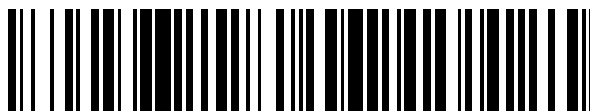


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 774 433**

51 Int. Cl.:

G02F 1/365 (2006.01)

G02F 1/35 (2006.01)

G02B 21/16 (2006.01)

H01S 3/23 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.11.2008 E 14195882 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.02.2020 EP 2913701**

54 Título: **Fuentes de pulsos ópticos supercontinuos**

30 Prioridad:

19.01.2008 GB 0800936

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

21.07.2020

73 Titular/es:

**FIANIUM LIMITED (100.0%)
Unit 20 Compass Point, Ensign Way, Hamble
Southampton
Hampshire SO31 4RA, GB**

72 Inventor/es:

**CLOWES, JOHN;
GRUDININ, ANATOLY y
GODFREY, IAN**

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 774 433 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Fuentes de pulsos ópticos supercontinuos

5 La presente invención se refiere a una fuente de pulsos ópticos y una fuente de iluminación para un microscopio STED que incluye la fuente de pulsos ópticos.

10 "Advances in high-power short-pulse fiber laser systems and technology" (Price y otros, Proceedings of SPIE, vol. 5709, núm. 1, 27, pp. 184-192) describe los láseres y amplificadores de fibra Yb para sistemas de pulso corto de alta potencia. "A white light confocal microscope for spectrally resolved multidimensional imaging" (Frank y otros, J. Microsc., vol. 227, pp. 203-215) describe un microscopio confocal que usa un láser supercontinuo como fuente de excitación.

15 Los láseres supercontinuos, que suministran espectros continuos en un ancho de banda ultra amplio, ofrecen una fuente ideal para muchas aplicaciones en la formación de imágenes biomédicas, la caracterización de componentes, el control de fabricación y la investigación de defensa. La forma más común de láser supercontinuo comprende una fuente de bombeo óptica de pulso ultracorto que funciona a una longitud de onda de bombeo en la región infrarroja del espectro (típicamente alrededor de 800 nm para un láser Ti: Sapphire o 1064 nm para láseres de fibra de modo bloqueado y láseres (de estado sólido de diodo bombeado)) y una fibra de cristal fotónico altamente no lineal, con propiedades de dispersión especialmente diseñadas. La interacción entre el pulso óptico de bombeo de alta intensidad y la fibra de sílice no lineal provoca una ampliación extrema en las regiones visibles e infrarrojas del espectro para proporcionar espectros que abarcan desde aproximadamente 450 nm hasta más de 2,5 micrómetros.

25 El fenómeno del supercontinuo se propuso por primera vez en la década de 1970 por Alfano y otros [R. R. Alfano y S. L. Shapiro, "Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses", Phys. Rev. Lett. 24, 592 (1970)] y en el 2000 se hizo la primera demostración de un supercontinuo basado en fibra por Ranka y Windelar [J. I&I. Ranka y otros, "Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm", Opt. Lett. 25 (1), 25 (2000)] (US 4 450 427) mediante el uso de un láser de femtosegundo con modo bloqueado de Ti:Sapphire 1.0 para bombear una fibra de cristal fotónico 11 con una longitud de onda de dispersión cero a aproximadamente 760 nm en el espacio libre a través de la óptica de lanzamiento 12 como se muestra en la Figura 1. Más recientemente, los investigadores y las empresas han utilizado fuentes de bombeo basadas en nanosegundos y picosegundos que funcionan a una longitud de onda de alrededor de 1064 nm para bombear fibras de cristal fotónico con una longitud de onda de dispersión cero cercana a la longitud de onda de 1 μ m para generar productos supercontinuos de alto brillo.

35 Los productos comerciales tales como el SC450 de Fianium, que se describe en "Supercontinuum sources head for medical market" (J. Clowes in optics & laser europe, septiembre de 2007, número 153, páginas 19-22), se basan en osciladores de fibra de modo bloqueado y amplificadores de fibra óptica de alta potencia para generar pulsos altamente intensos en la longitud de onda de bombeo, que cuando se inyectan en una fibra de cristal fotónico no lineal (PCF), dan como resultado una ampliación espectral extrema en las regiones visibles e infrarrojas del espectro.

40 La Figura 2 muestra un ejemplo de tal sistema, donde un oscilador de fibra con modo bloqueado 21 produce pulsos ópticos de baja energía de aproximadamente 10 ps de duración y a una velocidad de repetición de 20 MHz a 100 MHz. Los pulsos se amplifican dentro de un amplificador de fibra en cascada 22, que comprende una o más etapas de amplificación, con el aislamiento óptico 23 entre cada etapa. La salida del amplificador es un pulso de alta energía de hasta 400 nJ y decenas de kilovatios de potencia máxima. La salida del amplificador se inyecta en una longitud de PCF altamente no lineal 24 con dispersión anómala en la longitud de onda de bombeo (1064 nm) y longitud de onda de dispersión cero cerca de la longitud de onda de bombeo. El ancho de banda espectral del pulso se amplía dentro de la PCF, lo que crea un pulso de aproximadamente 100 nJ de energía y un ancho de banda de 400 nm a 2,5 μ m que sale de esta PCF.

50 La naturaleza pulsada de estas fuentes y las altas velocidades de repetición (20 MHz a 160 MHz), hacen que estas fuentes sean atractivas tanto para aplicaciones que requieren radiación de onda casi continua como para aplicaciones que involucran mediciones resueltas en el tiempo tales como FLIM (formación de imágenes de vida útil fluorescentes) y TCSPC (conteo de fotones individuales correlacionados en el tiempo). Sin embargo, a menudo, las altas velocidades de repetición pueden ser un factor limitante en la formación de imágenes de vida útil, donde la separación pulso a pulso (50 nanosegundos para una fuente de 20 MHz a unos pocos nanosegundos para 160 MHz) puede ser mucho más corta que la vida útil de la muestra bajo evaluación. En este caso, se requiere una velocidad de repetición de pulsos más baja. En general, la mayoría de los sistemas de láseres de modo bloqueado funcionan a velocidades de repetición de pulsos de varias decenas de MHz (DPSS típicamente de 80 MHz a 100 MHz, y láseres de fibra de 20 MHz a varios cientos de MHz). Algunas aplicaciones requieren velocidades de repetición más bajas - por ejemplo, FLIM, donde las moléculas marcadas con fluorescencia se excitan por un pulso óptico incidente y la decadencia de la fluorescencia se monitorea antes de que llegue el siguiente pulso óptico. En FLIM, las vidas útiles de interés muy a menudo pueden exceder decenas o incluso cientos de nanosegundos y, por lo tanto, a menudo se requiere tener velocidades de repetición de 40 MHz y menos. Las velocidades de repetición de menos de 20 MHz, aunque no son imposibles de lograr, son difíciles de suministrar desde un oscilador de fibra con modo bloqueado debido a la alta no linealidad dentro de una cavidad larga (10 m para un oscilador de 10 MHz). Desde una fuente DPSS, tal cavidad (5 m de largo para 20 MHz y 100 m de longitud para 1 MHz) es casi imposible de hacer debido a la complejidad requerida del diseño de la cavidad.

De acuerdo con un primer aspecto de la invención, se proporciona una fuente de pulsos ópticos como se define en la reivindicación adjunta 1.

5 La fuente de pulsos ópticos permite generar pulsos ópticos supercontinuos con un control flexible de la velocidad de repetición del pulso de salida y, por lo tanto, la separación pulso a pulso. El control de la separación entre pulsos es una ventaja particular cuando la fuente se usa para proporcionar iluminación supercontinua en aplicaciones donde se miden las vidas útiles de decadencia, tal como FLIM, y la fuente de pulsos ópticos puede operarse para generar pulsos supercontinuos a velocidades de repetición de pulsos inferiores a 20 MHz para tales aplicaciones.

10 El elemento óptico no lineal comprende una fibra óptica microestructurada, que es preferentemente una de una fibra de cristal fotónico altamente no lineal, una fibra de orificio lateral, una fibra de banda prohibida fotónica de núcleo hueco y una fibra de banda prohibida fotónica de núcleo sólido.

15 El láser óptico de bombeo puede comprender un láser de modo bloqueado. La velocidad de repetición de los pulsos de bombeo puede ser variable.

20 El láser óptico de bombeo puede comprender alternativamente un oscilador de fibra de modo bloqueado que puede operarse para generar pulsos ópticos de bombeo. La fuente de pulsos ópticos comprende además un amplificador de fibra óptica configurado para recibir pulsos de bombeo desde el oscilador de fibra de modo bloqueado y puede operarse para amplificar los pulsos de bombeo. El oscilador de fibra de modo bloqueado y el amplificador forman juntos un amplificador de potencia del oscilador maestro (MOPA). El medio de activación puede proporcionarse entre el oscilador de fibra de modo bloqueado y el amplificador de fibra óptica.

25 El medio de activación comprende preferentemente un elemento modulador óptico tal como un modulador acústico-óptico, un modulador electro-óptico o un modulador de espejo de absorción de saturación de semiconductores (SESAM). El elemento modulador se sincroniza preferentemente con la salida del láser óptico de bombeo, para controlar selectivamente la velocidad de repetición de los pulsos lanzados en la fibra, para de esta manera controlar selectivamente la velocidad de repetición del pulso de salida. El medio de activación puede operarse preferentemente para controlar la velocidad de repetición del pulso de salida desde unos pocos hercios hasta cien MHz.

30 La fuente de pulsos ópticos preferentemente comprende además un filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable configurado para recibir un pulso óptico supercontinuo y para filtrar la longitud de onda del pulso a una longitud de onda predeterminada. El filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable se configura preferentemente para recibir una pluralidad de pulsos ópticos supercontinuos en un conjunto de pulsos y para filtrar la longitud de onda de cada pulso en una respectiva de una pluralidad correspondiente de longitudes de onda predeterminadas, para formar de esta manera un conjunto de pulsos ópticos de longitud de onda intercalada. El filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable se configura preferentemente para filtrar una pluralidad de tales conjuntos de pulsos en series para formar de esta manera un tren de pulsos ópticos de longitud de onda intercalada repetitivo.

35 El espectro de transmisión del filtro óptico de longitud de onda sintonizable puede seleccionarse para pasar cualquier longitud de onda o conjunto de longitudes de onda dentro del espectro supercontinuo, para de esta manera controlar el perfil espectral de cada pulso óptico de salida. Por lo tanto, la fuente de pulsos ópticos puede usarse como una fuente óptica para la Transferencia de energía de resonancia Forster de excitación por intercalación de pulsos (PIE-FRET).

40 La fuente de pulsos ópticos preferentemente comprende además el segundo medio de activación proporcionado después del elemento óptico no lineal configurado para seleccionar los pulsos ópticos recibidos a una velocidad de repetición de pulsos menor. El segundo medio de activación comprende preferentemente un modulador acústico-óptico o un filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable. El filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable es preferentemente un filtro acústico-óptico sintonizable.

45 Preferentemente, un único filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable se configura para realizar tanto el filtrado de longitud de onda como la selección de pulso.

50 El segundo medio de activación puede operarse además preferentemente para reducir la intensidad óptica de uno o más pulsos ópticos en el conjunto o tren de pulsos. De esta manera, el segundo medio de activación puede operarse para controlar la intensidad óptica de los pulsos en un tren de pulsos ópticos de diferentes longitudes de onda, de modo que la intensidad óptica puede cambiar para pulsos de diferentes longitudes de onda.

55 La fuente de pulsos ópticos puede comprender alternativamente un divisor de haces óptico acoplado a la salida de la fuente de pulsos ópticos supercontinuos, para de esta manera dividir los pulsos ópticos supercontinuos en los primer y segundo pulsos divididos en las primera y segunda trayectorias ópticas, los primer y segundo filtros ópticos que tienen diferentes espectros de transmisión de longitud de onda respectivamente proporcionados en las primera y segunda trayectorias ópticas, un elemento de retardo óptico proporcionado en la primera trayectoria óptica y un combinador de haces óptico dispuesto para recombinar los primer y segundo pulsos divididos de las primera y segunda trayectorias

ópticas en un tren de pulsos en una trayectoria óptica común. De esta manera, se produce un tren de pulsos que comprende pulsos intercalados de dos longitudes de onda diferentes.

5 De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un método para proporcionar pulsos ópticos como se define en la reivindicación adjunta 9.

10 Por lo tanto, esta invención permite el desarrollo de fuentes de pulsos supercontinuos de mayor energía para ciertas aplicaciones donde se requiere una mayor intensidad del pulso (la microscopía de reducción de emisión estimulada (STED) es un ejemplo).

15 El método puede comprender reducir la velocidad de repetición de los pulsos de bombeo a menos de 20 MHz y aumentar la duración de los pulsos de bombeo a más de 10 picosegundos, y con la máxima preferencia a al menos 200 picosegundos.

20 La presente invención puede usarse en una fuente de iluminación para microscopía de reducción de emisión estimulada, la fuente de iluminación que comprende una fuente de pulsos ópticos como se describió en cualquiera de los párrafos 7 al 18 anteriores configurada para generar pulsos ópticos de salida que tienen una velocidad de repetición en el intervalo de 1 MHz a 10 MHz y una densidad espectral de energía de al menos 100 piconjulios por nanómetro, la fuente de pulsos ópticos que se opera para escalar la energía de los pulsos ópticos supercontinuos al reducir la velocidad de repetición de los pulsos de bombeo del láser óptico de bombeo y aumentar la duración de los pulsos de bombeo.

25 La fuente de pulsos ópticos puede operarse para reducir la velocidad de repetición de los pulsos de bombeo a menos de 20 MHz. El láser óptico de bombeo puede operarse preferentemente para generar pulsos ópticos de bombeo que tienen una duración del pulso de bombeo mayor de 10 picosegundos, y con la máxima preferencia al menos 200 picosegundos.

30 La presente invención puede usarse además en un microscopio óptico de fluorescencia basado en reducción y emisión estimulada, el microscopio que comprende una fuente de iluminación como se describió en los párrafos 22 o 23 anteriores, la fuente de iluminación que se configura para proporcionar tanto la iluminación de excitación como la iluminación de emisión estimulada.

35 En microscopios convencionales de reducción y emisión estimulada (STED) (G.Donnert y otros, Proceedings of the Natural Academic Society EE. UU. 103,11440-11445 (2006)) se usan dos láseres simultáneamente, uno (típicamente un láser Ti:Sapphire) con alta intensidad óptica para formar el haz STED y un segundo láser visible sintonizable para excitar la fluorescencia. Los láseres supercontinuos convencionales, basados en PCF de láser de bombeo de fibra de modo bloqueado o PCF de láser de bombeo Ti:Sapphire son demasiado bajos en energía de pulso para STED. Mediante el uso de una velocidad de repetición reducida y un pulso más largo, de acuerdo con la presente invención, se proporciona una fuente de pulsos ópticos que puede operarse para generar pulsos supercontinuos que tienen una densidad espectral de energía de pulso cercana a 1 nJ/nm, lo que hace de esta una solución de fuente única adecuada para la excitación de fluorescencia y STED dentro de un microscopio STED.

40 Otro beneficio de esta invención es que proporciona la capacidad de ser flexible en la duración de los pulsos de bombeo y la longitud de la fibra óptica de microestructura requerida para generar los pulsos de salida supercontinuos.

45 En todos los casos descritos dentro de esta invención, nos referimos específicamente, pero no exclusivamente a, las longitudes de onda que se encuentran dentro del ancho de banda de ganancia de las fibras de sílice dopadas con iterbio - entre 1020 nm y 1080 nm. Igualmente, esta invención puede relacionarse con pulsos supercontinuos generados mediante el uso de un láser de fibra dopada con Nd o un láser de fibra dopada con Er o una fuente de láser DPSS como el láser óptico de bombeo.

50 Las modalidades preferidas de la presente invención se describirán ahora a modo de ejemplo solamente, y con referencia a los dibujos acompañantes, en los cuales:

55 La Figura 1 es una ilustración esquemática de una disposición de la técnica anterior para la generación de un supercontinuo óptico;

La Figura 2 es una ilustración esquemática de un láser de fibra supercontinua de la técnica anterior;

60 La Figura 3 es una ilustración esquemática de una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con un ejemplo comparativo de la presente invención generada a partir de una fuente láser de modo bloqueado DPSS de espacio libre;

La Figura 4 es una ilustración esquemática de una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con una primera modalidad de la presente invención;

65 La Figura 5 es una ilustración esquemática de una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con una segunda modalidad de la presente invención;

La Figura 6 es una ilustración esquemática de una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con una tercera modalidad de la presente invención;

La Figura 7 es una representación de un primer conjunto de trenes de pulsos ópticos de salida a) que salen de la fibra óptica microestructurada y b) que salen del AOTF, que pueden generarse por la fuente de pulsos ópticos de la Figura 6;

La Figura 8 es una representación de un segundo conjunto de trenes de pulsos ópticos de salida a) que salen de la fibra óptica microestructurada y b) que salen del AOTF, que pueden generarse por la fuente de pulsos ópticos de la Figura 6;

La Figura 9 es una representación de un tercer conjunto de trenes de pulsos ópticos de salida a) que salen de la fibra óptica microestructurada y b) que salen del AOTF, que pueden generarse por la fuente de pulsos ópticos de la Figura 6.

Con referencia a la Figura 3, un ejemplo comparativo proporciona una fuente de pulsos ópticos 30 que comprende una fuente de láser óptico de bombeo 31, una fibra óptica microestructurada 35 y el medio de activación 33.

El láser óptico de bombeo en este ejemplo toma la forma de una fuente de láser de estado sólido bombeado por diodo (DPSS) 31 (por ejemplo, un láser de modo bloqueado de 1064 nm que funciona a 76 MHz) que puede operarse para producir pulsos de aproximadamente 200 nJ de energía y una duración de 10 ps. Los pulsos de salida del láser de bombeo 31 pasan a través de un conjunto de lentes 32 al medio de activación 33, que aquí comprende un modulador óptico 33, sincronizado con el láser de bombeo 31 y puede operarse de manera que pueda activar los pulsos de bombeo y producir un tren de pulsos que tenga una velocidad de repetición reducida (R_r) donde $R_r = R_f/N$, donde R_f es la frecuencia fundamental del láser de bombeo (en este ejemplo, 76 MHz) y N es un número entero positivo. Los pulsos que salen del modulador 33 se inyectan a través de la óptica 34 en la fibra microestructurada 35, que aquí comprende un elemento no lineal tal como una fibra de cristal fotónico (PCF) 35. La propagación a través de la PCF 35 hace que los pulsos se amplíen espectralmente para producir pulsos supercontinuos a la velocidad de repetición reducida del pulso de salida R_r . La Figura 3 ilustra, por lo tanto, una fuente de pulso supercontinuo de picosegundos o femtosegundos de baja velocidad de repetición, en este caso bombeada desde una fuente de láser de modo bloqueado DPSS de espacio libre.

Uno de los principales inconvenientes con el uso de la óptica de espacio libre, como se muestra en la Figura 3, es que la estabilidad de lanzamiento en las estructuras pequeñas de PCF no lineales es pobre y la cara de extremo de estas fibras puede dañarse fácilmente.

La Figura 4 muestra una fuente de pulsos ópticos supercontinuos 40 de acuerdo con una primera modalidad de fibra de la invención, similar a la disposición mostrada en la Figura 2. El láser óptico de bombeo comprende un oscilador de fibra de modo bloqueado 41, que puede operar a una velocidad de repetición R_f de 40 MHz, para producir pulsos de baja energía a 1064 nm y que tiene una duración del pulso de aproximadamente 10 ps. Los pulsos de bombeo se amplifican en un amplificador de fibra óptica 42. Los pulsos de bombeo se inyectan entonces en el medio de activación, en forma de un modulador acoplado a fibra 43, que en este ejemplo comprende un modulador acústico-óptico (AOM). Se apreciará que puede usarse alternativamente un modulador electro-óptico (EOM), un modulador SESAM o cualquier otro tipo de dispositivo de modulación rápida, capaz de cambiar con tiempos de subida de menos de un microsegundo. El modulador 43 se sincroniza con la frecuencia del oscilador (R_f) y puede operarse para activar la salida del oscilador, es decir, los pulsos de bombeo, hasta una velocidad de repetición de unas pocas decenas de KHz, y por lo tanto seleccionar los pulsos de bombeo, lo que proporciona una frecuencia de pulsos de bombeo seleccionable $R_r = R_f/N$ (N es un valor entero positivo).

Los pulsos de bombeo de velocidad de repetición reducida que salen del modulador 43 se amplifican en un amplificador de potencia 45. El láser de bombeo 41 y el amplificador de potencia 45 juntos forman un amplificador de potencia del oscilador maestro (MOPA) 46. Los pulsos de bombeo que salen del MOPA 46 tienen una potencia máxima del pulso, gobernada por las limitaciones no lineales del amplificador de potencia 45 de, por ejemplo, aproximadamente 40 KW, correspondiente a una energía del pulso de bombeo de aproximadamente 400 nJ.

Después de la amplificación, los pulsos de bombeo se introducen en una longitud de fibra óptica microestructurada altamente no lineal, en este ejemplo PCF 44, con una longitud de onda de dispersión cero a aproximadamente 1040 nm. La propagación a través de la PCF 44 produce una ampliación espectral extensiva de los pulsos de bombeo hacia la región visible y más hacia afuera en la región IR del espectro, de esta manera que forma los pulsos supercontinuos. Los pulsos supercontinuos tienen un supercontinuo que abarca desde menos de 450 nm hasta más de 2000 nm, una energía de pulso supercontinuo total de aproximadamente 100 nJ, y una densidad espectral de energía de aproximadamente 50 pJ/nm.

En este ejemplo, dado que el oscilador permanece igual, para una energía de pulso de salida dada se logran espectros nominalmente idénticos para todas las velocidades de repetición. La energía del pulso se fija y asegura, pero la separación pulso a pulso aumenta al reducir la velocidad de repetición.

En una disposición alternativa, la fuente de pulsos ópticos 40 de esta modalidad puede operarse con el oscilador de fibra de modo bloqueado de baja potencia (láser de bombeo) 41 que genera pulsos que tienen una duración del pulso de 200

ps. La amplificación dentro de un amplificador de fibra con fijación no lineal en la potencia máxima de aproximadamente 40 KW, da como resultado una energía del pulso de bombeo máxima correspondiente de 8 μJ (por ejemplo, 1 MHz, potencia promedio de 8 W y duración del pulso de 200 ps). Se producen pulsos supercontinuos que tienen una energía de pulso supercontinuo total de aproximadamente 2 μJ y una densidad espectral de energía de aproximadamente 1 nJ/nm.

5 Con referencia a la Figura 5, una segunda modalidad de la invención proporciona una fuente de pulsos ópticos 50 que se agrega a la fuente de pulsos ópticos 40 de acuerdo con la primera modalidad.

10 En esta modalidad, la fuente de pulsos ópticos 50 comprende además un divisor de haces polarizador 52 (puede usarse alternativamente un divisor de haces no polarizador u otro mecanismo de división similar), los filtros ópticos 53 y el elemento de retardo óptico 54, y un combinador de haces 56. La salida 51 de la fuente de pulsos ópticos 40 se divide en dos trayectorias de haces (A, B) mediante el divisor de haces 52. Los filtros ópticos 53 se proporcionan en cada una de las trayectorias de haces divididas; los filtros ópticos pueden ser filtros acústico-ópticos sintonizables (AOTF), cada uno que puede operarse para transmitir una longitud de onda diferente, o filtros estándar de diferentes longitudes de onda de transmisión.

15 El elemento de retardo óptico 54, que toma la forma de una línea de retardo de fibra óptica, se proporciona en una trayectoria de haz (A). Para una salida de velocidad de repetición de pulso óptico supercontinuo de 20 MHz desde la fuente de pulsos ópticos 40, se requiere un retardo de 25 ns para que los pulsos viajen a lo largo de la trayectoria A. La línea de retardo de fibra óptica 54 comprende así una trayectoria de retardo de entre 5 y 7,5 m de longitud. Se proporciona una lente de acoplamiento 55 para lanzar los pulsos divididos en la línea de retardo 54. La propagación a lo largo de la trayectoria A hace que los pulsos ópticos divididos en esa trayectoria se retrasen con respecto a los pulsos ópticos en la otra trayectoria de haz dividido (B). Se apreciará que esto puede lograrse alternativamente en el espacio libre.

20 El combinador de haces, que comprende un espejo dicróico 56 pero que puede comprender alternativamente un acoplador de fibra, se proporciona en los extremos de las trayectorias de haces divididos (A, B) para recombinar los dos trenes de pulsos divididos, para de esta manera formar un tren de pulsos que comprende pulsos intercalados de dos longitudes de onda diferentes.

25 Aunque una línea de retardo de fibra óptica 54 es la opción preferida, esto requiere el lanzamiento de la luz en una fibra óptica (54) por una lente adecuada (55), que incurre en pérdida e inestabilidad adicionales. Este enfoque es atractivo como experimento, pero es menos práctico para un instrumento comercial. Además, este enfoque no puede usar una velocidad de repetición de pulsos supercontinuos variable, ya que el desequilibrio de trayectoria requerido, introducido por la línea de retardo, cambia con la velocidad de repetición.

30 Una tercera modalidad de la invención proporciona una fuente de pulsos ópticos 60, como se muestra en la Figura 6, que comprende una fuente de pulsos ópticos 40 de acuerdo con la primera modalidad y un filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable 63.

35 La fuente de pulsos ópticos 40 puede operarse para generar pulsos ópticos supercontinuos que tienen espectros de longitud de onda de 400 nm a 2000 nm, a velocidades de repetición del pulso variables entre 40 MHz y menos de 100 kHz. La fuente de pulsos ópticos 40 se proporciona con un control de microprocesador incorporado, que determina cuándo se suministran los pulsos supercontinuos, y proporciona una señal de activación de salida TTL. La salida óptica de la fuente de pulsos ópticos 40 está en el espacio libre, y el haz se colima o lamina por la óptica 62.

40 El filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable 63 comprende un filtro acústico-óptico sintonizable (AOTF) accionado por un controlador RF o sintetizador digital directo (DDS) 64. El AOTF 63 puede operarse en un intervalo espectral (por ejemplo, de 400 nm a 700 nm) cubierto por el espectro de pulsos ópticos supercontinuos. El DDS 63 se sincroniza con la fuente de pulsos ópticos 40 a través de un accionador externo 61, o desde un microprocesador, de manera que el AOTF puede modularse a la frecuencia de operación de la fuente de pulsos ópticos 40 o en cualquier frecuencia más baja. El AOTF 63 también puede operarse en modo ráfaga, para transmitir una ráfaga de pulsos ópticos.

45 Al cambiar la frecuencia de RF del controlador del AOTF 64, puede sintonizarse la salida del filtro a cualquier longitud de onda que se encuentre dentro del AOTF 63 y los intervalos espectrales supercontinuos. Los AOTF típicos tienen intervalos espectrales de, por ejemplo, de 400 nm a 700 nm en la región visible, de 700 nm a 1100 nm en el infrarrojo cercano (NIR) y de 1100 nm a 2000 nm en el IR. Todas estas longitudes de onda están disponibles dentro del espectro de los pulsos ópticos supercontinuos generados por la fuente de pulsos ópticos 40.

50 La salida difractada de primer orden del AOTF 63 forma la salida de la fuente de pulsos ópticos 60, y puede lanzarse en una fibra óptica o usarse en el espacio libre. El orden cero del AOTF se absorbe por una trampa de haz adecuada 65 o puede formar una segunda salida de la fuente de pulsos ópticos 60.

55 En este ejemplo, el AOTF 63 se activa para operar a una longitud de onda definida por el usuario para un pulso y una segunda longitud de onda definida por el usuario para el siguiente pulso, lo que genera así un tren de pulsos de salida de longitud de onda intercalada de pulsos de longitud de onda alterna. La fuente de pulsos ópticos 60 es, por lo tanto, adecuada para su uso como una fuente de iluminación para PIE-FRET.

65

En dependencia de la velocidad del AOTF 63 (a menudo limitada por el tamaño del punto del haz a través del cristal), el AOTF puede configurarse para suministrar pulsos a la velocidad de repetición del pulso óptico supercontinuo, como se muestra en la Figura 7, donde la Figura 7a muestra los pulsos de la fuente de pulsos ópticos 40 y la 7b muestra la salida del AOTF, es decir, la salida de la fuente de pulsos ópticos 60, que comprende un tren de longitud de onda intercalada de pulsos filtrados a dos longitudes de onda diferentes (representadas por las líneas continua y discontinua).

El AOTF 63 puede operar adicionalmente como un selector de pulso, para reducir la velocidad de repetición de pulsos para los pulsos de salida. Como se muestra en la Figura 8, el tren de pulsos supercontinuos se muestra en la Figura 8a, y el tren de pulsos de salida AOTF de longitud de onda filtrada y pulsos de velocidad de repetición reducida en dos longitudes de onda diferentes (representadas por las líneas continuas y discontinuas) se muestra en la Figura 8b.

El AOTF 63 puede operarse para filtrar los pulsos ópticos supercontinuos en más de 2 longitudes de onda, para producir un tren de pulsos muy complejo que podría tener numerosas aplicaciones dentro de las aplicaciones de imágenes avanzadas. La Figura 9, por ejemplo, muestra los pulsos ópticos supercontinuos (Figura 9a) a una velocidad de repetición dada, y un tren de pulsos ópticos de salida de la fuente de pulsos ópticos 60 (Figura 9b) con el AOTF 63 que opera para filtrar cada conjunto de cuatro pulsos supercontinuos en cuatro longitudes de onda diferentes, para de esta manera generar un tren de pulsos ópticos de salida que comprende pulsos ópticos intercalados de cuatro longitudes de onda diferentes.

El AOTF 63 también puede operarse para controlar la amplitud de las intensidades del pulso de salida, lo que proporciona otro grado de flexibilidad para optimizar el rendimiento del sistema. Esto podría, por ejemplo, equilibrar las intensidades de iluminación para pulsos ópticos a diferentes longitudes de onda para compensar previamente los diferentes niveles de fluorescencia de los fluoróforos donantes y aceptadores en FRET.

La combinación de la velocidad de repetición del pulso óptico supercontinuo variable y AOTF para formar una fuente de pulsos ópticos de longitud de onda y velocidad de repetición variable, significa que uno puede producir una serie de velocidades de repetición y con trenes de pulsos arbitrarios de longitud de onda variable.

Se apreciará que la fuente de pulsos ópticos de velocidad de repetición variable descrita puede reemplazarse por una fuente de pulsos ópticos de velocidad de repetición fija que genera pulsos supercontinuos, siempre que el AOTF pueda operar suficientemente rápido. Por ejemplo, es difícil producir láseres de modo bloqueado a velocidades de repetición muy por debajo de 20 MHz, y esto requeriría una velocidad de conmutación del AOTF del orden de 10 ns, para cambiar de manera confiable entre colores con buena relación de extinción entre pulsos adyacentes - esencial para aplicaciones FRET donde se usan detectores y dispositivos electrónicos muy sensibles.

Típicamente, las velocidades de conmutación de 100 ns a nivel de microsegundos pueden lograrse con AOTF, lo que significa que una velocidad de repetición de pulsos ópticos de 5 MHz y menos se convierte en una solución realista. La fuente de pulsos ópticos de velocidad de repetición variable presenta un medio para lograr esta velocidad, y también proporciona la flexibilidad para variar aún más la frecuencia de repetición.

Un ejemplo en el que la fuente de pulsos ópticos 60 puede usarse como una fuente de iluminación, es en una aplicación de formación de imágenes conocida como excitación intercalada por pulsos, más comúnmente usada dentro de FRET (Transferencia de energía de resonancia Forster). La FRET es la transferencia de energía sin radiación de un fluoróforo donante ópticamente excitado a una molécula aceptadora cercana a través de la interacción dipolo-dipolo, y permite la medición cuantitativa de la longitud debido a la fuerte dependencia de la distancia de la FRET. En la FRET convencional, la calidad de la medición se obstaculiza por pares de FRET incompletos (que tienen una molécula aceptadora faltante o no funcional), que se parecen mucho a los pares de FRET con grandes distancias entre donantes y aceptadores. Además, la determinación de la eficiencia de FRET requiere información cuantitativa sobre la eficiencia de detección para la fluorescencia del donante y del aceptador, que incluye la diafonía espectral.

La FRET de excitación por intercalación de pulsos (PIE-FRET) supera estos problemas al tener pulsos consecutivos que operan a diferentes longitudes de onda. El primer pulso opera a una longitud de onda para excitar una molécula donante e iniciar la FRET. Esto conduce a la fluorescencia de donante a aceptador. El segundo pulso opera a una longitud de onda para excitar directamente el fluoróforo aceptador, pero no el donante. Este proceso determina si el par FRET tiene o no un aceptador que funciona correctamente. La PIE-FRET se ha demostrado mediante el uso de dos diodos láser de colores diferentes, modulados a la misma frecuencia, pero con un diodo retardado en el tiempo con respecto al otro, lo que produce un tren de pulsos con pulsos de colores alternos. Típicamente, este proceso se lleva a cabo a velocidades de repetición bastante altas (20 MHz a 40 MHz) con separaciones de tiempo de pulso a pulso del orden de los ns a 25 ns respectivamente, que generalmente es aceptable para la medición de la mayoría de las vidas biológicas y proporciona un alto rendimiento para construir imágenes grandes. La restricción del enfoque de dos diodos es que las longitudes de onda se limitan a las disponibles a partir de los diodos láser adecuados. La fuente de pulsos ópticos 60 de la presente invención permite la producción de trenes de pulso que tienen una combinación de cualquier conjunto de longitudes de onda dentro del intervalo espectral supercontinuo.

En una cuarta modalidad de la invención, el uso de un láser de fibra que incorpora un elemento selector de pulso permite el suministro de láseres supercontinuos de mayor energía dentro de la región visible del espectro.

En algunos ejemplos, es importante poder escalar la energía de los pulsos ópticos supercontinuos - particularmente dentro de la región visible del espectro. Mediante el uso de la misma configuración del sistema que la Figura 4, es posible escalar la energía supercontinua promedio al reducir la velocidad de repetición de los pulsos de bombeo, pero aumentar la duración de los pulsos de bombeo a cientos de picosegundos. Esto resulta efectivamente en un pulso de entrada fundamental de 1064 nm de mayor energía (la potencia máxima del pulso se limita dentro del amplificador de fibra por interacciones no lineales dominadas por la dispersión Raman estimulada (SRS)) y un aumento correspondiente en la energía del pulso supercontinuo de salida promedio a través de los espectros supercontinuos que salen del PCF.

Al aumentar la duración del pulso, se aumenta la energía de pulso promedio alcanzable dentro del límite de SRS del amplificador de fibra. El resultado, después de la inyección en el PCF, es un aumento en la densidad de energía espectral resultante de los pulsos supercontinuos.

Por ejemplo, un láser supercontinuo estándar que opera a una velocidad de repetición de 20 MHz y suministra una potencia promedio de 2 W en el supercontinuo, produce una energía de pulso supercontinuo de aproximadamente 100 nJ. Cuando se filtra la región visible de esta salida de la fuente, la densidad de energía espectral promedio está en la región de 50 pJ/nm (400 mW sobre un ancho de banda de 400 nm).

En los láseres comerciales de fibra supercontinua conocidos, tal como el intervalo SC450 de Fianium Ltd o el intervalo SuperK de Koheras A/S, la densidad espectral de energía promedio de los pulsos dentro de la región visible del espectro varía de aproximadamente 35 pJ/nm (SuperK Rapid, 3 mW/nm a 80 MHz) a 50 pJ/nm (SC450, 1 mW/nm a 20 MHz). Para estas fuentes, la potencia total supercontinua varía de 2 W a 6 W y se genera mediante el uso de fuentes de bombeo ópticas pulsadas de entre 8 W y 20 W de potencia promedio. La ampliación espectral en la fibra de cristal fotónico se genera por la alta potencia máxima de los pulsos ópticos de la fuente de bombeo que puede llegar a 40 KW (8 W, 20 MHz, 10 picosegundos). Como un ejemplo, un láser supercontinuo típico SC450-2 con una densidad espectral de potencia en la región visible de 1 mW/nm, tiene una densidad espectral de energía de aproximadamente 50 pJ/nm ($50 \cdot 10^{-12}$ J/nm), y se bombea por una fuente de bombeo óptica pulsada que opera a 20 MHz con una duración del pulso de aproximadamente 10 picosegundos y una potencia de salida de aproximadamente 8 W.

Para escalar la densidad espectral de energía de estas fuentes supercontinuas conocidas a estas velocidades de repetición a 500 pJ/nm, se requeriría una fuente láser de bombeo que tenga entre 10 y 15 veces la potencia de salida, lo que equivale a una fuente de bombeo óptica de pulso con una potencia promedio de entre 80 W y 285 W.

En esta modalidad, una fuente de pulsos ópticos 40 de pulso seleccionado, como se muestra en la Figura 6, que opera a una velocidad de repetición de pulsos de 5 MHz y una longitud de 10 m de PCF 44, logra la misma potencia visible y ancho de banda espectral, pero esto da como resultado un aumento de 5 pliegues de la energía espectral a 200 pJ/nm. Al comenzar con un pulso óptico de 200 ps y una longitud estándar de fibra no lineal, es posible escalar la densidad de energía espectral a más de 1 nJ/nm a 1 MHz, con una potencia visible promedio de aproximadamente 400 mW (sobre una banda de 400 nm) a 1 MHz.

Una quinta modalidad de la invención comprende una fuente de pulsos ópticos 40 de pulso seleccionado, como se muestra en la Figura 6, en la que la velocidad de repetición de los pulsos de bombeo se reduce a 1 MHz, y la duración del pulso aumenta a aproximadamente 200 picosegundos. Para generar la ampliación espectral requerida dentro de la PCF 44, se obtienen 40 KW de potencia máxima de pulso desde la fuente de bombeo pulsada 41 a una potencia de salida promedio de 8 W, lo que da como resultado un supercontinuo de 2 W, con una densidad espectral de potencia de 1 mW/nm en la región espectral visible, correspondiente a aproximadamente una densidad espectral de energía de 1 nJ/nm.

Una sexta modalidad de la invención proporciona un método para escalar la energía de los pulsos ópticos supercontinuos generados mediante el uso de las fuentes de pulsos ópticos 30, 40 de las modalidades anteriores. El método comprende reducir la velocidad de repetición de los pulsos de bombeo del láser óptico de bombeo 31, 41 y aumentar la duración de los pulsos de bombeo.

En general, la magnitud de la ampliación espectral de una fuente óptica que se propaga a través de un elemento óptico no lineal dado es directamente proporcional a la intensidad de esa fuente. Para una fuente láser pulsada, la intensidad viene dada por la potencia máxima del pulso:

$$P_{\text{máxima}} = P_{\text{prom}} / (R \cdot dT)$$

donde $P_{\text{máxima}}$ es la potencia máxima del pulso, P_{prom} es la potencia promedio de la fuente láser, R es la frecuencia de repetición del pulso de la fuente y dT es la duración temporal del pulso.

La energía del pulso viene dada por:

$$E = P_{\text{prom}} / R$$

5

Para un láser basado en un diseño MOPA (Amplificador de potencia de oscilador maestro), mientras que la potencia promedio del láser puede escalar, la potencia máxima se limita por efectos no lineales (principalmente dispersión Raman estimulada) dentro del sistema de amplificador de fibra, que tiene el efecto de fijar la potencia máxima, lo que resulta en:

10

$$P_{\text{máxima}} = \text{constante} = P_{\text{prom}} / (R * dT)$$

15

El método se da cuenta de que, en una primera aproximación, el alcance de la ampliación espectral dentro de un láser de fibra supercontinuo pulsado puede considerarse limitado por la potencia máxima del pulso, pero que la energía del pulso puede cambiarse al ajustar la velocidad de repetición del pulso y la duración temporal del pulso.

20

La energía del pulso máxima de la fuente de pulsos ópticos 30, 40 y, por lo tanto, la energía del pulso máxima (o densidad espectral de energía) de los pulsos supercontinuos resultantes, puede aumentar al reducir la velocidad de repetición del pulso del láser de bombeo 31, 46 y, en el caso del MOPA 46 al reducir la velocidad de repetición del pulso o al escalar la potencia promedio del amplificador 45. Para un diseño de amplificador dado y una salida de potencia promedio, puede lograrse un aumento en la energía del pulso con una reducción de la velocidad de repetición de los pulsos de bombeo y un aumento de la duración de los pulsos de bombeo.

25

El límite de potencia máxima extraíble de un amplificador de fibra dado se determina por la longitud de la fibra del amplificador y el área de sección transversal del modo que se propaga dentro de esta fibra. Para las fibras ópticas monomodo estándar que operan a 1 μm , el límite de potencia máxima puede ser tan bajo como unos pocos kW, pero esto puede escalar a decenas de kvatios para fibras de área de modo grande (LMA) donde el diámetro del campo de modo efectivo dentro del modo de fibra puede ser mayor de 12 μm .

30

Las modalidades descritas hacen uso de la reducción en la velocidad de repetición del pulso para permitir escalar la densidad espectral de energía del supercontinuo sin el requisito de escalar la densidad espectral de potencia y, por lo tanto, la potencia promedio de la fuente de bombeo óptica pulsada.

35

Por lo tanto, a partir de lo anterior, es evidente que la presente invención permite el suministro de espectros supercontinuos o fuentes láser visibles filtradas en un intervalo de velocidades de repetición de pulsos de 100 MHz hasta unos pocos Hz o menos. Esta invención tiene beneficios claros sobre las fuentes supercontinuas convencionales para aplicaciones donde la separación pulso a pulso de la fuente es un parámetro importante.

40

Pueden hacerse varias modificaciones sin apartarse del alcance de la presente invención. Por ejemplo, donde el láser de bombeo DPSS puede reemplazarse por un tipo diferente de láser de modo bloqueado, y puede comprender un MOPA. El PCF puede reemplazarse por una fibra óptica microestructurada diferente, tal como una fibra de orificio lateral, una fibra de banda prohibida fotónica de núcleo hueco y una fibra de banda prohibida fotónica de núcleo sólido, o puede reemplazarse por un elemento óptico no lineal diferente, tal como un cristal no lineal como LBO, BBO, CLBO, PPLN, PPKTP o cualquier otra fase de cristal óptico no lineal combinada para producir la conversión de frecuencia de la salida del láser de bombeo.

45

50

En las modalidades que comprenden un MOPA, el medio de activación puede ubicarse alternativamente después del amplificador de potencia.

REIVINDICACIONES

1. Una fuente de pulsos ópticos (40) que comprende:
 5 un láser óptico de bombeo (41) que puede operarse para generar pulsos ópticos de bombeo a una velocidad de repetición del pulso de bombeo;
 un elemento óptico no lineal que comprende una fibra óptica microestructurada (44);
 un modulador óptico (43) proporcionado entre la salida del láser de bombeo y el elemento óptico no lineal, y que
 10 puede operarse para controlar selectivamente el lanzamiento de pulsos de bombeo en el elemento óptico no lineal a una velocidad de repetición variable más baja, para de esta manera controlar selectivamente la generación de pulsos ópticos supercontinuos dentro del elemento óptico no lineal y su velocidad de repetición;
 un amplificador de fibra óptica (45) configurado para amplificar los pulsos modulados por el modulador (43),
 en donde la fibra óptica microestructurada (44) se acopla a la salida del amplificador (45) sin el uso de óptica de espacio libre.
- 15 2. Una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la fibra óptica microestructurada es una de una fibra de cristal fotónico altamente no lineal, una fibra de orificio lateral, una fibra de banda prohibida fotónica de núcleo hueco y una fibra de banda prohibida fotónica de núcleo sólido.
- 20 3. Una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde el láser óptico de bombeo comprende un láser de modo bloqueado o un oscilador de fibra de modo bloqueado.
4. Una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 3, en donde el elemento modulador óptico es como un modulador acústico-óptico, un modulador electro-óptico o un modulador de espejo de absorción de saturación de semiconductores (SESAM).
- 25 5. Una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 4, en donde la fuente comprende además un filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable (53,63) configurado para recibir un pulso óptico supercontinuo y para filtrar la longitud de onda del pulso a una longitud de onda predeterminada.
- 30 6. Una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con la reivindicación 5, en donde el filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable se configura para recibir una pluralidad de pulsos ópticos supercontinuos en un conjunto de pulsos y para filtrar la longitud de onda de cada pulso en una respectiva de una pluralidad correspondiente de longitudes de onda predeterminadas, para formar de esta manera un conjunto de pulsos ópticos de longitud de onda intercalada.
- 35 7. Una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con la reivindicación 6, en donde el filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable se configura para filtrar una pluralidad de tales conjuntos de pulsos en series para formar de esta manera un tren de pulsos ópticos de longitud de onda intercalada repetitivo.
- 40 8. Una fuente de pulsos ópticos de acuerdo con la reivindicación 6 o la reivindicación 7, en donde un único filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable se configura para realizar tanto el filtrado de longitud de onda como la selección de pulso
- 45 9. Un método para proporcionar pulsos ópticos, que comprende:
 generar pulsos ópticos de bombeo en un láser óptico de bombeo;
 controlar, en un modulador, el lanzamiento de los pulsos de bombeo en un elemento óptico no lineal que
 comprende una fibra óptica microestructurada, en donde el modulador se configura para disminuir y variar la
 velocidad de repetición de los pulsos ópticos de bombeo para de esta manera controlar selectivamente la velocidad
 50 de repetición de los pulsos ópticos supercontinuos generados dentro del elemento óptico no lineal,
 en donde la fibra óptica no lineal (44) se acopla a la salida de un amplificador de fibra óptica (45) sin el uso de óptica de espacio libre, el amplificador de fibra óptica (45) que se configura para amplificar los pulsos modulados por el modulador.
- 55 10. Un método de acuerdo con la reivindicación 9, que comprende además usar los pulsos ópticos supercontinuos generados para proporcionar iluminación en una aplicación en la que se miden los tiempos de vida de decaimiento.
11. Un método de acuerdo con la reivindicación 10, en donde la aplicación es la formación de imágenes de vida útil de fluorescencia.
- 60 12. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 9-11, que comprende recibir un pulso óptico supercontinuo generado en un filtro pasabanda óptico de longitud de onda sintonizable, y filtrar la longitud de onda del pulso óptico supercontinuo generado a una longitud de onda predeterminada.

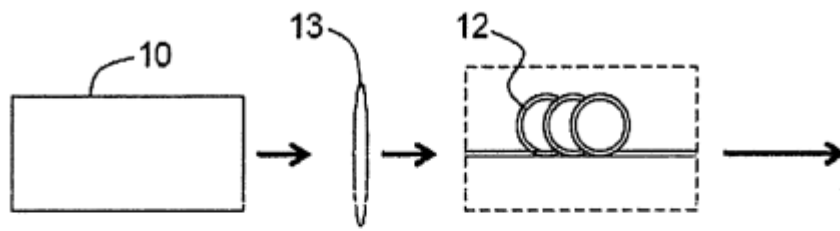


Fig. 1

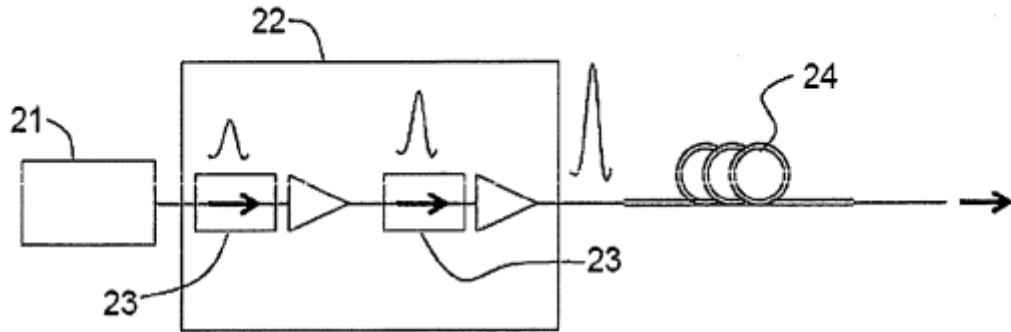


Fig. 2

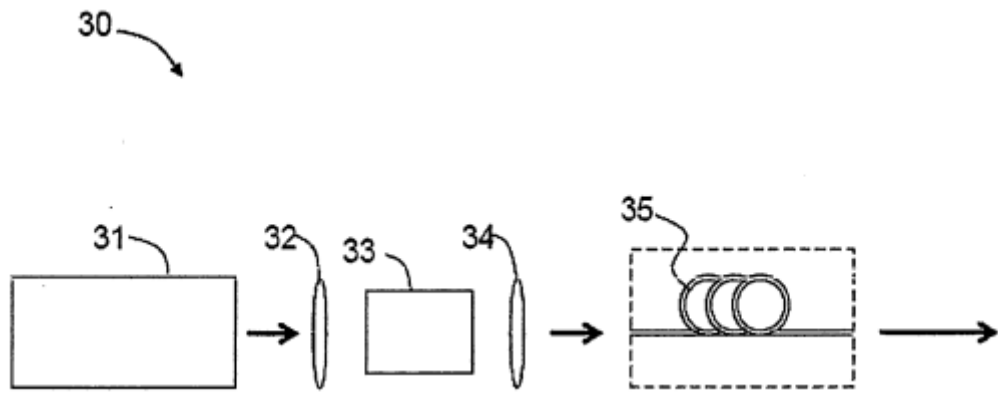


Fig. 3

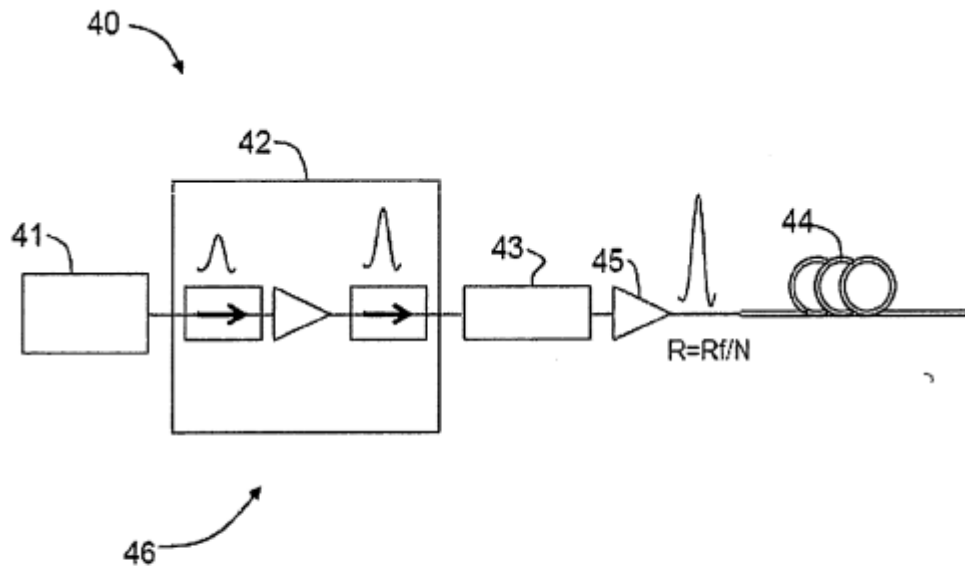


Fig. 4

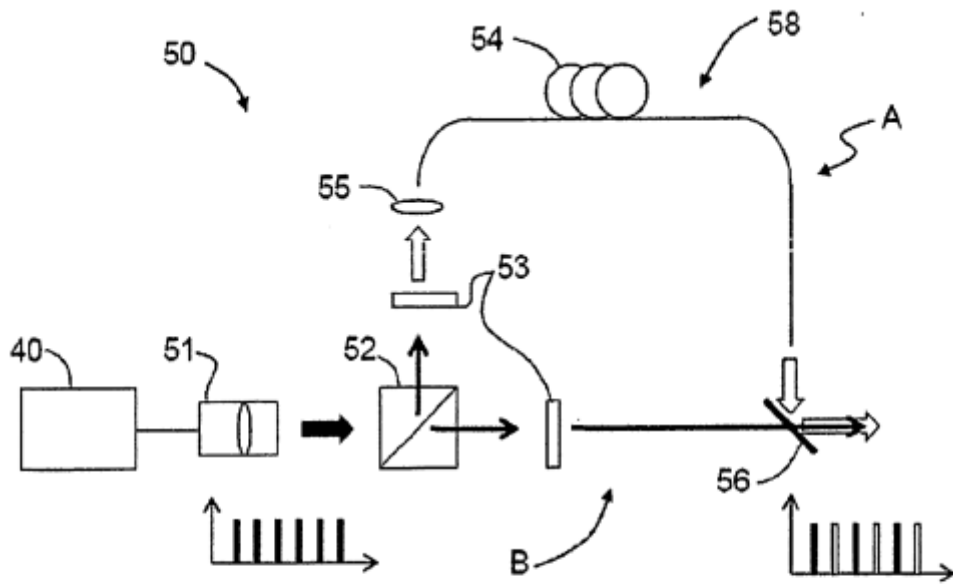


Fig. 5

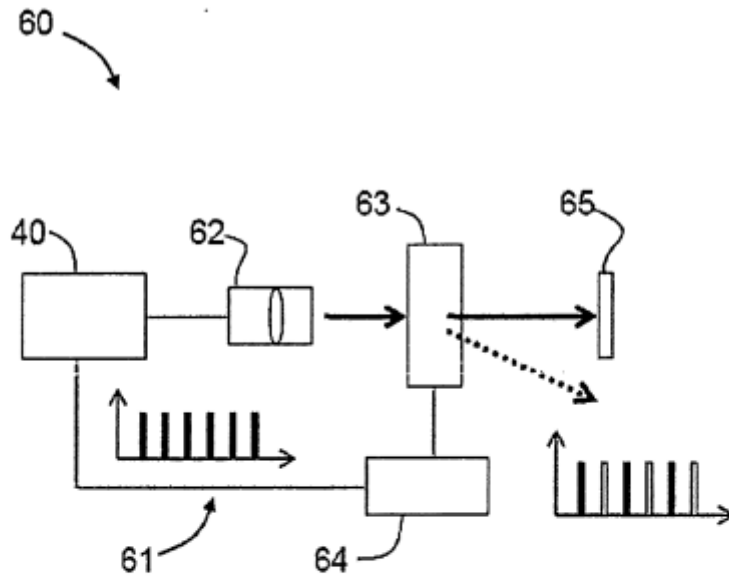


Fig. 6



Fig. 7

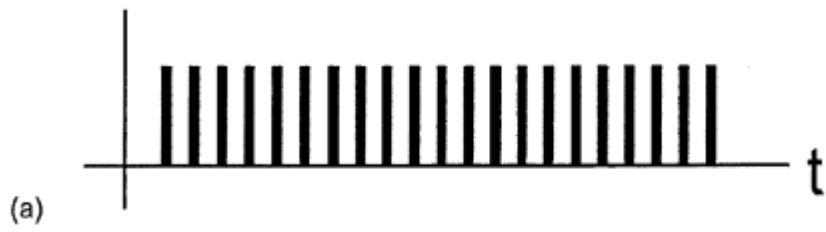


Fig. 8

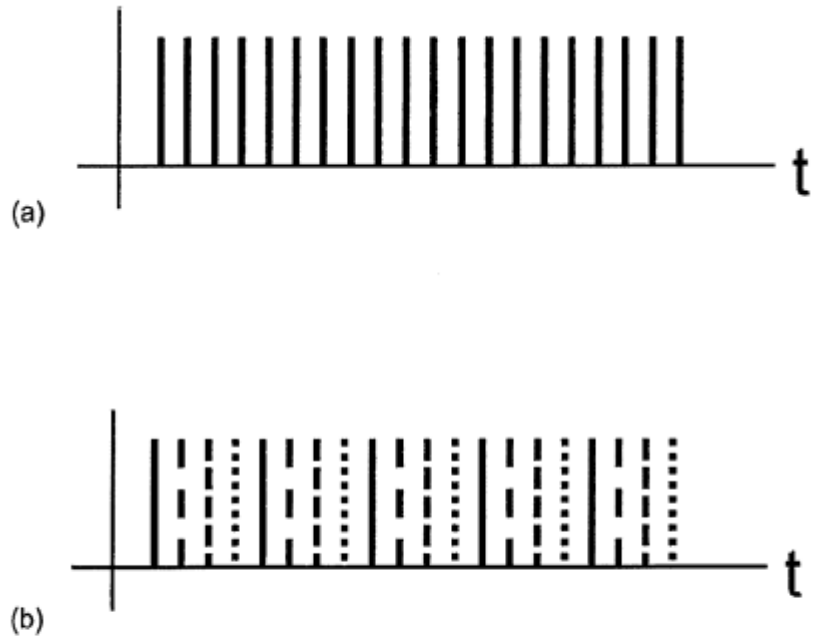


Fig. 9