(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 809 571**

(51) Int. CI.:

H01S 3/08	(2006.01)	***H01S 3/16***	(2006.01)
H01S 3/094	(2006.01)	***H01S 3/067***	(2006.01)
H01S 3/23	(2006.01)	***G02F 1/37***	(2006.01)
H04N 9/31	(2006.01)	***G02F 1/355***	(2006.01)
G02F 1/35	(2006.01)	***G02B 27/48***	(2006.01)
H04B 10/50	(2013.01)		
H04B 10/2537	(2013.01)		
H04J 14/02	(2006.01)		
H01S 3/00	(2006.01)		
H01S 3/30	(2006.01)		

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.09.2015 PCT/US2015/050381**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **24.03.2016 WO16044395**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.09.2015 E 15841237 (9)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.05.2020 EP 3195501**

(54) Título: **Generador de luz roja de banda ancha para pantalla RGB**

(30) Prioridad:

16.09.2014 US 201462050825 P
06.02.2015 US 201562112938 P

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
04.03.2021

(73) Titular/es:

IPG PHOTONICS CORPORATION (100.0%)
50 Old Webster Road
Oxford, Massachusetts 01540, US

(72) Inventor/es:

LEONARDO, MANUEL;
SAMARTSEV, IGOR;
AVDOKHIN, ALEXEY y
KEATON, GREGORY

(74) Agente/Representante:

CANELA GIMÉNEZ, María Teresa

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

Generador de luz roja de banda ancha para pantalla RGB

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Campo de la Invención

La presente descripción se refiere a un generador de luz roja de banda ancha basado en un esquema de conversión de longitud de onda que incluye una combinación del convertidor de fibra Raman y de la generación del segundo armónico, tales como el cristal óptico no lineal de triborato de litio (LBO) que opera para producir luz roja con un amplio ancho de línea espectral de al menos aproximadamente 5 nm (el cual es capaz de reducir el ruido moteado en la pantalla digital iluminada por láser).

Glosario

Tal como se usan en esta descripción, los términos enumerados a continuación tienen los siguientes respectivos significados:

La Línea Espectral Amplia o Banda Ancha se refiere a la línea espectral que se extiende sobre un rango de longitud de onda de 5-25 nm de Luz Roja y al menos 10 nm de radiación infrarroja en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseado.

El láser de onda continua ("CW - Continuous wave") se refiere a un láser que emite continuamente radiación en lugar de en ráfagas cortas, como en un láser pulsado.

El Ciclo de Trabajo se refiere al producto de la duración del pulso y la frecuencia de repetición de pulso (PRF – Pulse Repetition Frequency) para pulsos que ocurren a intervalos regulares.

El Diodo Láser se refiere a un diodo emisor de luz diseñado para usar emisión estimulada para generar una salida de luz coherente.

La Ganancia se refiere a un aumento en la intensidad, potencia o energía del pulso de una señal que se transmite de un punto a otro a través de un amplificador.

El Medio de Ganancia se refiere a un material capaz de generar ganancia óptica.

Luz verde se refiere a la radiación electromagnética en un rango de longitudes de onda de aproximadamente 495-570 nm.

Radiación Infrarroja ("RI") se refiere a la radiación electromagnética caracterizada por una longitud de onda de vacío de entre aproximadamente 700 nm y 10.000 nm.

Láser es un acrónimo para la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. Un láser es una cavidad que contiene un medio de ganancia.

La Luz Roja es generalmente radiación electromagnética en un rango de frecuencias que corresponde aproximadamente a un rango de longitudes de onda de vacío entre aproximadamente 610 y 650 nm.

El Modo Transversal describe la distribución de energía luminosa a través de la fibra.

La fibra multimodo se refiere a la fibra con un núcleo dimensionado para soportar la propagación de múltiples modos transversales.

Un cristal óptico no lineal se refiere a un cristal óptico no lineal de triborato de litio (LBO).

Un amplificador óptico se refiere a un aparato que usa un medio de ganancia, que es impulsado por bombeo de radiación, para amplificar la potencia de una señal óptica de entrada.

La Cavidad Ópticamente Resonante ("cavidad") se refiere a una trayectoria óptica definida por dos o más superficies reflectantes a lo largo de las cuales la luz puede ser correspondida o circular.

La fibra de Mantenimiento de Polarización (PM – Polarization Maintaining) se refiere a una fibra monomodo que está configurada para preservar y transmitir fielmente el estado de polarización de la luz que se dirige hacia ella.

La luz polarizada se refiere a la luz en la que las ondas de luz transversales individuales se alinean paralelas entre sí.

La Duración del Pulso o el ancho del pulso se refiere al intervalo de tiempo entre los puntos de media potencia en los bordes delantero y trasero del pulso.

El Período de Pulso (T) refiere al tiempo entre puntos equivalentes de pulsos sucesivos en un tren de dos o más pulsos.

La Frecuencia de Repetición de Pulso (PRF – Pulse Repetition Frequency) se refiere a la tasa de repetición de pulsos por unidad de tiempo. La PRF está inversamente relacionada con el período del pulso.

El cuasi-CW se refiere a generar una sucesión de pulsos a una velocidad de repetición lo suficientemente alta como para parecer continua.

La dispersión Raman se refiere al efecto Raman no lineal asociado al aumento en la longitud de onda (o reducción en la frecuencia) de la luz dispersada al pasar a través de una fibra.

La fibra monomodo se refiere a la fibra con el núcleo dimensionado para soportar la propagación de un único modo transversal.

Las órdenes de Stokes del espectro Raman (Stokes) se refieren a diferentes bandas de radiación o líneas Raman que aparecen en el espectro de luz monocromática además de las líneas estándar debido a la dispersión Raman.

La Generación del Segundo Armónico (SHG – Second Harmonic Generation) se refiere a la técnica de conversión de frecuencia en la que la luz de entrada a la longitud de onda λ genera luz de salida a la mitad de la longitud de onda λ/2 (o el doble de la frecuencia óptica de la luz de entrada) mientras se propaga a través de un material óptico no lineal, como un cristal no lineal.

La aceptación espectral del cristal se refiere a la banda espectral dentro de la cual se observa la conversión de frecuencia. El Desplazamiento de Stokes se refiere a la diferencia en la longitud de onda entre los máximos de excitación y emisión para una sustancia fluorescente particular.

Radiación o luz visible - porción del espectro electromagnético que es visible para el ojo humano como luz roja en un rango de longitud de onda entre 620 nm y 650 nm.

El moteado se refiere a la marca con una gran cantidad de pequeños puntos o manchas de color.

El ruido moteado se refiere al patrón de intensidad aleatorio observable de las motas.

El Estado de la Técnica

El rango de longitud de onda de 610-650 nm también conocido comúnmente como luz roja, (aunque estrictamente hablando, la luz alrededor de una longitud de onda de 620 nm no es verdaderamente roja, sino naranja rojiza, mientras que a una longitud de onda de 650 nm exhibe tonos rojos profundos), tiene una buena proporción de aplicaciones industriales. Por ejemplo, la luz roja se considera ideal para el cultivo de vegetales. Actualmente, las fuentes de luz roja encuentran su aplicación más amplia en las industrias de pantallas, por ejemplo, pantallas digitales rojo-verde-azul (RGB), que son de particular interés para esta divulgación.

Los diodos láser son las fuentes de luz láser más utilizadas para pantallas digitales RGB debido a la gama de colores disponibles bastante brillantes y bien definidos, su profundidad y saturación. Sin embargo, la eficiencia luminosa de los diodos de luz roja es baja. La potencia de salida de los diodos láser de luz roja individuales apenas supera 1 W, que es simplemente demasiado baja para satisfacer las necesidades de muchas aplicaciones láseres industriales.

El advenimiento de las fuentes de luz láser para pantallas RGB está asociado con láseres de estado sólido bombeados por diodos y técnicas mejoradas de conversión de frecuencia óptica no lineal enraizadas en ópticas no lineales, como se describe brevemente a continuación.

Ópticas No Lineales

Cuando la luz viaja a través de un medio transparente, como el vidrio, interactúa con las moléculas de una manera que cambia la luz que pasa. Cuando la luz es intensa, se observan efectos adicionales. Una de ellas es que la luz de una

longitud de onda (o, equivalentemente, frecuencia) puede convertirse en luz de una longitud de onda diferente debido a su interacción con ciertos tipos de materiales transparentes. Esto se llama conversión de frecuencia no lineal.

Conversión de Frecuencia Óptica No Lineal

En cualquier proceso de conversión de frecuencia, hay dos factores principales que contribuyen a su eficiencia, o a cuánta cantidad de luz en la frecuencia original/fundamental se convierte en la nueva frecuencia. Primero está la eficiencia inherente del medio transparente utilizado. La conversión de frecuencia se puede lograr con muchos tipos diferentes de materiales, pero algunos son simplemente más eficientes que otros. Un buen ejemplo de esto último es el cristal óptico no lineal de triborato de litio ("LBO") descrito aquí. Un ejemplo particular de la conversión de frecuencia óptica es la generación del segundo armónico (SHG) que constituye una parte del objeto inventivo descrito.

Volviendo a los láseres sólidos bombeados por diodos, se debe tener en cuenta que su uso ha dado como resultado una potencia eficiente y confiable de baja a moderada (como máximo unos pocos vatios en rojo y azul, y diez vatios en verde) en fuentes láser visibles con vida útil del diodo láser superior a 10,000 horas. Estas fuentes se basan en el SHG de varias líneas del ion de Neodimio (Nd) y, por lo tanto, son eficientes para la generación de luz verde basada en el SHG de las transiciones láser Nd más fuertes de alrededor de 1000 nm. Sin embargo, las mismas fuentes son mucho menos eficientes para la generación de luz roja basada en SHG de las transiciones de 1300 nm.

Siguiendo otras industrias, la industria de las pantallas se ha movido recientemente hacia láseres de fibra que pueden ser potentes, independientes de la temperatura, incomparablemente más brillantes y eficientes que los diodos láser. Sin embargo, los láseres de fibra solo ofrecen una sintonización de longitud de onda limitada alrededor de las longitudes de onda centrales de cerca de 1, 1.5 y 2 μm utilizando dopantes de iterbio (Yb), erbio (Er) y tulio (Tm), respectivamente, lo que obviamente hace que los láseres de fibra no sean adecuados para generar directamente luz visible incluyendo la roja.

Sin embargo, los láseres de fibra han permitido nuevas fuentes de luz utilizadas para generar longitudes de onda visibles mediante el uso de óptica no lineal y sus efectos. Las propiedades de potencia, calidad del haz, polarización y ancho de línea hacen que los láseres de fibra sean fuentes ideales para la conversión de frecuencia mediante cristales ópticos no lineales. Para la conversión de alta potencia al verde, el SHG de los láseres de fibra Yb que utilizan cristales no lineales LBO ha producido varias salidas de cientos de vatios e incluso kilovatios de potencia promedio de salida limitada por difracción verde. Esto último se describe en la solicitud de patente US 61923793 de propiedad común con la presente solicitud del mismo titular. No obstante, el SHG por sí solo es insuficiente para producir luz roja.

Una tecnología de desplazamiento de la longitud de onda Raman en fibras ópticas puede, en principio, producir amplificación óptica en cualquier longitud de onda. El cambio de longitud de onda Raman se basa, no sorprendentemente, en el efecto no lineal Raman que se revela en el documento US2011/0268140, copropietario con la presente descripción por el mismo titular. Lo que sigue es una breve explicación de este fenómeno.

El efecto Raman

Cuando la luz láser intensa se acopla a una fibra óptica, genera una segunda longitud de onda más larga debido a la dispersión estimulada de Raman. Esta luz dispersada por Raman puede sufrir la dispersión del Raman. Si la fibra es lo suficientemente larga, el proceso entra en cascada para producir varias longitudes de onda u órdenes de Stokes.

La generación de dispersión Raman de orden múltiple (SRS), donde el orden i-ésimo de Stokes de la longitud de onda inicial sirve como bomba para la generación del orden (i+1)-ésimo de Stokes, se utiliza como un convertidor Raman de longitud de onda en cascada (de longitudes de onda más cortas a más largas) para lograr un cambio significativo en la longitud de onda. En consecuencia, el convertidor Raman puede producir longitudes de onda de salida que podrían no estar disponibles en otros tipos de fuentes láser. Por ejemplo, los datos en la FIG. 1 se tomaron con fibra monomodo estándar de mantenimiento de polarización, disponible comercialmente. Las primeras tres (3) ondas de Stokes generadas por un haz de bomba de 1060 nm acoplado a la fibra son, aproximadamente: 1. 1114 nm 2. 1170 nm 3. 1232 nm.

En el pasado, para convertir eficientemente las órdenes Stokes de Raman en longitudes de onda visibles usando cristales no lineales, era deseable que las ondas Stokes de Raman tuvieran una línea espectral estrecha. Los picos del espectro Raman, como se ve en la FIG. 1, sin embargo, tienen aproximadamente 10 nm de ancho en el primer Stokes y más en los Stokes posteriores. Se considera que una línea espectral tan amplia es inaceptablemente amplia para una conversión eficiente de la luz IR en el tercer orden de Stokes dentro de un rango de longitud de onda de 1220-1300 nm en cristales ópticos no lineales porque estos últimos tienen un rango de aceptación espectral estrecho dentro del rango de longitud de onda Raman desplazado identificado anteriormente. Se conocen varias técnicas para reducir el espectro Raman.

Sin embargo, el espectro estrecho Raman, particularmente en el rango de longitud de onda de 1220 - 1280 nm en combinación con el rango de aceptación espectral de muchos cristales no lineales es altamente ineficiente contra un ruido moteado como se explica a continuación.

Ruido Moteado

Durante la iluminación láser, se produce una fuerte interferencia, que se origina en la alta coherencia de la luz láser y la topografía de la superficie de la pantalla, que se manifiesta por una pluralidad de motas que degradan la imagen. Un patrón definido por múltiples motas es una fuente fundamental de ruido en los generadores ópticos, y la supresión del ruido moteado es de suma importancia en las industrias de pantallas de video.

Existen varias técnicas conocidas que permiten la reducción de motas. Una de las técnicas incluye fuentes láser mutuamente no coherentes que operan a diferentes longitudes de onda. Dado que los patrones de manchas para diferentes longitudes de onda no están correlacionados, esto logra cierta reducción de motas. Otra técnica se basa en la variación de la polarización. Esta técnica puede ser práctica para diseños limitados del generador óptico de iluminación y generalmente es ineficiente. Otra técnica abarca el uso de elementos difusores desplazables que crean patrones de moteado no correlacionados.

Otra técnica, que es muy pertinente para el tema descrito, se basa en fuentes láser con mayor ancho de línea. Dado que el moteado surge debido a la naturaleza altamente coherente de la radiación láser, es práctico utilizar fuentes con coherencia reducida, como los diodos láser verdes de emisión directa. Sin embargo, se sabe que estos diodos láser tienen un ancho de línea espectral estrecho que es insuficiente para reducir el moteado a niveles aceptables. Cabe señalar que los láseres verdes más enérgicamente brillantes y eficientes disponibles en la actualidad se duplican en frecuencia con un ancho de línea espectral que no excede 0.1 - 0.2 nm.

El documento US 8,786,940 describe un aparato que reduce el moteado láser mediante el uso de dispersión Raman estimulada en una fibra óptica para todos los colores primarios, incluido el rojo. El aparato descrito está configurado con una fuente de luz roja basada en un interruptor Q, con una frecuencia duplicada con fluoruro de litio de itrio dopado con neodimio o con láser de granate de itrio y aluminio dopado con neodimio, que emite luz verde pulsada alrededor de una longitud de onda de 532 nm. La luz verde pulsada se acopla en una fibra MM donde experimenta dispersión Raman que la convierte en colores amarillos, naranjas y rojos que son a continuación filtrados ópticamente. Sin embargo, los experimentos que incorporaron el aparato descrito no fueron particularmente alentadores, principalmente porque la fibra MM se degrada rápidamente a niveles de potencia relativamente bajos.

La dispersión Raman también se describe en el documento WO 2013/175387, el cual enseña una fuente de fibra de luz amarilla. La fuente está configurada con una fuente de láser de fibra pulsada de ancho de línea espectral estrecho Yb que emite luz de bomba en una primera longitud de onda que está acoplada a un amplificador de fibra Yb. El otro láser de semilla CW de línea estrecha emite una luz de señal a una longitud de onda objetivo que también está acoplada al amplificador de fibra Yb. La luz de la bomba acoplada al amplificador Yb se convierte en una luz de señal en una sola longitud de onda objetivo con desplazamiento Raman o de primer orden Stokes. La luz amplificada en la longitud de onda objetivo con desplazamiento Raman incide en un cristal no lineal que produce luz amarilla.

La fuente mencionada anteriormente tiene algunas limitaciones. Por ejemplo, la fuente enseñada está diseñada para tener la salida con un ancho de línea estrecho que se realiza proporcionando bombas de línea estrechas y fuentes de semillas Raman, respectivamente. Esto solo haría que la fuente de luz amarilla de esta referencia sea ineficiente para reducir el ruido moteado, si esta fuente se usara para iluminar una pantalla.

Por lo tanto, existe la necesidad de una fuente de láser de fibra de luz roja que utilice SRS para tener una estructura eficiente, compacta, confiable y rentable.

Existe la necesidad adicional de una fuente de láser de fibra de luz roja capaz de emitir luz roja con una línea espectral suficientemente amplia para reducir considerablemente los efectos perjudiciales del ruido moteado que aparece, por ejemplo, en una pantalla digital iluminada con láser.

El documento US 2001/017868 A1 describe una fuente de radiación láser RGB que incluye un generador de luz roja con un convertidor Raman de longitud de onda y un cristal no lineal SHG. El documento WO 2007/127356 A2 describe un sistema láser que comprende una fuente MOPFA de luz pulsada que genera una luz pulsada que tiene un espectro óptico centrado en una fuente de longitud de onda; una fibra de conversión Raman no lineal acoplada a la fuente de luz pulsada, en la que la luz pulsada atraviesa la fibra de conversión Raman no lineal en una sola pasada y se convierte mediante un proceso en cascada de Dispersión Raman Estimulada en una primera salida de luz pulsada correspondiente a una última orden Stokes y que tiene un espectro óptico centrado en una primera longitud de onda de salida que es más larga que la fuente de longitud de onda; y un generador de armónicos acoplado operativamente a la fibra de conversión Raman no lineal para aceptar el primer orden de salida de luz pulsada y convertirlo en una frecuencia óptica más larga de modo que el generador de armónicos produzca una salida de luz en la longitud de onda de salida final situada en el rango de 150-775 nm.

RESUMEN DE LA INVENCION

El objetivo básico de esta invención es producir un rayo láser de color rojo que tenga una línea espectral amplia suficiente para minimizar el ruido moteado en la pantalla digital iluminada. Esto se logra mediante el generador de luz roja de fibra descrito basado en dos premisas principales: 1. Convertidor Raman que emite luz a la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada en un rango de longitud de onda de emisión de 1220 - 1300 nm con una línea espectral amplia de hasta 25 nm en una fibra Raman, y 2. La aceptación espectral de la línea espectral amplia en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada dentro del espectro de emisión identificado anteriormente por un cristal no lineal LBO para producir luz roja dentro de un rango de longitud de onda 610 - 650 con un ancho de línea espectral superior a 4 nm. La implementación práctica de la fuente descrita operativa para emitir luz roja de banda ancha limitada por difracción de alta potencia se realiza en varias realizaciones descritas brevemente a continuación.

De acuerdo con una de las realizaciones, el diseño básico del generador descrito incluye una fuente láser de fibra pulsada de banda ancha, que genera un haz de bomba en un rango de longitud de onda de 1030 - 1120 nm, y un amplificador de fibra Yb. El haz pulsado se acopla adicionalmente a un desplazador Raman que convierte el haz de la bomba en un haz pulsado a la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada. La longitud de onda de desplazamiento de Raman deseada varía entre aproximadamente 1220 y 1300 nm y tiene una línea espectral de emisión amplia de al menos 10 nm. Luego, el haz de señal se enfoca en un LBO que funciona como un generador del segundo armónico (SHG) de una sola pasada que tiene una aceptación espectral que cubre la línea espectral de emisión de la luz de la bomba en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada. La luz roja producida en el LBO también tiene una línea espectral amplia de al menos 4-5 nm que es suficiente para minimizar significativamente el ruido moteado en la pantalla iluminada.

El funcionamiento del convertidor Raman de paso único descrito depende de la configuración de la fibra. De acuerdo con una configuración, la fibra tiene un núcleo de fosfato de vidrio en un revestimiento de vidrio de sílice. Esta configuración permite una conversión Stokes del haz de la bomba en la primera longitud de onda a luz a la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada. En la configuración alternativa, el convertidor Raman tiene un núcleo de vidrio de sílice (con posibles dopantes de fosfato) en un revestimiento de sílice. Aquí la conversión a la frecuencia de desplazamiento Raman deseada del haz de señal se produce en el tercer (3) orden Stokes de la luz de la bomba.

Una realización adicional del generador de luz roja descrito incluye un láser Raman de longitud de onda múltiple como se describe en el documento US2011/0268140. Esta realización puede hacerse mediante las siguientes estructuras.

Una de las configuraciones posibles de acuerdo con esta realización incluye una fuente de láser pulsado con una arquitectura MOPFA operativa para emitir un haz de luz de bomba de línea espectral amplia en la longitud de onda de bomba deseada que se selecciona dentro de un rango de longitud de onda 1030 - 1120 nm que se acopla en un láser Raman. Este último incluye un núcleo de sílice/fibra de revestimiento con una cavidad resonante que tiene múltiples reflectores con los máximos reflectores arriba y abajo que definen una cavidad resonante. El reflector de salida es al menos parcialmente transmisivo a la luz de señal de salida a la frecuencia de desplazamiento Raman deseada del haz de la bomba desde la cavidad resonante que luego se acopla al LBO en una longitud de onda en un rango de longitud de onda de 1220 - 1300 nm. El generador SH, que incluye un cristal no lineal LBO, recibe el haz de la bomba en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada y produce luz roja con un ancho de línea espectral suficientemente amplio para minimizar el ruido moteado en la pantalla iluminada.

El haz de la bomba se emite en pulsos cortos, cada uno con un ancho de pulso en un rango de picosegundos - nanosegundos. El funcionamiento de esta configuración se basa en un esquema láser Raman de bomba síncrona. Específicamente, este esquema funciona de modo que el tiempo de ida y vuelta del pulso de luz de conversión Raman resonante coincida con la tasa de repetición del haz de la bomba de modo que cada pulso de luz de señal posterior en la longitud de onda de desplazamiento Raman coincida tanto temporal como espacialmente con un respectivo pulso de luz de bomba en el convertidor Raman.

Otra configuración estructural utiliza un láser pulsado Fabry-Perot que emite pulsos de luz de bomba largos, cada uno con un ancho de un microsegundo y un rango más largo. Luego, los pulsos de luz de la bomba se acoplan al láser Raman, que está configurado para emitir pulsos de señal a la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada en una longitud de onda de 1220 - 1300 nm y que tiene una línea espectral amplia. El LBO, que recibe la luz cambiada por el Raman, produce luz roja pulsada. A diferencia del esquema de bombeo síncrono descrito anteriormente, esta configuración no necesita sincronicidad ya que el ancho del pulso de luz de la bomba es sustancialmente más largo que la ida y vuelta del pulso de luz en la cavidad resonante del láser Raman.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Estas y otras características de la presente descripción se harán más evidentes a partir de la siguiente descripción detallada junto con los dibujos, en los que:

FIG. 1 es un Espectro Raman de una luz de bomba con desplazamiento Raman.

FIG. 2 ilustra un diseño básico del generador descrito de luz roja de línea ancha descrito;

FIG. 3 ilustra el tercer Stokes de un espectro Raman obtenido mediante la configuración de la FIG. 2.

FIG. 4 ilustra la modificación del generador de luz roja de la FIG. 2.

FIG. 5 ilustra la configuración de una etapa de amplificación de refuerzo utilizada en los esquemas mostrados en las FIGs. 2 y 4.

FIG. 6 ilustra los espectros Raman producidos por la fuente de bomba IR del esquema de la FIG. 4.

FIG. 7 ilustra el generador de luz roja configurado con un láser de fibra Raman y una fuente de bomba QCW IR directamente modulada.

FIG. 8 ilustra el generador de luz roja con un láser de fibra Raman y una fuente de bomba QCW IR con una configuración MOPFA.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

A modo de introducción, las realizaciones de la invención están dirigidas a un nuevo generador de luz roja de línea espectral amplia y a un método para emitir pulsos láser de alta potencia, ancho de línea amplio, modo único (SM – Single Mode) en el rango de 610-650 nanómetros (nm) . Una fuente de láser de fibra SM IR de pulso de línea amplia está configurada para emitir un tren de pulsos que bombea un convertidor de fibra SM Raman que conduce a la conversión Raman eficiente de energía IR que genera luz IR de desplazamiento Raman en un rango de longitud de onda entre 1220 y 1300 nm. La longitud de onda deseada seleccionada del rango de longitud de onda de desplazamiento Raman tiene un ancho de línea espectral amplio que varía entre 10 y 25 nm, siendo el límite superior típicamente aún mayor. La luz IR en la longitud de onda de desplazamiento Raman está acoplada a un generador del segundo armónico de un solo paso que incluye un cristal no lineal LBO estándar que produce luz pulsada de luz roja SM en un rango de longitud de onda de 610-650 nm con una línea espectral de aproximadamente 5 nm y más amplia.

El generador de luz roja descrito es una estructura única que utiliza un cristal LBO estándar, cuya aceptación espectral es amplia para aceptar un segmento sustancial del ancho de línea de 10-25 nm de luz IR en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada dentro de un rango de 1210-1250 nm, y capaz de operar con la eficiencia general del enchufe de pared del dispositivo de aproximadamente 10% dentro del rango de longitud de onda de luz roja divulgada. El haz de luz roja SM con una potencia de pico de nivel de kW y un ancho de línea espectral amplio es particularmente útil para iluminar una pantalla digital y minimizar efectivamente el ruido moteado.

En referencia a los dibujos, la FIG. 2 ilustra el diseño básico del generador de luz roja 10 descrito basado en un esquema de generación de armónicos que incluye un convertidor Raman 14 en combinación con un cristal no lineal LBO estándar 16. La fuente de bomba IR 12 define la característica temporal de la ganancia Raman al emitir luz IR pulsada a una longitud de onda de la bomba seleccionada de un rango de longitud de onda de 1030-1120 nm y, en esta realización, tiene una configuración MOPFA. En particular, la fuente IR 12 incluye un oscilador maestro/semilla de bomba sintonizable 18 configurado como una línea espectral amplia de diodo láser SM 18 con un rabillo de fibra de mantenimiento de polarización (PM – Polarization Maintaining) que está operativo para emitir un tren de pulsos en rango de un picosegundo-nanosegundo (ps-ns) de ancho de pulso. La luz de la bomba pulsada se acopla luego a un amplificador láser de fibra Yb o amplificador 22 que está configurado para aumentar la luz de la bomba pulsada hasta un nivel de potencia máxima de varios kW en la longitud de onda deseada de la bomba IR. Opcionalmente, la fuente de láser de la bomba IR puede incluir una o más etapas 20 de preamplificación cada una configurada con una fibra PM dopada con Yb y amplificada gradualmente la señal de semilla de la bomba antes de que se acople al amplificador de potencia o al amplificador 22. Cada una de las etapas de amplificación incluye un bloque de ganancia configurado con una carcasa que encierra una fibra activa dopada con Yb empalmada en sus extremos opuestos a las respectivas fibras pasivas SM PM que pueden terminar fuera de la carcasa. Las bombas de los amplificadores 20 y 22 incluyen uno o más módulos de diodos láser respectivos que funcionan en un régimen de CW.

El generador de luz roja de ancho de línea amplio 10 está configurado con una fuente de bomba IR 12 que funciona en un régimen QCW que se proporciona al acoplar la salida de la fuente de semilla de la bomba 18 a un modulador de intensidad electroóptico separado para ajustar el pulso o directamente modular el diodo láser para establecer un ancho de pulso. La luz de la bomba pulsada se emite a una velocidad de repetición en un rango de frecuencia de 1 a 100 MHz, longitud de onda seleccionada de un rango de 1030 - 1120 nm y con un pulso en un rango de ps-ns. El preamplificador 20 está configurado para emitir luz pulsada a una potencia promedio de aproximadamente 1 W antes de que el amplificador de potencia aumente la potencia promedio de la luz pulsada de la bomba a aproximadamente 200 W y más. El convertidor Raman puede incluir una fibra pasiva no lineal de varios metros de largo que tiene un diámetro de núcleo

de varios micrones. En los esquemas de la FIG. 2, aproximadamente el 50-80% de la potencia de salida de la bomba IR se puede convertir a la tercera o cuarta orden Stokes a una longitud de onda de aproximadamente 1230 nm dependiendo de la longitud de onda de la bomba de la semilla 18. La luz pulsada SM en la longitud de onda de desplazamiento Raman 1230 después de ser la frecuencia duplicada en LBO 16 de 20 mm de longitud produce el espectro visible que se muestra en la FIG. 3 con una longitud de onda central de alrededor de 615 nm y un ancho de banda espectral de más de 5 nm que es suficiente para minimizar sustancialmente el ruido moteado.

Una de las claves para la escala de potencia del generador de luz roja 10 radica en el mayor tamaño del núcleo de todas las fibras de área de modo grande activas y pasivas. Por ejemplo, el tamaño del núcleo puede ser de 20 micras, lo que permitiría producir un espectro Raman limpio con una potencia pico IR de 15-20 kW o más. El aumento de la potencia máxima de IR, como se da cuenta fácilmente una persona de habilidad ordinaria, aumenta significativamente la eficiencia de conversión. Para las fibras de área de modo grande sugeridas, la eficiencia de conversión de 1060 nm a 615 nm puede acercarse al 25%.

Aún queda otro enfoque para el escalado de potencia del generador de luz roja 10 el cual incluye aumentar la potencia media controlando el ciclo de trabajo de la fuente de luz de la bomba IR. En particular, la tasa de repetición de la semilla 18 de la bomba puede incrementar y aumentar la potencia de la bomba, manteniendo constante la potencia máxima.

La FIG. 4 ilustra una modificación del generador de luz roja de línea ancha que se muestra en la FIG. 2. Similar al diseño básico, el generador de luz roja 10 está configurado con el oscilador maestro 18 cuya salida está modulada para generar un tren de pulsos en un rango de longitud de onda de 1030-1120 nm. Una o más cascadas de preamplificación y refuerzo están configuradas cada una con una fibra dopada con Yb bombeada por una bomba de diodo láser que funciona en un régimen de CW. Los amplificadores 20 y 22 aumentan secuencialmente la potencia de la luz de la bomba pulsada, que se acopla adicionalmente al convertidor Raman 14, donde se convierte efectivamente en órdenes secuenciales Stokes, siendo la tercera orden Stokes el rango de longitud de onda de 1220-1300 nm deseado y un ancho de línea espectral amplio. El generador SH de paso único que incluye un cristal LBO 16 está configurado con una amplia aceptación espectral en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada proporcionada por un desplazador Raman 14 que cubre al menos una parte sustancial del ancho de línea espectral de la luz IR dentro del rango de onda deseado de desplazamiento Raman.

El ancho de línea de la luz IR en el rango deseado de longitud de onda de desplazamiento Raman de 1220 - 1300 nm aún puede ser excesivamente amplio y afectar negativamente la eficiencia de conversión a pesar del rango de aceptación espectral de banda ancha del LBO 16. En este caso, la tercera orden Stokes puede reducirse bombeando el convertidor Raman con luz de una semilla Raman SM 28 de banda ancha que opera en un régimen de CW a una longitud de onda que se selecciona de una banda de longitudes de onda de la segunda orden Stokes. Al hacerlo, la segunda Stokes se amplifica por dispersión Raman estimulada que disminuye el ancho de línea de este Stokes. Como resultado, el ancho de línea de las 3 Stokes se reduce. En este esquema, las características temporales están determinadas por la semilla 18 de la bomba, mientras que las propiedades espectrales de la luz en la longitud de onda de desplazamiento Raman están determinadas por la semilla Raman CW 28. En consecuencia, la longitud de onda y el ancho de línea de la salida SM de la semilla Raman pueden ser adaptado a un ancho de línea específico dentro del rango deseado de longitud de onda de 1220 - 1300 nm.

La FIG. 5 ilustra que el refuerzo 22 incluye una carcasa (no mostrada) que encierra la entrada y la salida de fibras pasivas SM PM 32 y 34 con dimensiones idénticas que se empalman a los extremos opuestos respectivos de la fibra de sílice dopada con PM Yb 30. Esta última tiene un núcleo MM 38 capaz de soportar un SM en la longitud de onda de la bomba e incluye extremos opuestos de núcleos de dimensiones uniformes que están configurados de modo que un MFD de un modo fundamental (FM – Fundamental Mode) coincida con un MFD de luz de bomba SM guiado por las fibras SM respectivas 32 y 34. Los diámetros de MFD correspondientes de los respectivos SM y FM y las regiones de transformación de modo que se expanden y reducen adiabáticamente 42, 44 respectivamente del núcleo MM 38 proporcionan la excitación y el soporte de un solo FM.

La semilla Raman 28 CW SM puede configurarse como un láser de fibra o diodo Fabry-Perot de banda ancha, reflector de Bragg distribuido (DBR – Distributed Bragg Reflector) o láser de retroalimentación distribuida (DFB - Distributed Feedback Laser) o convertidor Raman de siembra de láser estabilizado de longitud de onda 14 en Stokes intermedio. En particular, la semilla Raman 28 emite luz a una longitud de onda de desplazamiento Raman que se selecciona en un rango de longitudes de onda de 1130 - 1175 nm del orden 2 de Stokes del convertidor Raman 14. Las salidas de las fuentes de semillas Raman y bomba respectivas se combinan en una fibra WDM 26 ubicada preferiblemente, pero no necesariamente, en el flujo superior del amplificador 22 que intensifica solo la luz de la semilla de la bomba a una longitud de onda de 1064 nm a una potencia promedio de aproximadamente 20-30 W y una potencia máxima de 5-10 kW. El espectro Raman se ilustra en la FIG. 6 con el ancho de línea del 3 Stokes de aproximadamente 25 nm.

La palanca de cambios de fibra Raman 14 está configurada con longitudes superiores a 5 metros. Por ejemplo, puede ser una fibra pasiva SM PM de 30 a 100 metros de largo que funciona con una alta eficiencia de conversión Raman del 50-80% que, en este ejemplo, se traduce en una luz de desplazamiento Raman de hasta 6 kW de potencia máxima a la longitud de onda deseada de 1230 nm. El LBO 16 está dimensionado para ser de 40 mm de largo, 5 mm de ancho y 3

mm de espesor de cristal tipo I que opera con una eficiencia de SHG de aproximadamente 35-50%. La potencia promedio de la luz roja SM a una longitud de onda de aproximadamente 615 nm está dentro de un rango de 45-110 W, mientras que su potencia máxima varía entre 1.1 y 2.8 kW.

Las dos configuraciones descritas anteriormente del generador de luz roja de banda ancha, basadas en un convertidor Raman y un esquema de conversión de longitud de onda SHG de un solo paso, utilizan una fibra no lineal pasiva de núcleo de sílice SM PM para el convertidor Raman descrito. Sin embargo, las fibras a base de sílice no son la única opción para producir la luz IR en un rango de 1220 - 1300 nm. Una alternativa viable a las fibras de sílice incluye el uso de fibras con un núcleo de vidrio de fosfato que produce una orden Stokes sustancialmente más amplia que una fibra estándar de núcleo de sílice. De hecho, es mucho más amplia que la banda de longitud de onda de desplazamiento Raman 1220-1300 deseada que está cubierta por la 1ª Stokes.

Una realización adicional que ilustra un láser de fibra Raman en cascada se ilustra en las FIGs. 7 y 8. El principio de esta realización es convertir la frecuencia de salida de la bomba a la longitud de onda de salida de luz roja requerida utilizando una serie de cambios de Raman-Stokes. Convencionalmente, la conversión de longitud de onda en dos o más cambios Stokes se realiza mediante un resonador Raman en cascada. Se compone de cavidades anidadas en cada una de las longitudes de onda intermedias hechas con rejillas Bragg de fibra de alta reflectividad o reflectores 52. Cada longitud de onda intermedia en el resonador se elige para estar cerca del pico de ganancia Raman de la longitud de onda que la precede. Un reflector o acoplador de salida de baja reflectividad 54 termina la conversión de longitud de onda que se selecciona entre 1220 - 1300 nm de rango de longitudes de onda.

Específicamente en referencia a la FIG. 7, el generador de luz roja descrito incluye una fuente de bomba QCW IR de banda ancha con semilla semiconductora láser directamente modulada 58 que se realiza mediante un generador de pulso eléctrico externo. La luz de la longitud de onda deseada de la bomba se acopla a una cavidad de láser de fibra Yb pulsada 56 que se define entre un reflector alto (HR – High Reflector) y un reflector bajo (LR – Low Reflector). A diferencia de toda la fibra utilizada en las configuraciones descritas anteriormente, el láser de fibra dopado con Yb puede o no ser una fibra PM. La fuente de IR está operativa para emitir pulsos de microsegundos largos a la longitud de onda deseada de la bomba.

La luz de la bomba se acopla adicionalmente en un láser de multi cascada SM LP Raman 50 provisto de múltiples HRs y LR hacia abajo que proporcionan una generación de tres Stokes con el 3 Stokes en el rango deseado de longitud de onda de desplazamiento Raman que se acopla desde la cavidad con o sin LR 54. La luz de la bomba con desplazamiento Raman emitida por el láser 50 de Raman se caracteriza por una amplia línea espectral aceptada espectralmente por LBO 16 que funciona para generar luz roja SM con un ancho de línea espectral amplio de al menos aproximadamente 5 nm en un rango de 1220-1300 nm de longitud de onda.

La FIG. 8 ilustra la fuente de la bomba IR configurada con una configuración MOPFA que tiene la semilla 18 y una o más etapas de amplificación 22. La etapa de refuerzo se basa en la misma configuración de fibra que se muestra en la FIG. 5. El resto de componentes corresponden a componentes respectivos del generador 10 de la FIG. 4 e incluye semillas Raman 28 de banda ancha y WDM 26. El láser Raman se bombea sincrónicamente. La luz de la bomba amplificada en las longitudes de onda deseadas de la bomba se combina en WDM 26 con la luz de la semilla Raman 26 generada en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada que se selecciona de un rango de longitud de onda de 1220 - 1300 nm. La luz de la bomba amplificada y la luz desplazada Raman se acoplan luego en el láser Raman 50. La luz en la longitud de onda de desplazamiento Raman se convierte en el SHG LBO a la luz roja de banda ancha deseada.

La plataforma básica del generador de luz de línea espectral amplia descrita anteriormente puede utilizarse fácilmente para generar luz Verde, Amarilla, Naranja "589 nm" y luz Roja larga. La plataforma, como se muestra en las FIGs. 2, 4, 5 y 7-8, incluye una fuente de láser IR QCW en un rango de 1030-1070 nm, generador de luz de banda ancha configurado con el convertidor Raman descrito y el esquema de conversión de longitud de onda SHG de paso único. La generación de un color específico depende de qué orden Stokes se convierta finalmente en el convertidor Raman. Claramente, la primera Stokes produce luz Verde. La segunda Stokes generada es necesaria para producir Amarillo y Naranja y una longitud de onda fundamental específica, por ejemplo, 1064 nm. La cuarta y hasta la quinta Stokes ayudan a extender la longitud de onda de la luz convertida a un largo rango de longitud de onda de luz Roja. Independientemente de los colores de salida, el ancho de línea de la luz de salida es de al menos 1 nm que puede utilizarse con éxito no solo en las industrias de pantallas con iluminación láser, sino también en muchas otras, incluyendo, por ejemplo, el marcado.

Habiendo descrito las realizaciones de la presente invención con referencia a los dibujos que se acompañan, debe entenderse que la invención no se limita a esas realizaciones concretas, y que un experto en la técnica puede efectuar diversos cambios, modificaciones y adaptaciones en las mismas sin apartarse del alcance de la invención como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un generador de luz roja de línea ancha (10) para una pantalla RGB, que comprende:

una sola fuente de bomba láser de fibra Yb de pulso de iterbio SM (Single Mode – Modo Único) de modo transversal (12) configurada para emitir luz de bomba pulsada en un modo fundamental FM (Fundamental Mode) en una longitud de onda de bomba que se selecciona de un rango de longitud de onda de 1030 - 1120 nm, la fuente de bomba de fibra láser de fibra Yb configurada con un esquema MOPFA de amplificador de fibra de potencia del oscilador maestro que incluye un amplio diodo láser de ancho de línea espectral (18) con una polarización que mantiene el cable flexible de fibra PM (Polarization-maintaining: Mantenimiento de Polarización) que emite la luz pulsada de la bomba en la longitud de onda de la bomba y un amplificador de fibra PM configurado para emitir la luz pulsada de la bomba con un pico potencia de varios kilovatios kW;
un convertidor Raman de fibra SM (14) que tiene una longitud de multímetro de largo y empalmado a una salida de la fuente de la bomba láser de fibra Yb y que tiene un núcleo con un diámetro de núcleo multimicrónico que guía la luz de la bomba pulsada, y un revestimiento que rodea el núcleo, en donde el convertidor Raman induce un cambio de frecuencia de orden Stokes "n" de la luz de la bomba pulsada para emitir la luz de la bomba a una longitud de onda de desplazamiento Raman deseada que varía entre 1220 y 1300 nm y tiene un ancho de línea espectral amplio de al menos 10 nm, en donde " n "es un número entero; y
un generador del segundo armónico SHG (Second Harmonic Generator) de un solo paso que incluye un cristal óptico no lineal de triborato de litio LBO (16) que recibe la luz de la bomba pulsada en la longitud de onda de desplazamiento Raman y tiene un ancho de línea de aceptación espectral que es suficiente para cubrir el ancho de línea espectral amplio de la luz de la bomba pulsada, en la que el SHG genera una luz roja SM de ancho de línea espectral amplio pulsado a la mitad de la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada con un ancho de línea espectral amplio de al menos 5 nm.

2. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 1, en el que la fuente de la bomba láser de fibra SM Yb y el convertidor Raman de fibra SM están configurados cada uno con una fibra PM que tiene un núcleo de sílice en un revestimiento de sílice.

3. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 2, en el que la longitud del convertidor Raman de fibra SM es suficiente para inducir un cambio de frecuencia de tercera o cuarta orden Stokes para convertir la longitud de onda de la luz de la bomba a la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada.

4. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 1, en el que el convertidor Raman de fibra SM incluye un núcleo de cristal de fosfato en un revestimiento de sílice
y/o
en el que la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada con una línea espectral amplia de al menos 5 nm es suficiente para reducir sustancialmente el ruido moteado al iluminar la pantalla RGB.

5. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 1, en el que el convertidor Raman de fibra SM incluye un núcleo de cristal de fosfato en un revestimiento de sílice y en el que el convertidor Raman SM está configurado con una longitud suficiente para inducir un cambio de frecuencia de primer orden Stokes para convertir la longitud de onda de la bomba que se enciende a la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada.

6. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 1, que comprende además una fuente de semilla de luz Raman (28) que opera en un régimen de onda continua CW (Continuous Wave) para emitir luz a la longitud de onda deseada de desplazamiento Raman que está acoplada al convertidor Raman de fibra SM, en el que la fuente de semilla de luz Raman está configurada como un láser de fibra o diodo Fabry-Perot de banda ancha, un láser reflector distribuido Bragg DBR o un láser de retroalimentación distribuido DFB, o un láser de longitud de onda estabilizada.

7. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 1, en el que el amplificador de fibra incluye
una fibra activa dopada con PM Yb (30) que tiene un núcleo MM multimodo que está configurado con una sección transversal de doble cuello de botella y dimensionado para soportar la FM en la longitud de onda de la bomba,
una fibra pasiva de entrada PM SM (32) que tiene un núcleo que guía un SM de la luz de la bomba, los núcleos de los respectivos núcleos pasivos y dopados con Yb que tienen extremos respectivos empalmados entre sí para proporcionar el acoplamiento del SM en un extremo central del núcleo MM de la fibra dopada con Yb que excita en el FM, el núcleo de la fibra pasiva de entrada PM SM y el extremo central de la fibra dopada con Yb están configurados de modo que los diámetros de campo de modo MFD de SM respectivo y FM coinciden sustancialmente entre sí.

8. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 1, que comprende además una fuente de semilla de luz Raman (28) que funciona en un régimen de onda continua en sentido horario para emitir luz a la longitud de

onda de desplazamiento Raman deseada que está acoplada al convertidor Raman de fibra SM, y un multiplexor de división de longitud de onda WDM (26) que multiplexa la luz de la bomba pulsada y la luz en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada ya sea arriba o abajo del amplificador de fibra.

9. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 2, en el que el convertidor Raman de fibra SM funciona con una eficiencia de conversión dentro de un rango de 50-80%, y la eficiencia global del enchufe de pared del generador varía dentro de un rango de 6-10%.

10. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 1, en el que el convertidor Raman de fibra SM está configurado como un láser Raman de fibra SM que tiene un núcleo de sílice rodeado por un revestimiento de sílice, una pluralidad de reflectores espaciados que se escriben en el núcleo de sílice que define una cavidad resonante, la pluralidad de reflectores separados que incluye una pluralidad de reflectores de alta reflectividad y un reflector de baja reflectividad.

11. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 10, en el que el láser Raman de fibra SM incluye cinco rejillas Bragg de alta reflectividad
y/o
en el que la fuente de la bomba láser de fibra Yb incluye un láser Fabry-Perot pulsado configurado para emitir un tren de pulsos de bomba cada uno teniendo una duración en un rango de microsegundos.

12. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 11, en el que el láser de fibra Raman SM incluye cinco rejillas Bragg de alta reflectividad y una rejilla Bragg de baja reflectividad de salida transparente a la luz de la bomba en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada.

13. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 10, en el que un tiempo de ida y vuelta de cada pulso de luz en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada en la cavidad resonante coincide con una tasa de repetición del haz de la bomba tal que cada pulso de luz subsiguiente en la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada tanto temporal como espacialmente con el pulso de luz de la bomba acoplado al láser Raman.

14. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 1, que comprende además una fuente de semilla de luz Raman (28) que opera en un régimen de onda continua para emitir luz a la longitud de onda de desplazamiento Raman deseada que está acoplada al convertidor Raman de fibra SM.

15. El generador de luz roja de línea ancha de la reivindicación 1, en el que la luz roja de línea ancha pulsada SM a una longitud de onda de aproximadamente 615 nm tiene una potencia promedio en un rango entre 45-110 W y una potencia máxima que varía entre 1.1 y 2.8 kW.

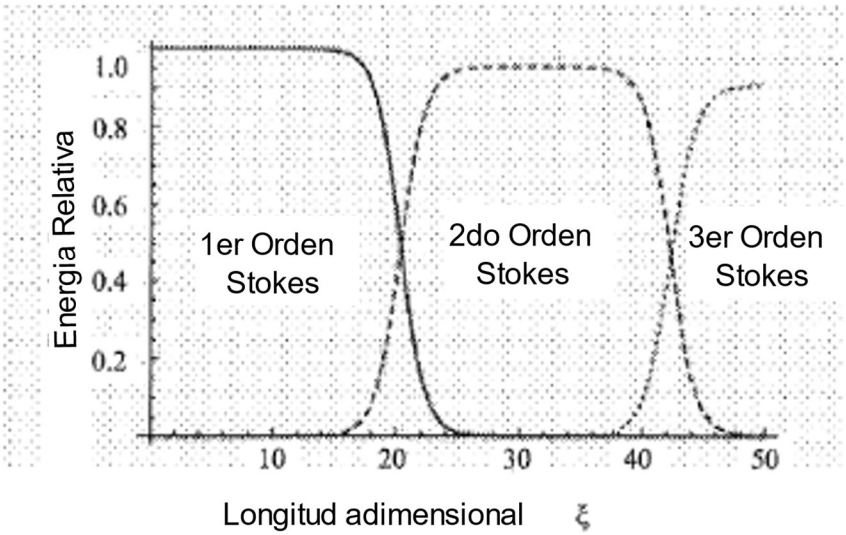
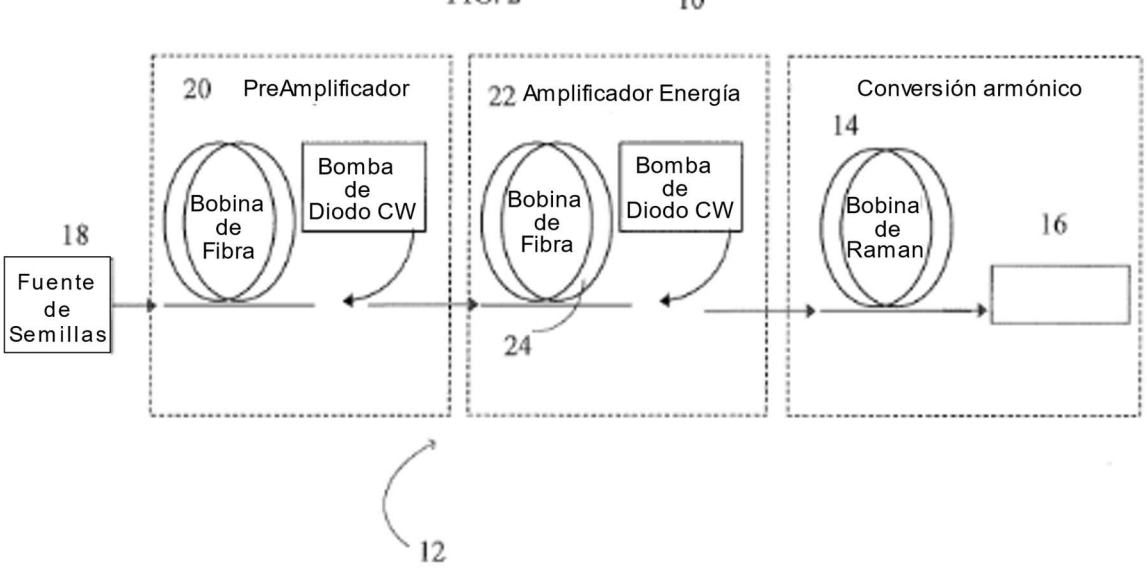


FIG. 1
Estado de la Técnica

FIG. 2



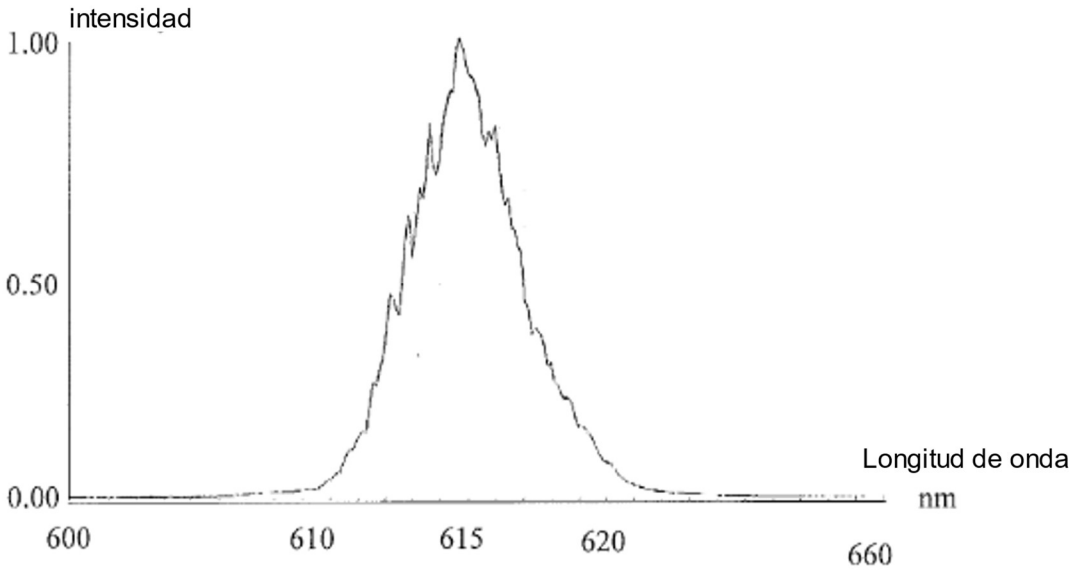


FIG. 3

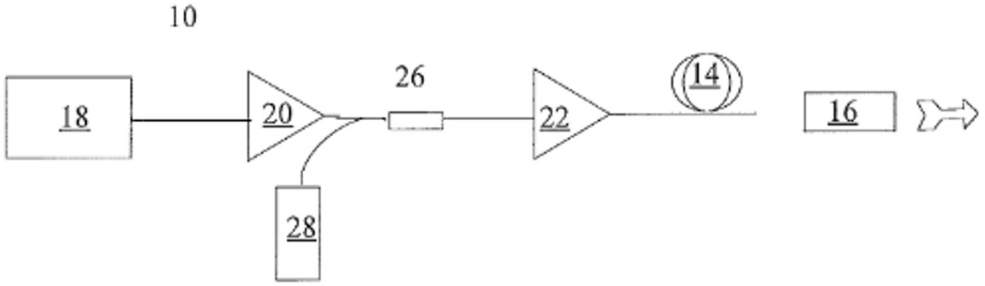


FIG. 4

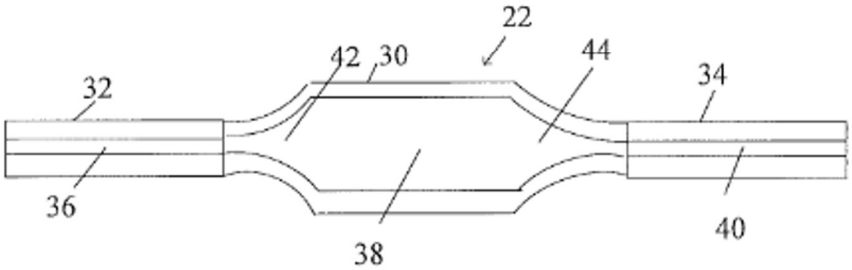


FIG. 5

FIG. 6

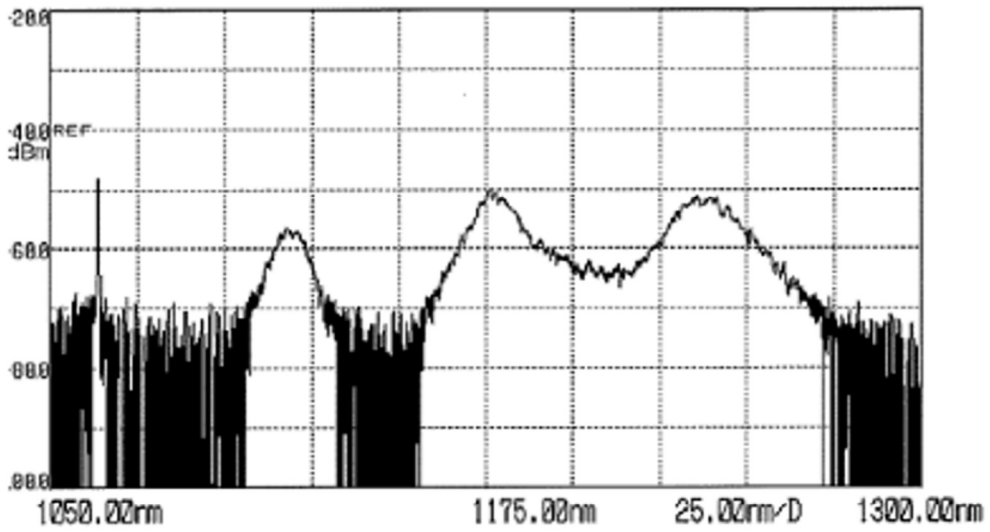


FIG. 7

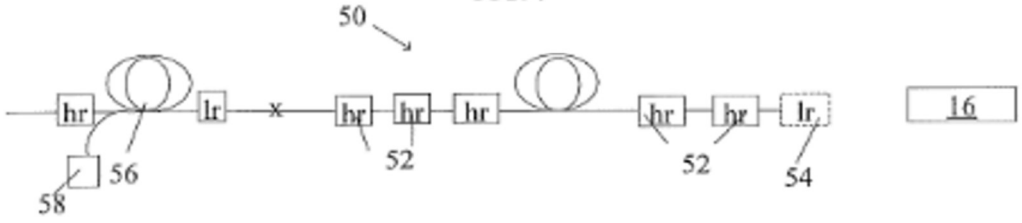
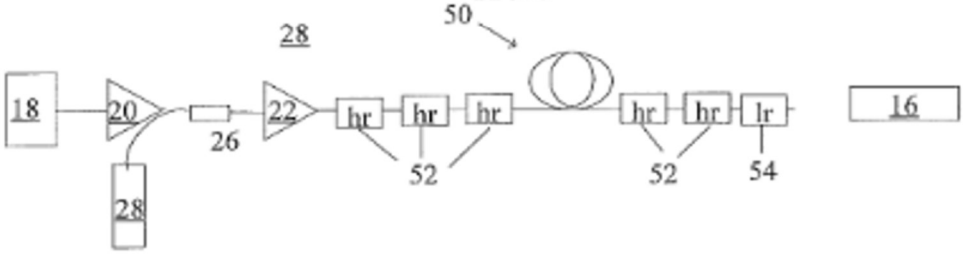



FIG. 8