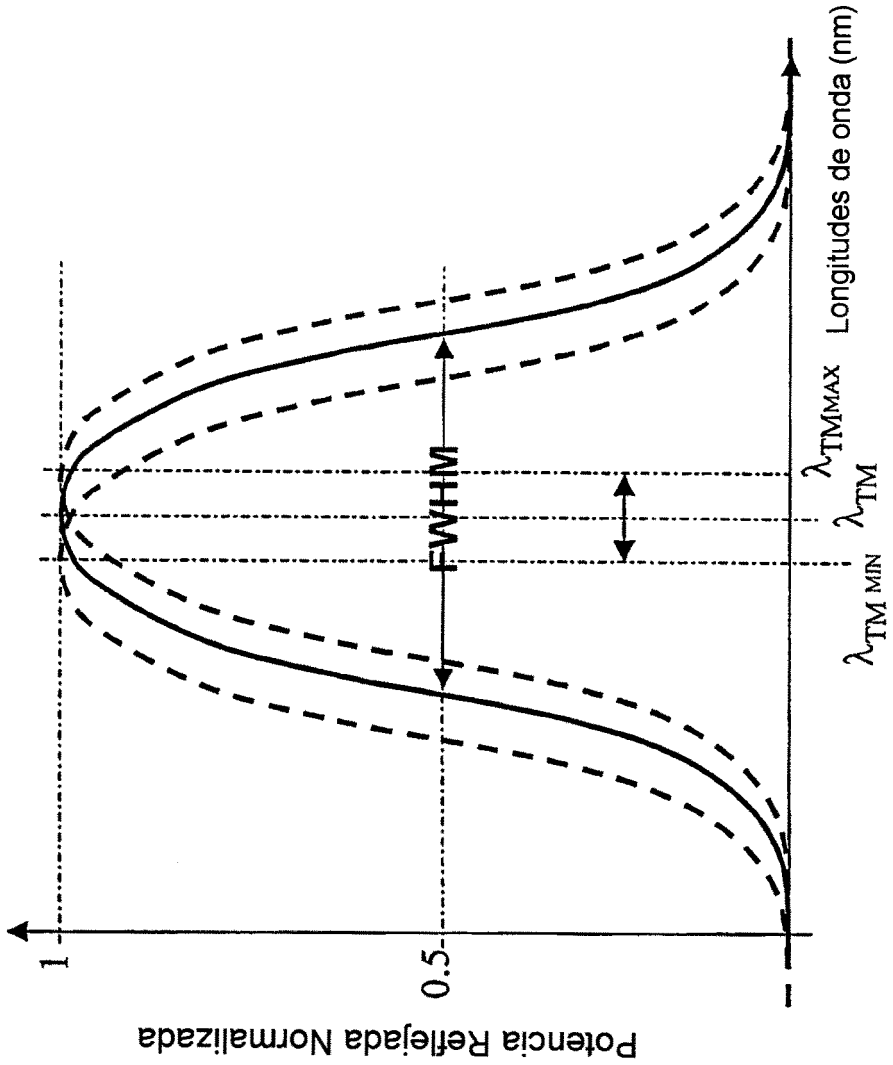
Potencia Reflejada Normalizada
1
0.5
FWHM
$\lambda_{TM\,MIN}$
λ_{TM}
$\lambda_{TM\,MAX}$
Longitudes de onda (nm)

FIG. 7

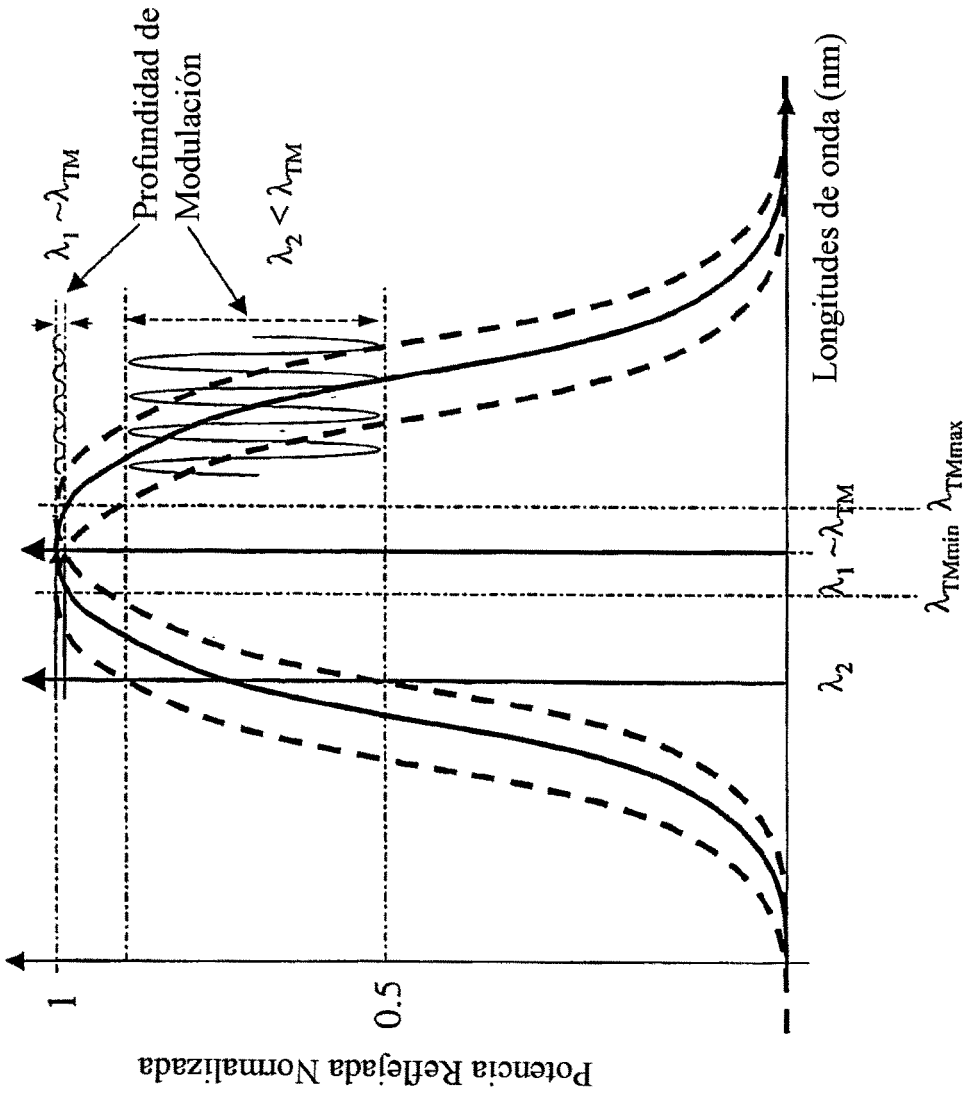
Potencia Reflejada Normalizada
1
0.5
Profundidad de Modulación
$\lambda_1 \sim \lambda_{TM}$
$\lambda_2 < \lambda_{TM}$
Longitudes de onda (nm)
λ_{TMmin} λ_{TMmax}
$\lambda_1 \sim \lambda_{TM}$
λ_2

FIG. 8

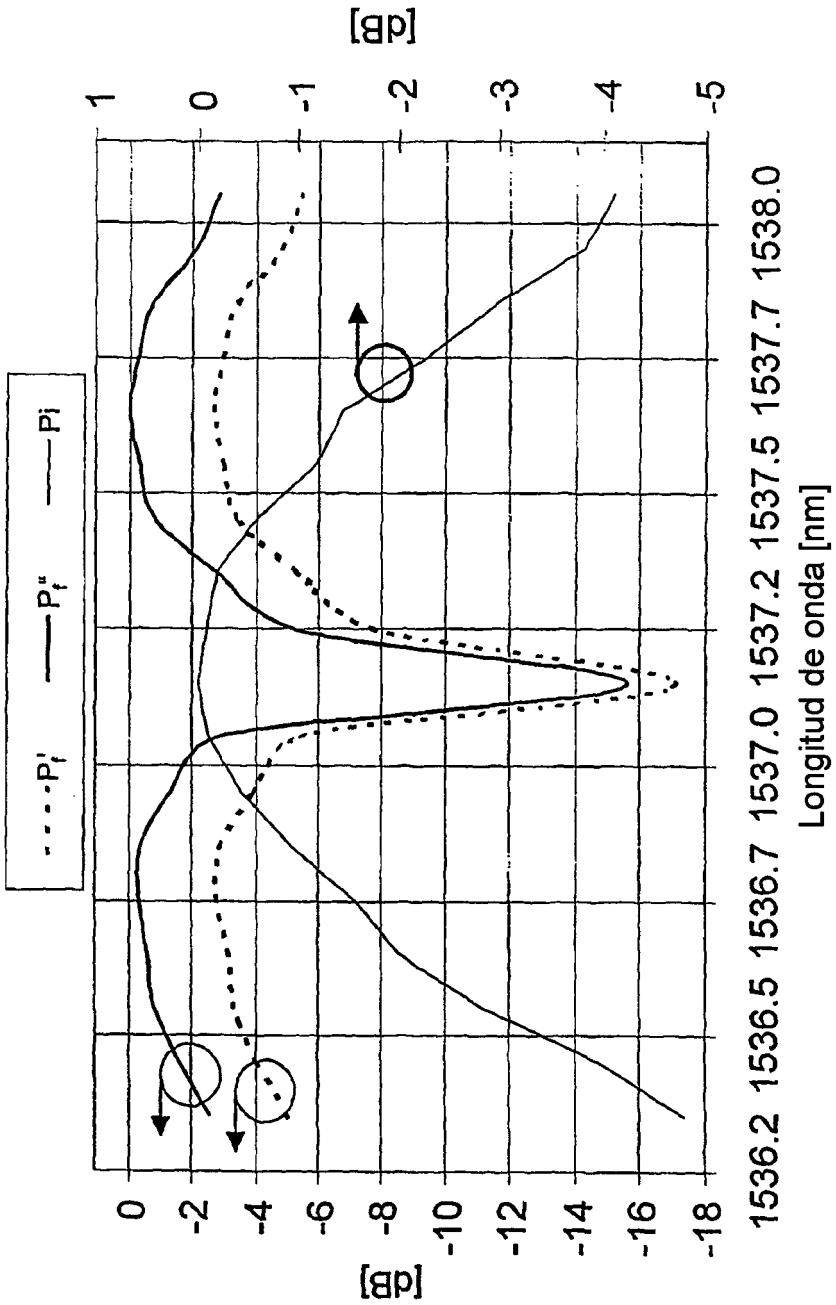
[dB]
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
P_f'
P_f''
Pi
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14
-16
-18
[dB]
1536.2 1536.5 1536.7 1537.0 1537.2 1537.5 1537.7 1538.0
Longitud de onda [nm]

FIG. 9

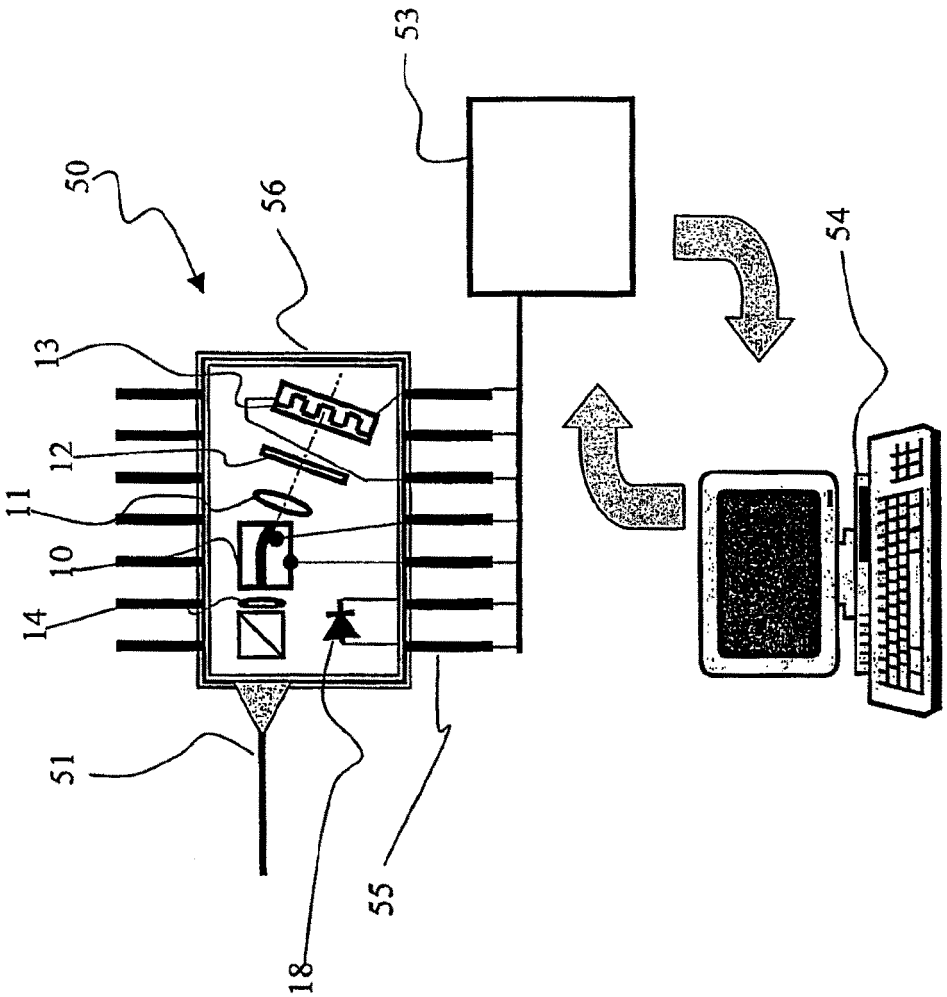

FIG. 10