



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 359 406**

51 Int. Cl.:
H01S 3/10 (2006.01)
G02F 1/35 (2006.01)
H01S 3/30 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04256709 .9**
96 Fecha de presentación : **29.10.2004**
97 Número de publicación de la solicitud: **1528644**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **04.05.2005**

54

Título: **Sistema de espejo de dispersión de Brillouin estimulada, sistema láser y procedimiento de amplificación.**

30

Prioridad: **30.10.2003 US 515747**
10.11.2003 US 518854
28.01.2004 US 766635

45

Fecha de publicación de la mención BOPI:
23.05.2011

45

Fecha de la publicación del folleto de la patente:
23.05.2011

73

Titular/es:
METAL IMPROVEMENT COMPANY, L.L.C.
80 Route 4 East, Suite 310
Paramus, New Jersey 07652, US
LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL SECURITY,
L.L.C.

72

Inventor/es: **Dane, C. Brent;**
Hackel, Lloyd A. y
Harris, Fritz B.

74

Agente: **Curell Aguilá, Marcelino**

ES 2 359 406 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

Sistema de espejo de dispersión de Brillouin estimulada, sistema láser y procedimiento de amplificación.

5 **Antecedentes de la invención****Campo de la invención**

10 La presente invención se refiere a un sistema de espejo de la dispersión de Brillouin estimulada, a un sistema láser y a un procedimiento de amplificación.

15 Las formas de realización de la presente invención se refieren a procedimientos en los que se utilizan sistemas láser de elevada potencia y sistemas de espejo para láseres de elevada potencia basados en la conjugación de fase de dispersión de Brillouin estimulada SBS, para utilizar dicho tipo de láseres en configuraciones de oscilador máster/amplificador de potencia, así como a procedimientos y sistemas de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser basados en el mismo efecto.

Descripción de la técnica relacionada

20 Los choques mecánicos para conformar metales y para mejorar las propiedades de su superficie se han realizado desde hace mucho tiempo. En la práctica industrial actual, el tratamiento de martilleo de las superficies metálicas se obtiene mediante granallado a velocidad elevada. Dicho tratamiento mejora las propiedades superficiales y lo que resulta esencial en muchas aplicaciones es que en parte se alcance una mejora significativa de la resistencia a fallos debidos a la fatiga y la corrosión. Una amplia gama de componentes se somete a endurecimiento por granallado en
25 las industrias de la automoción y la aeronáutica. Sin embargo, en muchas aplicaciones el endurecimiento por granallado no proporciona un tratamiento suficientemente intenso o profundo, o bien no es posible utilizarlo por su efecto perjudicial en el acabado de la superficie.

30 Al inventar el láser, se reconoció rápidamente que los choques intensos requeridos para el martilleo se podían efectuar mediante un plasma compactado accionado por láser. B. P. Fairand, *et al* "Laser Shot Induced Microstructural and Mechanical Property Changes in 7075 Aluminium", Journal of Applied Physics, Vol. 43, nº 9, página 3.893, septiembre de 1972. Típicamente, una colisión en el plasma comprendida entre 10 kB y 30 kB se genera en las superficies metálicas empleando láseres de elevada densidad de energía (unos 200 J/cm²) y con impulsos de duración corta (aproximadamente 30 nanosegundos). Una capa delgada de tira metálica, pintura negra u otro material absorbente en la superficie metálica impide la ablación del metal. Un material de confinamiento o apisonado (por compactación), por ejemplo agua, cubre la capa superficial y proporciona un choque de mayor intensidad. Se ha puesto de manifiesto que dichos choques provocan unas tensiones de compresión más profundas e intensas, en relación con el endurecimiento por granallado estándar. En los ensayos, se ha apreciado que dicho tratamiento es mejor para reforzar los componentes ante fallos debido a la fatiga y a la corrosión. Sin embargo, los
40 láseres de elevada energía y suficiente velocidad de repetición a fin de obtener el rendimiento productivo requerido a un coste razonable se obtienen con dificultad.

45 Un sistema láser que se ha utilizado con este propósito se describe en la patente anterior US nº 5.239.408, titulada "HIGH POWER, HIGH BEAM QUALITY REGENERATIVE AMPLIFIER" del mismo solicitante. El sistema láser descrito en la patente US nº nº 5.239.408 que acaba de mencionarse comprende un amplificador de elevada potencia en configuración MOPA (oscilador máster/amplificador de potencia), que puede producir impulsos a la salida de un valor superior a 20 joules y cuya anchura comprende entre 20 y 30 nanosegundos o menos, empleando una configuración de corrección del frente de ondas basada en un sistema de espejo/conjugador de fase de dispersión de Brillouin estimulada SBS. La patente '408 hace referencia a la patente US nº 5.022.033, titulada "RING LASER HAVING AN OUTPUT AT A SINGLE FREQUENCY", como una ejecución de un oscilador máster. La geometría del oscilador descrita en la patente US nº 5.022.033 produce impulsos de energía muy baja y por lo tanto se requieren muchas más etapas de amplificación que con el sistema amplificador descrito en la patente US nº nº 5.239.408. En algunas aplicaciones, el oscilador máster utilizado en el sistema de la patente US nº nº 5.239.408 era un oscilador de onda estacionaria (resonador lineal de 2 espejos) con un acoplador de salida basado en un etalón.
50 Una configuración adicional de oscilador máster se describe en nuestra solicitud de patente en trámite US nº 10/696.989, presentada el 30 de octubre de 2003, titulada "SELF-SEEDED SINGLE-FREQUENCY SOLID-STATE RING LASER, AND SINGLE-FREQUENCY LASER PEENING METHOD AND SYSTEM USING SAME".

60 Un sistema láser de elevada potencia como el definido en la patente US nº nº 5.239.408 y en la patente US nº 5.689.363 "LONG-PULSE-WIDTH NARROW-BANDWIDTH SOLID STATE-LASER", utiliza un telescopio de retransmisión para retransmitir imágenes del haz desde el extremo de inyección del sistema al extremo del amplificador y de vuelta. Durante el proceso de amplificación, el haz atraviesa el telescopio de retransmisión, atraviesa un amplificador, atraviesa de vuelta dicho telescopio de retransmisión y a continuación se desvía con una rotación de su polarización seguido de la reflexión o de la transmisión, por un elemento polarizador. Durante el proceso de división de la polarización, el haz no se separa totalmente debido a que la rotación de la polarización no se completa al 100% y debido a un valor inferior del 100% de separación (contraste) realizada por el polarizador. La
65

parte no separada del haz continúa atravesando el telescopio de retransmisión y se reamplifica, de manera que, a menudo, se obtiene potencia suficiente para que pueda ser perjudicial en cualquier punto del sistema óptico. Los reflejos parásitos o "fantasma" se pueden asimismo amplificar, por lo que es necesario separarlos del haz principal. Se necesita algún tipo de ajuste de las piezas a fin de obtener un sistema alineado, por lo tanto amplificándose y propagándose los haces de elevada potencia requeridos, quedando eliminados los haces no pretendidos.

Los presentes inventores han demostrado que es muy importante disponer una imagen retransmitida de la abertura de distorsión del amplificador a la entrada del espejo de fase conjugada SBS. De este modo, se evita que la propagación óptica libre del haz distorsionado, que puede causar aberraciones de fase introducidas por la amplificación, se convierta en heterogeneidades en el perfil espacial (distribución de radiación) del haz. Se trata de un factor crítico, puesto que un conjugador de fase SBS invierte muy eficazmente el frente de ondas óptico de un haz de entrada, pero a menudo no reproduce el perfil de radiación con elevada fidelidad. Por este motivo, es posible que los errores en el frente de onda que se convierten en errores de la distribución de radiación no se corrijan adecuadamente. En el sistema de imagen retransmitida, los errores del frente de ondas se transportan con precisión al conjugador de fase SBS. Las irregularidades introducidas por una reproducción imperfecta de la radiación en el espejo no lineal quedan entonces minimizadas en las pasadas finales por el amplificador, debido a la saturación de la ganancia en dicho(s) amplificador(es).

Sin embargo, el sistema amplificador multipaso puede generar haces débiles "fantasma" sin pretenderlo, que resultan de pequeñas deficiencias en el control de la polarización empleada para conmutar el camino del haz. El tren óptico de amplificación se diseña de modo que dichos haces débiles "fantasma" se emitan con ángulos ligeramente distintos respecto al haz principal, de modo que teóricamente no deberían interferir con el conjugador de fase SBS del haz principal mucho más potente. Sin embargo, cuando el espejo SBS se hace funcionar a energía muy elevada, bastante superior a su umbral, dichos haces débiles podrían entrar en la celda y, aún estando sin ayuda debajo de su umbral, podrían reflejarse eficazmente en el espejo SBS en una interacción no lineal de mezcla de cuatro ondas con los haces principales de entrada y salida. En este caso, dichos haces podrían ocasionar daños a los componentes ópticos del sistema a lo largo de su propagación en el interior del amplificador.

Un láser de fase conjugada SBS en configuración MOPA presenta unas características de alineación muy resistentes, puesto que la aberración más reducida que se corrige mediante el espejo de fase conjugada está inclinada. Esto significa que sistema láser es muy tolerante a pequeñas desviaciones de la alineación precisa de los componentes ópticos, sin ocasionar una pérdida de potencia de salida o tener que reapuntar la salida del láser. Sin embargo, la transmisión del haz, propagándose en la dirección de avance, al espejo SBS se debe efectuar con un cierto grado de precisión. Los sistemas de la técnica anterior requieren tareas periódicas de control y ajuste de la alineación que deben realizar científicos muy experimentados. Por lo tanto, se requieren herramientas para la simplificación de la alineación del sistema.

Un factor importante en el funcionamiento de un láser de estado sólido de potencia media elevada y energía por impulso elevada, es prevenir la posibilidad de que el amplificador sufra daños ópticos internos debido a un enfoque automático no lineal del haz amplificado en el medio SBS, que puede ocurrir por el hecho de que la presencia de una radiación óptica elevada en el interior del medio de ganancia óptico puede causar variaciones pequeñas del índice de refracción real, un efecto debido al cambio en el índice refracción no lineal del material. Dado que dicha variación del índice presenta una cierta correlación con las pequeñas variaciones de la distribución de radiación del haz, sería posible que dichas variaciones de radiación crecieran hasta que el perfil del haz se descompusiera en filamentos muy pequeños y muy intensos, que podrían dañar el medio de ganancia. Este proceso se denomina enfoque automático no lineal y puede ocasionar limitaciones muy importantes en la máxima potencia de pico y en la máxima energía por impulso disponibles en un láser de estado sólido.

Para una aplicación basada en un tratamiento con láser, por ejemplo, un procedimiento de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser o un conformado por martilleo láser, es importante que la duración de los impulsos láser sea correcta, que depende del tipo y espesor del material que debe tratarse. En los sistemas láser de elevada potencia e impulsos de corta duración que se requieren para dichas aplicaciones, el control de la duración de los impulsos es una tarea difícil, por lo que en estos sistemas sería conveniente obtener técnicas para el control de la duración de los impulsos.

En una aplicación basada en un procedimiento de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser y en aplicaciones adicionales de láser de elevada potencia para mecanizar piezas de trabajo, se enfoca un láser pulsado a un objetivo para su mecanización. Las superficies objetivo frecuentemente comprenden superficies de reflexión, por ejemplo cintas metálicas empleadas en aplicaciones basadas en tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser. En el tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser, la energía láser incidente descompone la superficie objetivo y rápidamente forma un plasma a elevada temperatura, que cuando está totalmente creado, comprende un cuerpo negro altamente absorbente. Sin embargo, durante la parte inicial temporal del impulso, la superficie objetivo es reflectante y si la perpendicular de su superficie está orientada hacia atrás a lo largo del eje óptico del láser, podría reflejarse hacia atrás, hacia el láser, una parte relevante de energía del haz. Dicha luz reflejada podría dañar la óptica láser si pudiera propagarse suficientemente hacia atrás a lo largo del eje. El haz láser se enfoca habitualmente hacia la superficie objetivo mediante un conjunto de lentes empleadas como

5 óptica de transmisión para el objetivo, tal como se describe en la patente US nº 6.198.069, titulada "LASER BEAM
 TEMPORAL AND SPATIAL TAILORING FOR LASER SHOCK PROCESSING". Si la superficie objetivo se dispusiera
 de modo preciso en el foco de las lentes de la óptica de transmisión para el objetivo, el haz reflejado volvería con las
 características de focalización exactamente invertidas y coincidiría con las dimensiones del haz entrante en su
 propagación de retorno a lo largo de la trayectoria del haz. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el objetivo se
 dispone antes de que el haz alcance el foco para generar la densidad de energía láser requerida en el tamaño de
 punto pretendido. En esta situación, la característica de propagación del haz reflejado es distinta a la del haz
 entrante, lo que puede causar que el haz reflejado enfoque en puntos no pretendidos en el tren del haz óptico, tal
 como en las superficies de los componentes ópticos críticos, por ejemplo lentes y espejos. Esto puede ocasionar un
 10 daño permanente en estos componentes críticos en el tren del haz óptico. Asimismo, la forma y curvatura localmente
 del objetivo puede ser un factor a añadir a las características de focalización del haz reflejado, lo que puede resultar
 en puntos calientes inesperados en el haz reflejado. Finalmente, en el tratamiento superficial por ondas de choque
 generadas por láser, se emplea una capa líquida transparente (como agua) que fluye sobre la superficie a tratar. La
 existencia de pequeñas ondulaciones e irregularidades en la superficie del agua puede asimismo ocasionar la
 15 distorsión del haz reflejado y unas características de focalización inesperadas. Se necesitan unos medios para
 reducir significativamente la energía del láser que se refleja desde el objetivo a fin de evitar daños.

Jackel (Applied Optics, vol. 42, nº 6, 20 de febrero del 2003, páginas 983 a 989) presenta una comparación entre
 20 óptica adaptativa y espejos de fase conjugada para la corrección de aberraciones en amplificadores de doble paso.

Sumario de la invención

Los aspectos particulares y preferidos de la presente invención se exponen en las reivindicaciones adjuntas.

25 Las formas de realización de la presente invención proporcionan un sistema de espejo/conjugador de fase de
 elevada potencia SBS, tal como se describe en la reivindicación 1. Su sistema y componentes resultan
 particularmente útiles en sistemas de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser, aunque
 existen muchas aplicaciones adicionales en sistemas láser de elevada potencia.

30 El sistema de espejo SBS está adaptado para recibir impulsos cuyo valor por impulso sea superior a dos joules y
 cuya anchura sea inferior a 1 microsegundo. En algunas formas de realización, el valor por impulso de los impulsos
 de entrada es superior a dos joules y su anchura inferior a 30 nanosegundos, por ejemplo una anchura
 aproximadamente de 24 a 25 nanosegundos.

35 Los impulsos de entrada se reflejan de vuelta con anchura de impulso ajustable en algunas formas de realización, tal
 como se describe posteriormente.

40 El sistema de espejo SBS de una forma de realización comprende un medio SBS en el que existe un compuesto que
 presenta un índice de refracción no lineal negativo, de valor absoluto inferior a 1×10^{-12} esu, por ejemplo un
 compuesto de perfluoro. En algunas formas de realización, el sistema de espejo SBS comprende unas celdas SBS
 adaptadas para filtración *in situ* del medio SBS. Por ejemplo, en la primera y segunda celdas SBS se pueden instalar
 una bomba y un filtro que se utilice para la filtración del medio SBS. El filtro presenta un tamaño de poro
 aproximadamente de 0,1 micrones o inferior, para eliminar partículas del medio SBS que puedan causar problemas
 para las elevadas energías existentes en unas formas de realización según la presente invención.

45 Un telescopio de retransmisión SBS con su foco se puede disponer entre una ubicación seleccionada en el sistema
 láser y el sistema de espejo SBS, de modo que retransmita imágenes de la salida del medio de ganancia entre una
 localización de la imagen en la línea del haz y una localización de la imagen cerca de la entrada del sistema de
 espejo SBS. Un deflector dispuesto en el foco del telescopio corta el paso de los haces que presentan un cierto
 50 ángulo. Se puede disponer un divisor de haces entre el sistema de espejo SBS y el telescopio de retransmisión SBS,
 que dirige una pequeña parte del haz por una trayectoria alternativa con una trayectoria foco alternativa. Se dispone
 un detector de alineación en el punto focal de trayectoria alternativo que sirve de referencia de alineación para el
 sistema láser.

55 Las formas de realización según la presente invención comprenden un sistema de espejos SBS provisto de dos
 celdas SBS. Una primera celda SBS se adapta para recibir una entrada colimada. Una segunda celda SBS se
 adapta para enfocar el haz en el interior del medio SBS. En la presente invención, se dispone un atenuador ajustable
 entre la celda SBS colimada y la celda SBS enfocada, de modo que se pueda ajustar la anchura del impulso del haz
 reflejado.

60 En una forma de realización del procedimiento se realiza el control de la anchura del impulso de salida del frente de
 ondas corregido controlando un valor umbral del sistema conjugador de fase SBS. En una forma de realización del
 procedimiento, se emplea un medio SBS con un índice de refracción no lineal de valor reducido, que se ha filtrado *in*
situ para eliminar partículas. En una forma de realización del procedimiento, se efectúa la alineación del anillo
 65 amplificador empleando una referencia de alineación en el sistema conjugador de fase SBS. En una forma de
 realización del procedimiento, se retransmite una imagen del impulso de salida del frente de ondas corregido,

mediante un telescopio de retransmisión en el exterior de la cavidad y disponiendo un deflector en su punto focal, hacia la óptica de transmisión para el objetivo, que a su vez transmite el pulso de salida a la pieza de trabajo objetivo.

5 En las reivindicaciones independientes y subordinadas adjuntas se exponen aspectos particulares y preferidos según la presente invención. Unas características de las reivindicaciones subordinadas se pueden combinar con unas características de las reivindicaciones independientes, tal como sea apropiado y en combinaciones distintas a las descritas explícitamente en las reivindicaciones.

10 **Breve descripción de los dibujos**

La presente invención se describe con mayor detalle, únicamente a título de ejemplo, haciendo referencia a unas formas de realización preferidas, tal como se ilustra en los dibujos adjuntos.

15 La figura 1 representa un diagrama esquemático de un sistema láser oscilador máster/amplificador de potencia según una forma de realización según la presente invención.

La figura 2 representa un diagrama esquemático de un sistema de espejos SBS según unas formas de realización según la presente invención.

20 La figura 3 ilustra un telescopio de retransmisión intracavidad, provisto de deflector en montaje cinemático según unas formas de realización según la presente invención, y apto para utilizarse con el sistema láser de la figura 1.

25 La figura 4 ilustra el telescopio de retransmisión de la figura 3, en el que el deflector en montaje cinemático presenta forma cónica, según unas formas de realización según la presente invención, y apto para utilizarse con el sistema láser de la figura 1.

La figura 5 representa una perspectiva de un deflector cónico provisto de un canal ópticamente transparente conforme a unas formas de realización según la presente invención.

30 Las figuras 6 y 7 ilustran unas vistas en sección transversal de un deflector cónico, en las que las líneas del haz representan haces propagados y bloqueados, respectivamente.

35 La figura 8 representa un diagrama simplificado de un telescopio de retransmisión, dispuesto entre un sistema láser y una óptica de transmisión para el objetivo y provisto de un deflector, conforme a unas formas de realización según la presente invención.

La figura 9 ilustra aspectos de un telescopio de retransmisión según unas formas de realización según la presente invención.

40 La figura 10 representa un diagrama esquemático de un sistema de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser, conforme a unas formas de realización según la presente invención.

45 **Descripción detallada**

Se proporciona una descripción detallada de los ejemplos de formas de realización de la presente invención haciendo referencia a las figuras 1 a 10.

50 En la figura 1, se representa la arquitectura básica de la configuración oscilador máster/amplificador de potencia con un amplificador láser con regeneración, con un sistema de espejo conjugador de fase SBS y un telescopio de retransmisión provisto de un deflector. La forma de realización de la figura 1 es una versión perfeccionada de un amplificador similar descrito en la patente US nº 5.239.408. El sistema amplificador de la figura 1 comprende un rotador 140, por ejemplo, una célula Pockels o un rotador Faraday, un primer telescopio de retransmisión intracavidad 120, un medio activo en forma de placa 150, un segundo telescopio de retransmisión intracavidad 170 y un sistema de espejos/conjugador de fase SBS 160. La placa 150 está delimitada por una cavidad de bombeo (no se representa). Se disponen asimismo dos polarizadores 102 y 106 para capturar un impulso de entrada y extraer un impulso de salida, respectivamente. Se disponen siete espejos planos altamente reflectantes 111, 112, 113, 114, 115, 116 y 117, que definen una trayectoria óptica a través de la placa 150, un telescopio 120, un polarizador 106 y un telescopio 170 que conecta el anillo al conjugador de fase SBS 160. Un telescopio de retransmisión adicional 180 retransmite imágenes desde un punto cerca de la salida en el polarizador 160 del amplificador anular hacia la óptica de transmisión para el objetivo, no representada.

60 Durante el funcionamiento, un oscilador máster 100 proporciona un impulso de entrada que presenta polarización S. El impulso se refleja en el polarizador 102, avanzando a través de una célula Pockels de aislamiento 140 sin cambiar de polarización, y luego se refleja en el polarizador 106 guiándose por una trayectoria óptica anular definida por los

espejos 111 a 117, viajando por este anillo en el sentido contrario a las agujas del reloj y alejándose del polarizador 106.

5 En el anillo, el haz penetra en el rotador de 90 grados 108, que gira el haz 90° para que presente la polarización P. El impulso avanza a través de los espejos 111 y 112 a lo largo de la trayectoria óptica 119 y atraviesa el telescopio de retransmisión 120.

10 El telescopio 120 comprende una cámara de vacío 122 provista de una primera lente 124 montada con una junta estanca al vacío 126, y una segunda lente 128 montada con una junta estanca al vacío 130. Un deflector 129 dispuesto en el foco del telescopio en el interior de la cámara de vacío 122 corta el paso de todos los haces que presentan un cierto ángulo y de las reflexiones "fantasma".

15 Desde el telescopio 120, el haz avanza a través del espejo 113 y atraviesa la placa 150, reflejándose luego en los espejos 114 y 115 de vuelta a través de dicha placa 150. Se alcanza un factor de llenado cercano a la unidad del volumen bombeado mediante una primera pasada en zigzag y una segunda pasada en zigzag, que esencialmente son imágenes especulares en la dirección de propagación. Procediendo de este modo, en la segunda pasada en zigzag se tiende a obtener ganancia de las zonas que puedan haberse omitido en la primera pasada.

20 Desde la placa 150, reflejándose en el espejo 116, el haz se propaga por la trayectoria 142 a través del telescopio 120, y se refleja en el espejo 117, volviendo al polarizador 106. Dado que previamente el rotador 108 ha girado 90 grados la polarización del haz, pasando de la polarización S a la polarización P, el polarizador 106 transmite el haz con polarización P al rotador de 90 grados 108 para la propagación una segunda vez a través del anillo en el sentido contrario a las agujas del reloj. Sin embargo, durante esta segunda pasada por el anillo, el rotador de 90 grados 108 gira la polarización de nuevo en 90° a polarización S. Por este motivo, cuando el haz alcanza el polarizador 106 al final de la segunda pasada por el anillo, se reflejará hacia el conjugador de fase SBS 160, atravesando el segundo telescopio de retransmisión intracavidad 170.

30 El haz de vuelta procedente del conjugador de fase SBS, que aún presenta polarización S, aunque error de fase invertido, se reflejará en el polarizador 106 en el sentido de las agujas del reloj hacia el espejo 117, desde donde se propagará a lo largo de la trayectoria 142 atravesando el telescopio 120 hacia el espejo 116. Desde el espejo 116, el haz viajará a través de la placa 150 una primera vez y se reflejará de vuelta en los espejos 114 y 115, atravesando dicha placa 150 una segunda vez. Al salir de dicha placa 150, el haz se reflejará en el espejo 113 y viajará de vuelta a través del telescopio 120 y de los espejos 112 y 111 hacia el rotador de 90 grados 108. Dicho rotador de 90 grados 108 volverá a girar la polarización del haz 90°, de nuevo a la polarización P, y transmitirá el haz al polarizador 106, y este modo completándose una tercera pasada por el anillo, aunque esta vez en la dirección contraria a las dos primeras pasadas.

40 Dado que el haz presenta una polarización P, atravesará el polarizador 106 y se propagará en el sentido de las agujas del reloj por el anillo una cuarta vez, o lo que es lo mismo, una segunda vez en sentido contrario. Al final de esta cuarta pasada por el anillo, el rotador de 90 grados girará la polarización del haz, que volverá a ser polarización S, causando que el haz se refleje en el polarizador 106 y salga del anillo propagándose hacia la celda Pockels de aislamiento 140. En este punto, el error de fase acumulado en la red es sustancialmente cero, proporcionándose un impulso de salida con el frente de ondas corregido. La celda Pockels de aislamiento 140 o el rotador Faraday rota la polarización del haz, pasando ser polarización P, lo que permite al haz atravesar el polarizador 102 como impulso de salida de elevada energía.

50 Por lo tanto, un haz que atraviese el amplificador ilustrado en la figura 1 presentará una difracción reducida, minimizándose la probabilidad de perturbaciones de pico elevado, para ello empleándose dos trayectorias por el anillo antes de entrar en el conjugador de fase de fase, y dos trayectorias iguales y opuestas por el anillo tras salir de dicho conjugador de fase. En el anillo, por otra parte, se dispone un rotador de polarización pasivo en lugar de una celda Pockels. Adicionalmente, todos los componentes ópticos se disponen en la proximidad de los planos de la imagen mediante telescopios de retransmisión (dos trayectorias a través del primer telescopio intracavidad 120 y del segundo telescopio intracavidad 170). Asimismo, el amplificador presenta una mayor relación ganancia-pérdidas, considerando que existen dos pasadas por la placa en las que existe ganancia en cada viaje por anillo. El conjugador de fase SBS actúa como un sistema de espejos y reduce las aberraciones de fase del haz. En unas formas de realización de la presente invención, el conjugador de fase/sistema de espejo SBS 160 comprende elementos para el control de la anchura del impulso, empleados como una referencia de alineación para la trayectoria óptica por el anillo y que limitan el enfoque automático y otras aberraciones inducidas por el medio SBS.

60 En una forma de realización preferida, el oscilador máster de una sola frecuencia 100 de la figura 1 comprende un oscilador de impulsos de relajamiento inyectado con una fuente láser, que proporciona una única frecuencia consistente, una amplitud correcta y una buena estabilidad temporal, con impulsos de perfil representativo de altura superior a 1,2 megavatios y de anchura de impulsos de aproximadamente de 24 nanosegundos de anchura a la mitad del máximo. Tal como se menciona anteriormente, se pueden utilizar otras formas de realización del oscilador máster. Una forma de realización del oscilador de impulsos de relajamiento inyectado con una fuente láser (*seed laser*) se describe en nuestra patente en trámite, titulada "Self-seeded Single-Frequency Solid-State Ring Laser, and

Single-Frequency Laser Peening Method and System Using Same", solicitud US nº 10/696.989, presentada el 30 de octubre de 2003. En una forma de realización, dicho oscilador de impulsos de relajamiento comprende un resonador láser provisto de un acoplador de salida y de varios reflectores adicionales que definen un anillo óptico, disponiendo preferentemente un número total impar de reflectores, incluido el acoplador de salida. En el resonador se dispone un elemento de conmutación de Q y un medio de ganancia. Se acopla un detector al resonador a fin de detectar energía de oscilación en dicho resonador. Se acopla un controlador a una fuente de energía del medio de ganancia, al elemento de conmutación de Q, y a un detector. A medida que la ganancia va creciendo gracias al suministro de energía de bombeo, un componente del resonador induce pérdidas, de modo que finalmente se alcanza una relación ganancia-pérdidas suficiente para producir un impulso de oscilación de relajamiento. Al detectarse el comienzo del impulso de relajamiento, el controlador reduce las pérdidas mediante el elemento de conmutación en Q, de modo que se genera un impulso de salida de una sola frecuencia. Un conjunto de etalones dispuestos en el resonador limita la oscilación en la cavidad a un único modo longitudinal durante el inicio del impulso de oscilación de relajamiento. Asimismo, se dispone en el resonador láser un diafragma de limitación de modos transversales.

En la figura 2, se representa un diagrama esquemático del espejo conjugador de fase SBS de dos celdas con control espacial y temporal (téngase en cuenta que en el diseño de la figura 2, el haz incide desde la parte derecha, y no desde la izquierda tal como se representa en la figura 1). Tras efectuar la mitad de las pasadas por el(los) amplificador(es) láser, el haz penetra en este sistema desde la derecha. A continuación, atraviesa el telescopio de retransmisión 200, de forma esférica o cilíndrica. Dicho telescopio de retransmisión 200 comprende dos lentes 201, 202 separadas por la suma de sus distancias focales respectivas. La zona focal del telescopio de retransmisión se dispone en el vacío a fin de prevenir la ionización óptica del aire. Un reflector óptico 203, que comprende una abertura (o bien una rendija en el caso de un telescopio cilíndrico) se dispone en el vacío en el foco a fin de impedir que los haces "fantasma" parásitos propagándose con ángulos ligeramente distintos puedan entrar en el sistema SBS. En la forma de realización representada en la figura 2, el telescopio de retransmisión 200 comprende un cilindro de vacío 204, provisto de una ventana plana de recubrimiento antirreflectante 205 en un extremo orientada hacia la lente 201 y en el otro extremo orientada hacia la lente 202. Se dispone una lumbrera de vacío 206 para mantener el vacío en el interior del cilindro. Se monta un deflector 203 en la proximidad del punto focal del telescopio en el cilindro de vacío 204. En una forma de realización, las lentes de retransmisión son lentes cilíndricas de 120 centímetros y 15 centímetros de distancia focal, respectivamente, realizadas en sílice fundida, con recubrimiento A/R (antirreflectante) (>99,5% de transmisión) en ambas caras, con una cuña óptica de 1,5 grados. La ventana A/R 205 de la celda de vacío está realizada en sílice fundida, y presenta recubrimiento A/R en ambas caras. La anchura de la rendija del deflector de retransmisión es de 2 mm y está realizada en sílice fundida o Macor (cerámica mecanizada). En sistemas alternativos, es posible emplear un deflector cónico.

El deflector 203 en el foco comprende una abertura que permite únicamente el paso de la extensión angular del haz principal y bloquea las componentes angulares asociadas con los haces "fantasma". En el caso de un amplificador zigzag, es posible que las distorsiones ópticas fundamentales únicamente existan en un eje del haz (por ejemplo, el vertical o el horizontal). En ese caso, el telescopio de retransmisión SBS puede utilizar lentes cilíndricas para retransmitir únicamente la dimensión del haz que sufre distorsiones y en este caso, en lugar de una abertura, el deflector puede tratarse de una rendija.

A continuación del telescopio de retransmisión se dispone un divisor de haces 207, que refleja < 1% del haz incidente hacia un sistema de diagnóstico de alineación que proporciona una referencia de alineación para el sistema láser. El sistema de diagnóstico de alineación comprende una videocámara CCD 208 (u otro diseño electrónico), que se dispone exactamente en el foco de una lente 209. El espejo 210 se emplea para dirigir la muestra del haz incidente, desviada por el divisor de haces 207, hacia la lente 209 y la cámara 208. Controlando la posición del foco en la cámara, es posible controlar de modo preciso el ángulo de alineación del haz a través del sistema amplificador óptico y se puede ajustar como se requiera.

El sistema SBS comprende una celda colimada 212 y una celda enfocada 213. La primera celda colimada SBS comprende un cilindro con un medio SBS, y presenta una primera y una segunda ventanas con recubrimiento A/R 214, 215 dispuestas en extremos opuestos y a través de los cuales se propagan los haces de entrada y salida. Únicamente se recubren ópticamente las superficies externas, puesto que se emplea un medio SBS que proporciona un buen ajuste de los índices de refracción entre las ventanas de sílice fundida y el medio SBS, de modo que sea suficiente para reducir las reflexiones procedentes de las superficies interiores a un nivel bajo aceptable. Un divisor de haces 216 se dispone entre ambas celdas SBS 212 y 213. El mismo presenta una reflectividad aproximada del 50% para un ángulo de incidencia de 45 grados. Sin embargo, es posible variar su reflectividad en un amplio intervalo ($\pm 30\%$) girándolo aproximadamente $\pm 20^\circ$. La segunda celda líquida SBS 213 emplea una lente convergente 217 como ventana de entrada y, del mismo modo que en la ventana de la primera celda, únicamente la superficie externa está recubierta ópticamente. El extremo de salida de la celda enfocada se dota de otra ventana con recubrimiento A/R 218, a través de la cual pasa la cantidad pequeña de luz no reflejada. Se emplean elementos de absorción del haz 219, 220 (placas metálicas sencillas) a fin de bloquear la parte del haz de entrada que se refleja en el divisor de haces de control la anchura del impulso y la luz no reflejada que se transmite a través de la segunda celda 213.

En un sistema preferido, en serie con la primera y segunda celdas SBS 212, 213 se monta una bomba 230 y un filtro 231. En sistemas alternativos, es posible instalar independientemente la primera y segunda celdas SBS. En una forma de realización, el filtro presenta un tamaño de poro aproximadamente de 0,1 micrones. Mykrolis Corporation of Billerica, Massachusetts, comercializa dicho tipo de filtros, entre los que se encuentra por ejemplo el filtro desechable Fluoriline SL-3. La bomba y el filtro se adaptan para el filtrado *in situ* del medio SBS, a fin de eliminar del medio partículas cuyo tamaño sea superior a aproximadamente 0,1 micrones. El medio se puede filtrar tal como se requiera, aunque es preferible el filtrado *in situ* por lo menos una vez tras el llenado de las celdas.

En una forma de realización preferida del sistema de espejo SBS para un sistema comercial de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser, la descripción detallada de los componentes se indica a continuación:

- Divisor de haces para la alineación 214: sílice fundida, recubrimiento A/R en ambas caras, cuña óptica de 1,5 grados.
- Espejo de alineación 210: recubrimiento de elevada reflectividad (>99,5% de reflexión)
- Lente de diagnóstico de alineación 209: sílice fundida, distancia focal 50 cm, recubrimiento A/R en ambas caras.
- Cámara de diagnóstico de alineación: sensor de vídeo CCD 4x3 mm.
- Celdas SBS: construcción enteramente de vidrio y PTFE (Teflón)
- Ventanas antirreflectantes 207, 215, 218 en las celdas SBS: sílice fundida, recubrimiento A/R en las superficies exteriores, sin cuña.
- Divisor de haces regulable 216: sílice fundida, recubrimiento A/R en una cara, 50% de reflexión en la otra, reflectividad ajustable $\pm 30\%$ variando el ángulo.
- Lente convergente SBS 217: sílice fundida, distancia focal 15 cm, recubrimiento A/R en la superficie exterior (convexa).
- Elementos de absorción del haz 219, 220: placas de aluminio mecanizadas en bruto.

El medio SBS comprende un material, como un compuesto de perfluoro, preferentemente un líquido perfluorado, cuyo índice de refracción no lineal es inferior a aproximadamente 1×10^{-12} esu. Los compuestos de perfluoro están disponibles comercialmente con el nombre de marca Fluorinert, de 3M Specialty Materials, St. Paul, Minnesota. Entre los materiales Fluorinert más representativos se encuentran el FC-72, FC-75 y el FC-77. El FC-72 es preferible para aplicaciones de elevada potencia, y presenta una ganancia no lineal aproximadamente de 6,2 GW/cm, un desplazamiento de frecuencia Brillouin aproximadamente de 1,24 GHz, un umbral de energía aproximadamente de 2,5 mJ (siendo la duración del impulso aproximadamente de 18 nanosegundos), un índice de refracción no lineal aproximadamente de $-4,7 \times 10^{-13}$ esu, un ancho de banda frecuencial aproximadamente de 330 MHz y una constante del tiempo aproximadamente de 0,95 nanosegundos. El material funciona de modo fiable con energías de impulso muy elevadas, por ejemplo energías de impulso superiores de 2 joules por impulso en el medio SBS, con anchuras de impulso aproximadamente de 18 nanosegundos. En otras formas de realización se puede utilizar un medio SBS de estado sólido, por ejemplo sílice fundida.

En funcionamiento, la luz láser incidente que se enfoca en la segunda celda 213 (viajando de derecha a izquierda en el gráfico) alcanza un nivel de potencia suficientemente elevado a fin de sobrepasar el umbral no lineal SBS. En este punto, la luz empieza a reflejarse en la celda enfocada 213 y se propaga en sentido opuesto (de izquierda a derecha) hacia la luz incidente. Cuando atraviesa la primera celda SBS colimada 212, interactúa con el haz incidente de modo que provoca que una parte significativa de dicho haz incidente vuelva (se refleje) en esa celda. La luz reflejada del espejo/conjugador de fase SBS (cuya longitud de onda se ha desplazado ligeramente) se propaga de vuelta a través del telescopio de transmisión y se transmite de vuelta al sistema amplificador, tal como se ha descrito anteriormente en el presente documento.

El control de la duración del impulso se efectúa de modo siguiente. Parte de la energía del impulso viaja a través de la celda colimada 212 hacia la celda enfocada 213. La energía enfocada en la celda 213 alcanza el umbral más rápidamente que la energía en la celda colimada 212. Cuando se refleja de vuelta en la celda colimada 212, interactúa con el haz principal para inducir la reflexión. La temporización de la reflexión de la celda enfocada 213 se puede controlar ajustando el divisor de haces regulable 216. Con una energía más elevada, se alcanza el umbral más rápidamente, y viceversa. Por lo tanto, ajustando la cantidad de energía de entrada en la celda enfocada 213, regulando el divisor de haces 216 en esta forma de realización, se puede ajustar la temporización del flanco anterior del impulso reflejado. De hecho, es posible asimismo ajustar la anchura del pulso reflejado.

Haciendo referencia a las figuras 3 a 7, se ilustran aspectos del telescopio de retransmisión intracavidad 120, en el que los impulsos de elevada energía propagándose por el anillo se guían a un foco. En la figura 3, se puede apreciar que el telescopio de retransmisión comprende una cámara de vacío 300 provista de una primera lente de retransmisión 301 y una segunda lente de retransmisión 302 dispuestas en los extremos opuestos. Unos deflectores de campo próximo 304 y 305 se conforman en el telescopio de retransmisión cerca de las lentes 301 y 303. En la figura 3, una abertura de alineación 320 dispuesta sobre un soporte 322, y que presenta un pequeño orificio en el punto local 321 del telescopio de retransmisión, está montada encima de un soporte cinemático 308 en el interior de la cámara de vacío 300. El soporte 322 está acoplado al soporte cinemático 308. Una lumbrera de vacío 307 proporciona acceso a la cámara de vacío 300, a fin de poder sustituir la abertura de alineación 320. Una lumbrera de vacío 325 proporciona una conexión con una bomba de vacío que se utiliza para descargar la cámara.

En la figura 4, se ilustra el telescopio de retransmisión 300, en el que la abertura de alineación 320 se ha sustituido por un deflector cónico 309 diseñado para encajar en el soporte cinemático 308. En la forma de realización representada en la figura 4, entre los componentes representativos empleados en el telescopio de retransmisión se incluyen lentes de retransmisión cuyo diámetro es de 170 milímetros y cuya distancia focal es de 100 centímetros. Dichas lentes están separadas 200 centímetros. La lumbrera de acceso se forma mediante una brida Conflat para el vacío de 20 centímetros con una ventana integrada. Los deflectores de campo próximo dispuestos cerca de la lente de retransmisión son ranuras de 12 x 130 milímetros, realizadas en aluminio negro anodizado. El pequeño orificio de alineación dispuesto en la abertura de alineación es un orificio cuyo diámetro es un milímetro y que está dispuesto sobre una placa de acero inoxidable de espesor 1 milímetro. El deflector cónico se monta a partir de dos piezas mecanizadas de cerámica Macor blanca, con una abertura en la parte central estrechada de cinco centímetros cuadrados y paredes cónicas cuya pendiente es de 3 grados. Haciendo referencia a las figuras 5 a 7 se describen más detalladamente las características del deflector cónico.

En primer lugar, se utiliza un procedimiento de alineación y sus piezas asociadas de abertura y deflector para la alineación inicial de un haz en un amplificador multipaso, y en segundo lugar como medio para eliminar haces adicionales no pretendidos. Entre dichas piezas, se comprende una abertura de alineación 320 en forma de plataforma con un pequeño orificio, denominada diafragma de abertura, para la preparación inicial y un deflector cónico 309, típicamente realizado en un material resistente a elevadas temperaturas, por ejemplo cerámica. En comparación con el pequeño orificio dispuesto en la abertura de alineación, el orificio en el deflector es un único canal óptico mayor que presenta una parte central estrechada en la proximidad del foco 321 y lados inclinados, por lo menos próxima a la parte central estrechada. Mediante dichos lados inclinados se provoca que los haces no pretendidos se inicien con un gran ángulo de incidencia, reduciéndose la carga de fluencia en el deflector 309.

Para realizar el montaje de las piezas, el telescopio de retransmisión de vacío 120 se diseña de tal modo que se permita el acceso a la zona central a fin de disponer las piezas de alineación y deflexión. Un buen modo para acceder a la zona central es soldar en una lumbrera 307 con cubierta extraíble justo por encima del foco de las lentes 301, 303. El telescopio puede ser un tubo con una lente de retransmisión acoplada a cada extremo que sirva de ventana de vacío. O por el contrario, el telescopio de retransmisión se podría construir con ventanas de vacío y lentes externas. En el punto focal de la lente, está previsto el montaje cinemático en el interior del tubo y la alineación de la abertura de alineación 320 y posteriormente del deflector 309.

En la figura 5, se representa una perspectiva de un deflector cónico conforme a una forma de realización según la presente invención. Dicho deflector comprende un elemento sólido 500 provisto de un canal ópticamente transparente 501. En una forma de realización, dicho canal ópticamente transparente 501 se forma perforando el elemento 500. Dicho canal ópticamente transparente 501 presenta una parte central estrechada 502 adaptada para disponerse cerca del foco en el telescopio de retransmisión. El canal ópticamente transparente 501 presenta unas aberturas 503 y 504 dispuestas en los extremos opuestos, de mayor tamaño que parte central estrechada 502. Las paredes (por ejemplo, 505, 506) del canal ópticamente transparente 501 están inclinadas desde las aberturas 503, 504 hasta la parte central estrechada 502 de un modo relativamente gradual. En una forma de realización, la forma de las aberturas 503, 504 y de la parte central estrechada 502 es cuadrada. En otras formas de realización, la forma de las aberturas 503, 504 y de la parte central estrechada 502 es distinta, por ejemplo son ovaladas, rectangulares o redondas. La forma de la parte central estrechada 502 y de las aberturas 503, 504 del deflector depende de las características del haz que se propaga en el telescopio de retransmisión y del objetivo del deflector.

En las figuras 6 y 7 se representa una sección transversal de un deflector 309. Tal como se representa en la figura 6, el canal ópticamente transparente 501 permite la propagación del haz a lo largo de las líneas de haz 600 y 601. Tal como se representa en la figura 7, los haces con un cierto ángulo, por ejemplo el haz 602, quedan interceptados por las paredes inclinadas 604, 605 del deflector. De este modo, se reduce la fluencia de la energía que incide en el deflector a medida que se extiende encima del ángulo inferior. En una forma de realización según la presente invención, el ángulo de conicidad de las paredes 604, 605 del canal ópticamente transparente 501 comprende entre 1 y 10 grados, y una forma de realización preferida es de aproximadamente 3 grados.

Por lo tanto, con un telescopio de retransmisión provisto de un soporte cinemático adaptado para la sustitución de la abertura de alineación y del deflector, se proporciona tanto un deflector vertical provisto de un paso reducido actuando de abertura de alineación 320 para determinar la alineación inicial, así como el deflector cónico alargado

309 cuyos lados están ligeramente inclinados a fin de interceptar los haces no deseados. Tras la alineación, se elimina el deflector vertical y el sistema funciona con el deflector alargado. Las piezas del deflector encajan en la zona central del telescopio de retransmisión sobre el montaje cinemático, asegurándose su inserción precisa tal como se requiera tras la alineación inicial del sistema.

5 El deflector cerámico 309 puede realizarse en cerámica mecanizable, por ejemplo Macor. Se puede realizar a partir de una pluralidad de piezas atornilladas entre sí, tal como un grupo de montaje. En una forma de realización alternativa, el deflector cerámico 309 comprende una ranura para inserción del diafragma de abertura vertical de alineación. En esta alternativa, se perfora un orificio en el deflector para permitir la observación visual de las
10 posiciones del haz en la abertura de alineación vertical mientras que soportado en la ranura durante la alineación. En la forma de realización representada, la abertura de alineación 320 y el deflector 309 son grupos separados adaptados para el montaje sobre el mismo soporte cinemático en el interior de la cámara de vacío.

15 En un amplificador de retransmisión en anillo o un sistema amplificador con regeneración, el haz de luz que debe amplificarse normalmente atraviesa el medio de ganancia y las lentes de retransmisión múltiples veces. El guiado de los haces hacia el interior del anillo (o hacia el exterior del anillo) se realiza habitualmente mediante la rotación de la polarización y la reflexión (o la transmisión) en un divisor de haces polarizante. Durante las múltiples pasadas, se pueden generar reflexiones parásitas que se reflejan en superficies ópticas y se propagan de vuelta a través del medio de ganancia y de las lentes de retransmisión. Adicionalmente, la conmutación de la polarización en general no
20 resulta eficaz en un 100%, por lo que asimismo se generan haces residuales que se propagan y que quedan amplificados por el medio de ganancia. Ambos haces, los parásitos y los residuales, pueden generar una elevada intensidad y pueden dañar a los haces si no se interceptan correctamente.

25 Inclinando intencionadamente la alineación multipaso, separándola del estado de alineación superpuesta, los haces individuales enfocarán en diferentes puntos transversales del plano focal. De este modo, se crea un estado en el foco en el que los haces deseados se puedan propagar y los haces no deseados puedan quedar bloqueados. Sin embargo, el empleo de un deflector de bloqueo vertical con el objetivo de cortar el paso de ciertos haces en general no funciona, dado que la intensidad del haz es tan elevada en el foco que incluso los haces no deseados más débiles son susceptibles de provocar una ablación en el material y de perforar el deflector. Para evitar la ablación del
30 material debido a estos haces, se construye un deflector cónico con lados inclinados extendidos en el interior de la abertura del deflector. Disponiendo adecuadamente los haces enfocados, es posible provocar que los haces no deseados choquen contra los lados inclinados del deflector, esparciéndose su energía sin causar daño en una zona de grandes dimensiones.

35 En las figuras 8 y 9, se ilustran aspectos del telescopio de retransmisión 180 empleados para retransmitir un impulso de salida a la óptica de transmisión para el objetivo, que se encarga de acondicionar y dirigir los impulsos de salida a una pieza de trabajo objetivo. El telescopio de retransmisión 180 comprende una cámara de vacío 181 provista de lentes de retransmisión 182 y 183 dispuestas en sus extremos opuestos. Una lumbrera de vacío 184 se acopla a un sistema de vacío. Las lentes 185 y 186 representan esquemáticamente ópticas de transmisión para el objetivo que
40 se encargan de enfocar los impulsos en una superficie objetivo 187. El deflector 189 se dispone en el interior de la cámara de vacío 181. La lumbrera de visualización 190 permite la visualización de la abertura 189 durante la alineación del telescopio 180. El telescopio 180 se emplea para transportar los impulsos de salida a distancias importantes, como podrían ser uno o dos metros de longitud en un sistema representativo. El deflector 189 puede ser un deflector alargado, tal como se ilustra, o puede conformarse sobre una placa de cerámica con un diafragma de abertura. En la forma de realización con deflector alargado, la longitud del deflector puede ser por lo menos 10 veces, preferentemente superior de 100 veces, el tamaño del punto en el foco, con el objetivo de bloquear reflexiones en línea fuera del foco. El deflector alargado se puede implementar mediante un único elemento con una
45 abertura en forma del tubo o mediante una secuencia de placas alineadas provistas de pequeños orificios previamente practicados.

50 En la figura 9, se representa una realización del telescopio de retransmisión 180 realizado con un tubo sencillo 900 provisto de una lumbrera de bombeo de vacío 903 y bridas de entrada y salida 901 y 902 que pueden soportar lentes de retransmisión. Alternativamente, las bridas pueden soportar ventanas con las lentes de retransmisión externas al tubo. La lumbrera de visualización 904 se monta adyacente a la lumbrera de acceso 905. La lumbrera de
55 acceso 905 permite la inserción, extracción y manipulación del deflector 189.

60 En el punto focal de las lentes de retransmisión, el haz de entrada crea un foco compacto a medida que se propaga hacia el objetivo. La luz colimada penetra en el telescopio de retransmisión, atraviesa un foco y a continuación se colima tras atravesar la lente de retransmisión de salida. La luz reflejada por el objetivo y por cualquier superficie óptica entre el telescopio de retransmisión y el objetivo se propaga de vuelta hacia el telescopio de retransmisión. Sin embargo, en general, esta luz no enfoca en el mismo punto axial o transversal en el telescopio de retransmisión. Por lo tanto, el deflector 189 provisto de un pequeño orificio de dimensión justa para dejar pasar fácilmente la luz enfocada propagándose hacia el objetivo, puede evitar que la luz reflejada se propague hacia atrás hacia el láser. La luz de vuelta en general no enfoca exactamente en la posición del orificio entrante y por lo tanto se bloquea su
65 retorno. En algunas alternativas, el deflector 189 puede ser alargado, tal como se representa en el dibujo, provisto de un orificio interno de dimensión suficiente para dejar pasar el haz principal que avanza. La luz reflejada por otras

superficies ópticas (luz "fantasma") no enfoca en el deflector del telescopio de retransmisión y por lo tanto queda atenuada de modo importante por la relación existente entre el tamaño de abertura del orificio del deflector y el mayor tamaño de punto del haz en el interior del deflector alargado. Al telescopio de retransmisión se le añade una lumbrera de visualización 904, como ayuda para la alineación del sistema, mediante la que se permite inclinar el haz de entrada de modo preciso para que atraviese la abertura en el foco. Para asegurar adicionalmente que la luz reflejada no pueda propagarse de vuelta desde el objetivo hacia el láser, se programa el posicionamiento del objetivo de modo que la normal de su superficie siempre quede desviada por lo menos unos pocos grados y no apunte de vuelta directamente a lo largo del eje óptico. De este modo, la mayoría de los haces reflejados se propagarán de vuelta transversalmente fuera del eje óptico entrante y no atravesarán el sistema deflector. Dado que la distancia focal de mucha luz reflejada es distinta, ésta quedará bloqueada y por lo tanto no existirá una tendencia a ocasionar una ablación del material a través del deflector central, lo que ocurriría sin el deflector alargado.

En la figura 10, se representa un diagrama simplificado de un sistema de producción para el tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser de piezas de trabajo empleando una forma de realización según la presente invención. Dicho sistema de producción comprende un banco láser de baja vibración 250, sobre el que se monta un sistema de oscilador máster/amplificador de potencia MOPA 251 (en inglés, "master oscillator-power amplifier MOPA system). En un sistema preferido, el sistema MOPA se implementa tal como se ilustra en la figura 1 anterior. El telescopio de retransmisión 180 representado en la figura 1 se extiende desde el banco láser 250 hasta un segundo banco 252, en el que se soporta óptica de diagnóstico y de transmisión para el objetivo. Dichos primer banco 250 y segundo banco 251 se disponen en el interior de una sala blanca 260. Una fuente de alimentación 261 está acoplada al oscilador láser del banco 250. Asimismo, una red de formación de impulsos PFN 262, preferentemente situada fuera de la sala blanca 260, está acoplada eléctricamente a los componentes del amplificador láser del banco láser 250. Se abastece el interior de la sala blanca 260 con agua de refrigeración de una fuente 263, a fin de refrigerar los componentes MOPA 251. La óptica de transmisión para el objetivo del banco 252 da forma y dirige los pulsos de salida hacia una celda de robótica 253, dispuesta en el exterior de la sala blanca 260. Dicha celda de robótica 253 comprende un robot 270 provisto de un brazo 271, que se emplea para manipular las piezas de trabajo, por ejemplo las paletas del ventilador de un turborreactor o las paletas de un compresor, para recibir los impulsos en una operación de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser.

Un sistema de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser enfoca muchos impulsos de elevada intensidad en un objetivo metálico. Durante el tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser, el objetivo metálico se puede orientar con distintos ángulos con respecto al haz incidente, por lo que existe una elevada probabilidad de que la luz se refleje directamente hacia el sistema láser. Dicha luz reflejada e intensa puede dañar los componentes láser si es capaz de alcanzar el amplificador y la óptica. Con el objetivo de evitar dicha situación, se dispone el telescopio de retransmisión 180 provisto de un deflector 189 en el foco. Mediante un orificio de tamaño adecuado practicado en el deflector, se evita que la mayoría de la luz reflejada se propague de vuelta directamente hacia el láser.

En resumen, se ha diseñado un espejo/conjugador de fase SBS, provisto de dos celdas líquidas, para su utilización con láseres pulsados de estado sólido de elevada energía, configurados en geometría MOPA (oscilador máster/amplificador de potencia). En particular, está optimizado para su empleo con sistemas láser pulsados para sistemas comerciales de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser. Incorpora varias características específicas y muy importantes para proporcionar control temporal y espacial del haz reflejado por el sistema SBS. La imagen de retransmisión desde la abertura del amplificador óptico hasta la entrada al conjugador de fase evita la propagación libre de las distorsiones del frente de onda, así como distorsiones en la distribución de radiación de haz. Un deflector situado en el telescopio de retransmisión impide que los haces parásitos de baja potencia entren en el espejo/fase conjugada SBS y que se reflejen. El haz de fase conjugada se genera en una celda enfocada SBS líquida, y una vez que se supera el umbral SBS, la mayoría de la potencia láser se refleja en la celda SBS colimada. Se proporciona un divisor de haces fácilmente regulable, dispuesto entre ambas celdas, a fin de variar el umbral de la celda enfocada y ello proporciona un modo de ajustar la duración del impulso reflejado. Mediante unos elementos de diagnóstico de la alineación integrados en el sistema SBS, se efectúa la verificación global de la alineación de los impulsos de amplificación multipaso.

El sistema conjugador de fase SBS descrito en el presente documento incorpora un elemento de diagnóstico de alineación de campo lejano, de modo que el ángulo de apuntado a través de todo el sistema amplificador, en todo el camino hasta el espejo SBS, se puede verificar y mantener. Ello se implementa con un divisor de haces de pérdidas muy reducidas, dispuesto entre la primera celda SBS y el telescopio de retransmisión SBS. Se guía una muestra pequeña del haz (<1%) para que atraviese una lente de diagnóstico, y una videocámara CCD (u otro diseño electrónico) se dispone exactamente en el foco de dicha lente de diagnóstico. Ajustando periódicamente el sistema óptico para mantener el punto enfocado aproximadamente en la misma ubicación, se asegura que se mantiene la alineación básica.

Para una aplicación láser, por ejemplo el tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser o el conformado por martilleo láser, es importante que la duración de los impulsos láser sea la correcta, y ello depende del tipo y espesor del material que debe tratarse. Se emplea un sistema conjugador de fase SBS de dos celdas con una modificación muy importante y relevante respecto al enfoque estándar utilizado anteriormente. Se ha puesto de

manifiesto que dicho sistema de dos celdas es muy útil para la conjugación de fase SBS de elevada energía, en el que el proceso de enfoque mediante un impulso de elevada energía en una celda simple SBS puede ocasionar la ionización óptica (una chispa no intencionada) en el foco. Añadiendo una segunda celda colimada delante de la celda enfocada se puede paliar dicho problema, provocando que mucha de la energía incidente se refleje hacia la celda colimada, por amplificación no lineal SBS, incluso antes de alcanzar la celda enfocada. Las formas de realización según la presente invención presentan la ventaja de que la eficacia de procedimiento no lineal SBS no depende en gran medida de cuánta energía se refleje realmente de la celda enfocada por la saturación de la ganancia no lineal en la celda colimada. Por lo tanto, se puede añadir un atenuador ajustable entre ambas celdas para variar la energía que alcanza la segunda celda enfocada. Reduciendo la energía que alcance la celda enfocada, se puede retrasar el umbral no lineal SBS (punto del perfil temporal por debajo del que no se produce reflexión), y por lo tanto acortar la duración del impulso reflejado. De este modo, se puede realizar un ajuste fino de la duración del impulso de salida del láser simplemente ajustando dicha pérdida variable entre las celdas. Dicha pérdida de valor variable se obtiene en las formas de realización según la presente invención mediante un divisor de haces parcialmente reflectante, cuya reflectividad eficaz sea función del ángulo de incidencia del haz sobre su superficie. Una simple rotación del divisor de haces ajusta la energía que alcanza la celda enfocada y por lo tanto ajusta la duración del impulso de salida del sistema láser global.

Un aspecto importante de las formas de realización según la presente invención es el control de las propiedades del índice no lineal del medio del conjugador de fase SBS, en particular para sistemas con impulsos de elevada energía, del orden de 2 joules por impulso en el medio SBS. Se ha observado que el medio líquido utilizado en las celdas de conjugación de fase SBS puede contribuir de modo significativo a la acumulación de errores del índice no lineal (denominado en el estado de la técnica β -integral). Teniendo esto en cuenta, se han reemplazado los líquidos tales como acetona o tetracloruro de carbono por un compuesto de perfluoro que presente un índice de refracción no lineal de valor inferior, y manteniendo las condiciones requeridas para un sistema de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser, quedan eliminados los problemas previos ocasionados por daños por enfoque automático observados algunas veces tras el funcionamiento prolongado del láser. Aunque se cree que los compuestos de perfluoro ya han sido investigados por otros equipos para su empleo en celdas SBS, se ha inventado una celda SBS de elevada energía que se basa en dicho tipo de compuestos. Adicionalmente, el medio SBS se filtra, en algunas formas de realización *in situ*, para eliminar partículas cuyo tamaño sea superior aproximadamente de 0,1 micrones.

Dicho sistema conjugador de fase SBS es la elección óptima para los sistemas láser de estado sólido en configuración MOPA (oscilador máster/amplificador de potencia) que emitan pulsos de elevada energía. Presenta aplicaciones en otros sistemas láser, por ejemplo sistemas láser que incorporen conversión no lineal de frecuencia, como en láseres dobladores y triplicadores de frecuencia, conversión de frecuencia de Raman, OPO (osciladores paramétricos ópticos) y OPA (amplificadores paramétricos ópticos) de bombeo. Entre algunos ejemplos de aplicaciones comerciales se encuentran el tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser, el conformado por martillo láser, el marcado láser y el recocido por láser de metales y semiconductores, así como el procesado de materiales, por ejemplo corte, soldadura, tratamiento térmico, generación de luz UV y tratamiento de semiconductores.

Dicho diseño del conjugador de fase SBS es particularmente apto para entornos de mucha tensión en sistemas de fabricación industriales y otros sistemas láser en los que existe una elevada estabilidad en presencia de variaciones térmicas y vibraciones mecánicas.

Junto con el sistema de espejo SBS descrito anteriormente para sistemas láser de producción de elevada potencia, un sistema de deflectores se dispone en el foco de un telescopio de retransmisión intracavidad en un sistema láser multipaso de elevada potencia. Dicho telescopio de retransmisión comprende un montaje cinemático adaptado para el montaje de un primer deflector provisto de un diafragma de abertura para permitir una prealineación exacta de los haces de propagación que avanzan y retroceden, y para el montaje de un segundo deflector cónico de sustitución que presente un orificio mucho más grande y pendientes inclinadas especialmente diseñadas para bloquear y dispersar los haces de luz no deseados de elevada afluencia (energía por cm cuadrado). El deflector provisto del diafragma de abertura permite desviar adecuadamente los haces que avanzan y retroceden y está diseñado para ser extraíble. El segundo deflector cónico actúa de medio para bloquear eficazmente y absorber o dispersar la luz de las reflexiones residuales que se producen en la óptica y por la luz no eliminada completamente durante la conmutación de la polarización de salida. En la técnica anterior, dicha luz se reamplifica y alcanza niveles que pueden causar daños al viajar por el sistema, por lo que es preciso eliminarla para el funcionamiento sin riesgo de daños. Con dicha estructura de piezas, que comprende una abertura de alineación dual y el sistema de deflectores, se obtiene una alineación correcta y precisa del sistema óptico mediante el telescopio de retransmisión, y al mismo tiempo se eliminan los haces no deseados que podrían resultar destructivos.

Se pueden emplear formas de realización según la presente invención en un sistema óptico que comprenda un telescopio de retransmisión exterior provisto de un deflector central para reducir en gran medida la luz reflejada por el objetivo. El sistema de imagen retransmitida, tal como se describe en la patente US nº 6.198.069 "*Laser beam temporal and spatial tailoring for laser shock processing*", por L. A. Hackel y C. B. Dane, crea un plano de imagen de campo próximo de la salida del láser en la superficie del objetivo. Disponiendo corriente arriba de las piezas del

sistema de formación de imágenes un telescopio de retransmisión adicional provisto de deflector, se puede eliminar, casi completamente, la luz reflejada por el objetivo de la luz que retrocede.

5 Un sistema láser, por ejemplo un sistema oscilador máster/amplificador de potencia, comprende un medio de ganancia y un sistema de espejo de dispersión de Brillouin estimulada. En el sistema de espejo SBS existe un medio SBS filtrado *in situ* que comprende un compuesto que presenta un índice de refracción no lineal negativo de reducido valor, como un compuesto de perfluoro. Un telescopio de retransmisión SBS con su punto focal comprende un deflector en el foco del telescopio que corta el paso de los haces angulares. Se dispone un divisor de haces entre el sistema de espejo SBS y el telescopio de retransmisión SBS, mediante el que se dirige una pequeña parte del haz por una trayectoria óptica alternativa para obtener una referencia de alineación. El sistema de espejo SBS presenta una celda colimadora SBS y una celda enfocada SBS. Se dispone un atenuador ajustable entre dicha celda colimada SBS y dicha celda enfocada SBS, con el objetivo de ajustar la anchura del impulso del haz reflejado.

10 Aunque la presente invención se ha descrito haciendo referencia a unas formas de realización preferidas y a los ejemplos detallados anteriormente, cabe entender que dichos ejemplos son ilustrativos y no limitativos. Se considera que los expertos en la materia podrán modificar y combinar fácilmente dichas formas de realización, estando comprendidas dentro del alcance de la presente invención tal como se reivindica.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de espejo de fase conjugada de dispersión de Brillouin estimulada SBS, que comprende:
- 5 un telescopio de retransmisión (200) que presenta un punto focal de telescopio, que retransmite una imagen de un haz de entrada en una línea de haz;
- una primera celda SBS (212) en la línea del haz adyacente al telescopio de retransmisión, y una celda enfocada SBS (213) en la línea del haz, cuyo punto focal SBS se encuentra en el interior de la celda enfocada SBS; y
- 10 un atenuador ajustable (216) en la línea del haz entre la primera celda SBS y la celda enfocada SBS.
2. Sistema según la reivindicación 1, en el que dicha primera celda SBS (212) comprende un medio SBS, y que está adaptada para un haz colimado o prácticamente colimado en el interior del medio SBS.
- 15 3. Sistema según la reivindicación 1, en el que dicho atenuador ajustable (216) comprende un divisor de haces ajustable, mediante el cual una parte del haz se desvía de la línea del haz.
4. Sistema según la reivindicación 1, en el que dicho atenuador ajustable (216) comprende una placa parcialmente reflectante, dispuesta formando un ángulo de incidencia ajustable en la línea del haz, mediante el cual una parte del haz se desvía de la línea del haz, y de tal modo que la reflectividad de la placa parcialmente reflectante puede modificarse girando la placa para variar el valor del ángulo de incidencia ajustable.
- 20 5. Sistema según la reivindicación 1, en el que se suministra un haz de entrada con un impulso de entrada al telescopio de retransmisión (200), y en el que la celda enfocada SBS (213) presenta un umbral no lineal SBS, de tal modo que el ajuste del atenuador ajustable (216) provoque un desplazamiento temporal del impulso en el cual dicha celda enfocada de SBS (213) alcanza el umbral no lineal SBS, controlando de este modo la anchura del impulso de una reflexión del impulso de entrada.
- 25 6. Sistema según la reivindicación 1, en el que dicha primera celda SBS (212) comprende un medio SBS, y dicho medio SBS comprende un compuesto de perfluoro.
7. Sistema según la reivindicación 1, en el que dicha primera celda SBS (212) comprende un medio SBS en una cámara sellada, y el medio SBS comprende un compuesto de perfluoro filtrado que esencialmente no presenta contaminantes en particular con un tamaño superior a aproximadamente 0,1 micrones.
- 35 8. Sistema según la reivindicación 1, en el que la celda enfocada SBS (213) comprende un medio SBS en una cámara sellada, y el medio SBS comprende un compuesto de perfluoro filtrado que esencialmente no presenta contaminantes en partículas con un tamaño superior a aproximadamente 0,1 micrones.
- 40 9. Sistema según la reivindicación 1, en el que dicha primera celda SBS (212) y la celda enfocada SBS (213) comprenden unos medios SBS en las respectivas cámaras selladas, y los medios SBS comprenden un compuesto de perfluoro filtrado que esencialmente no presenta contaminantes en particular con un tamaño superior a aproximadamente 0,1 micrones.
- 45 10. Sistema según la reivindicación 1, que comprende:
- un divisor de haces entre la primera celda SBS y el telescopio de retransmisión, que dirige una fracción del haz por una trayectoria alternativa de haz con un punto focal de trayectoria alternativo; y
- 50 un detector de alineación en el punto focal de trayectoria alternativo.
11. Sistema según la reivindicación 1, que comprende:
- 55 un deflector (203) en el punto focal del telescopio que corta el paso de los haces angulares.
12. Sistema según la reivindicación 1, en el que en dicha primera y segunda celdas SBS existe un medio líquido SBS, que comprende:
- 60 una bomba y un filtro acoplados por lo menos a una de entre la primera o segunda celdas SBS, para filtrar *in situ* el medio líquido SBS.
13. Sistema según la reivindicación 1, en el que en dicha primera y segunda celdas SBS existe un medio líquido SBS, que comprende:
- 65 una bomba y un filtro acoplados por lo menos a una de entre la primera o segunda celdas SBS, para filtrar *in situ* el

medio líquido SBS, y presentando el filtro un tamaño de poro de aproximadamente 0,1 micrones o menos.

14. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, en el que por lo menos en la primera celda SBS y en la celda enfocada SBS existe un medio SBS que comprende un compuesto de perfluoro que presenta un índice de refracción no lineal negativo con un valor absoluto inferior a aproximadamente 1×10^{-12} esu.

15. Sistema según la reivindicación 14, en el que dicho compuesto comprende un compuesto de perfluoro que presenta un índice de refracción no lineal de aproximadamente $-4,7 \times 10^{-13}$ esu, un umbral de aproximadamente 2,5 mJ para un anchura del impulso aproximadamente de 18 nanosegundos, y una ganancia no lineal de aproximadamente 6,2 GW/cm.

16. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15, en el que la primera celda SBS y la celda enfocada SBS forman un conjugador de fase, y en el que el telescopio de retransmisión retransmite imágenes de una salida de un medio de ganancia entre una localización de imagen en la línea del haz y una localización de imagen en la proximidad del conjugador de fase.

17. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, en el que el atenuador ajustable es capaz de aceptar impulsos de entrada de un valor superior a 2 joules por impulso, y aceptando dicho sistema impulsos de entrada de un anchura de hasta aproximadamente 1 microsegundo y suministrando impulsos reflejadas con anchuras de impulsos ajustables.

18. Procedimiento para amplificar un impulso láser, que comprende:

acoplar un impulso de germen en una trayectoria óptica en forma de anillo que incluye un medio amplificador;

invertir la fase del impulso mediante la conjugación de fase SBS tras uno o más pasos a través del anillo durante el cual dicho impulso atraviesa el medio amplificador;

acoplar un impulso de salida del anillo después de que dicho impulso haya atravesado el medio amplificador en un número igual de pasos a través del anillo en sentido opuesto; caracterizado porque

se controla la anchura de impulso de un impulso de salida controlando un umbral de dicha conjugación de fase SBS.

19. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que dicha inversión de fase incluye la retransmisión de una imagen de un impulso desde el medio amplificador hasta un sistema SBS, y la inducción de la conjugación de fase en dicho sistema SBS.

20. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que dicha inversión de fase incluye disponer un sistema de espejo SBS que comprende una celda colimada SBS (212) y una celda enfocada SBS (213) en la cavidad.

21. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que dicha inversión de fase incluye disponer un sistema de espejo SBS que comprende una celda colimada SBS (212) y una celda enfocada SBS (213) en la cavidad; de tal modo que el control de la anchura del impulso comprende desviar una cantidad controlada de energía de dicho impulso hacia el exterior de la cavidad entre la celda colimada SBS y la celda enfocada SBS para controlar dicho umbral.

22. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que dicha conjugación de fase SBS incluye la introducción de un medio SBS en dicha cavidad, comprendiendo dicho medio SBS un compuesto que presenta un índice de refracción no lineal negativo con un valor absoluto inferior a aproximadamente 1×10^{-12} esu.

23. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que dicha conjugación de fase SBS incluye la introducción de un medio SBS en dicha cavidad, comprendiendo dicho medio SBS un compuesto de perfluoro.

24. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que dicha conjugación de fase SBS incluye la introducción de un medio SBS en dicha cavidad, comprendiendo dicho medio SBS un compuesto de perfluoro que presenta un índice de refracción no lineal negativo de aproximadamente $-4,7 \times 10^{-13}$ esu, un umbral de aproximadamente 2,5 mJ en un anchura del impulso de aproximadamente 18 nanosegundos, y una ganancia no lineal de aproximadamente 6,2 GW/cm.

25. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que dicha conjugación de fase SBS incluye la introducción de un medio SBS en dicha cavidad, e incluyendo filtrar dicho medio SBS *in situ* para eliminar partículas que presenten un tamaño superior a aproximadamente 0,1 micrones.

26. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que dicha inversión de fase incluye disponer un sistema de espejo SBS que comprende una celda colimada SBS (212) y una celda enfocada SBS (213) en la cavidad; y

alinear la cavidad óptica mediante una alineación de referencia entre la celda colimada SBS y la celda enfocada SBS.

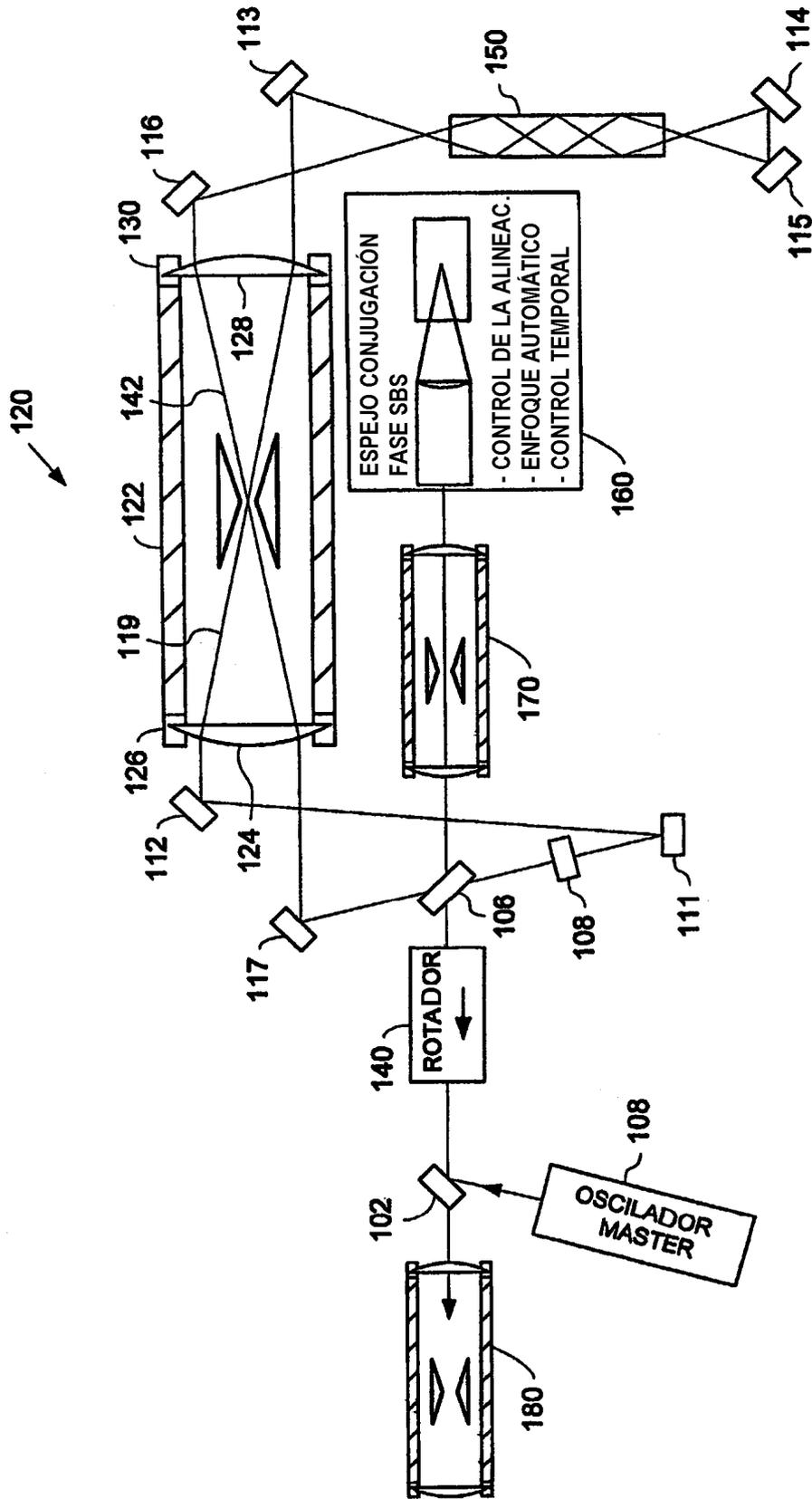


Fig. 1

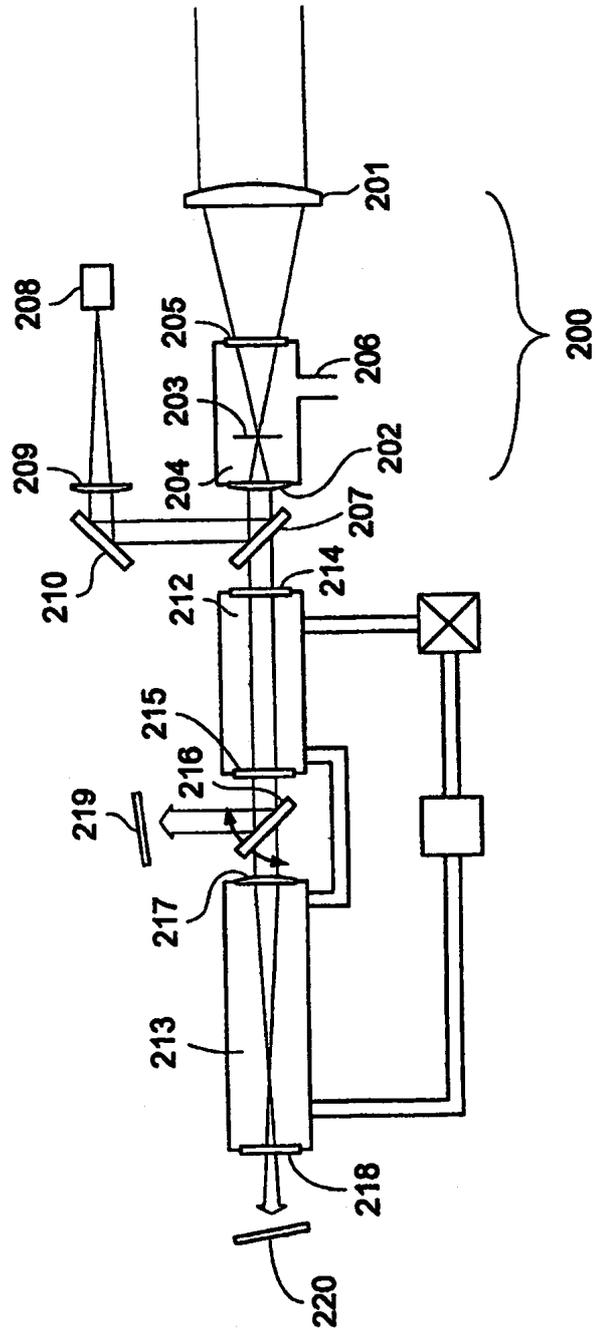


Fig. 2

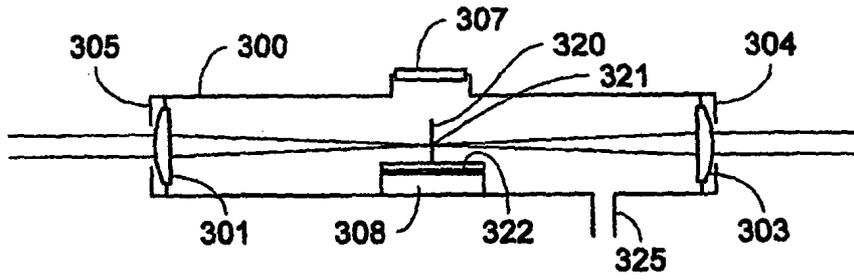


Fig. 3

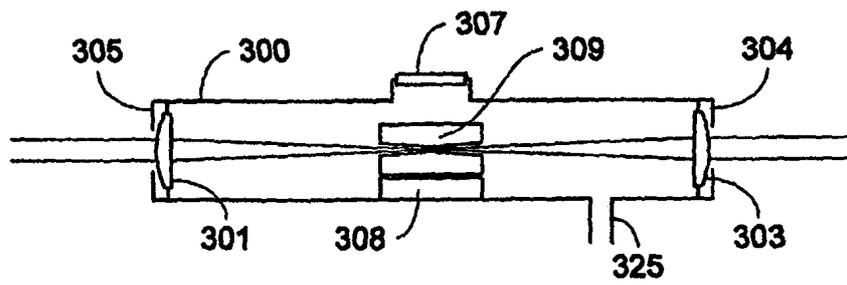


Fig. 4

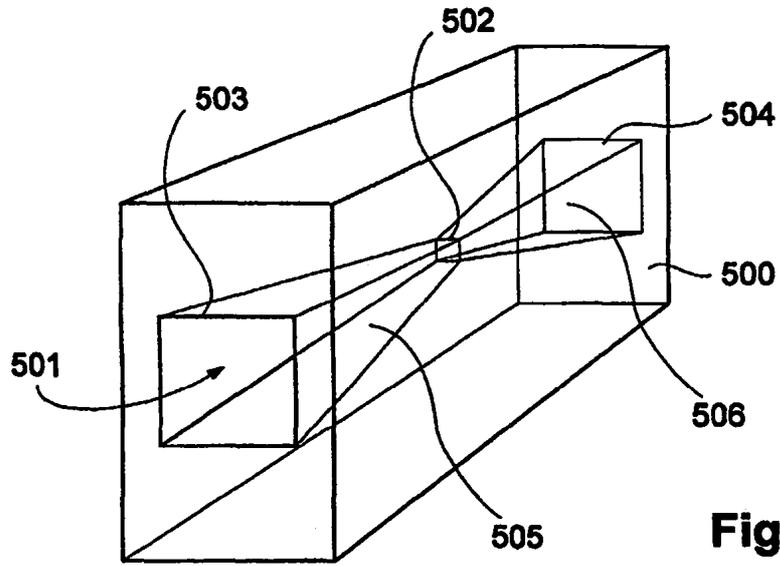


Fig. 5

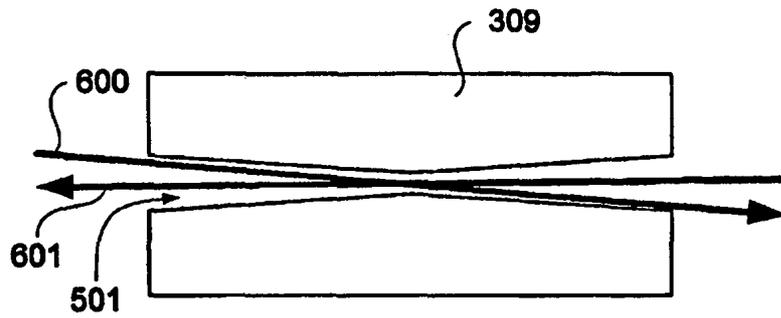


Fig. 6

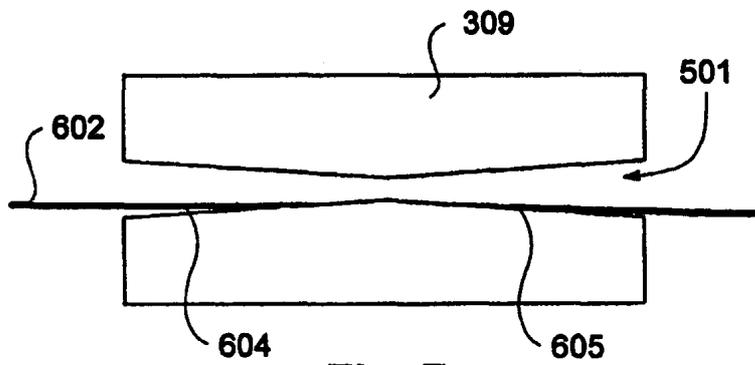


Fig. 7

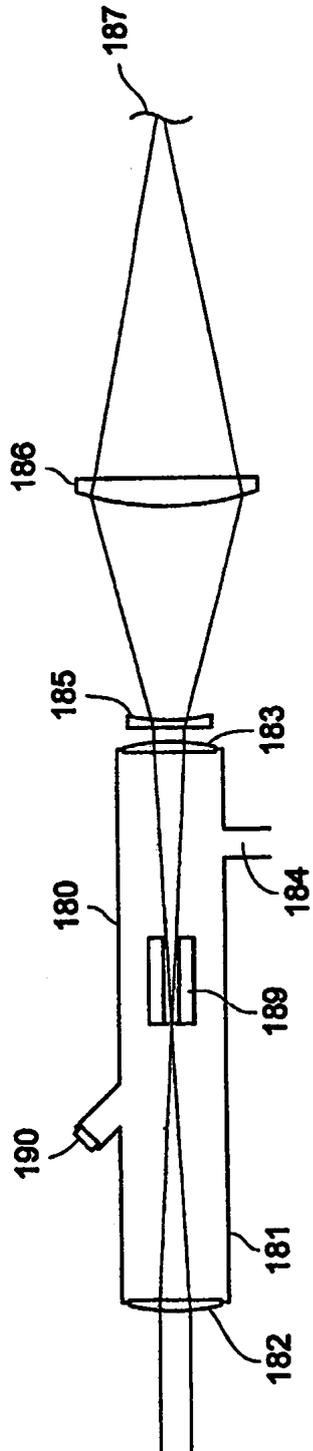


Fig. 8

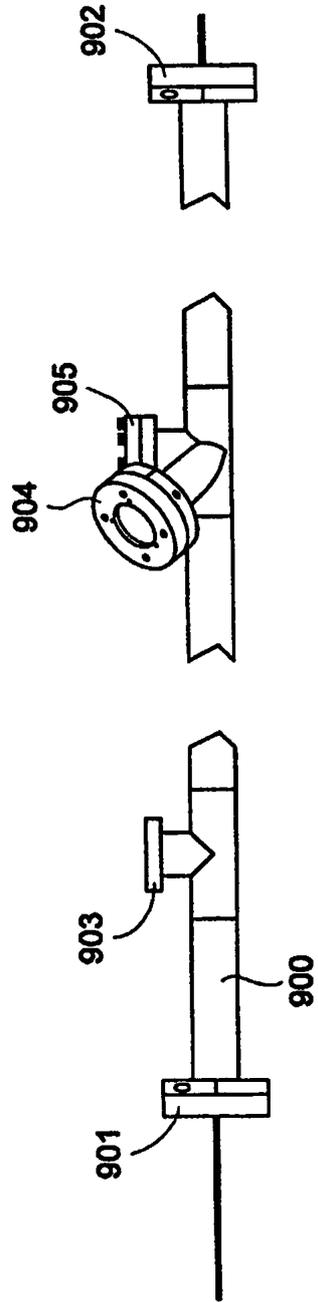


Fig. 9

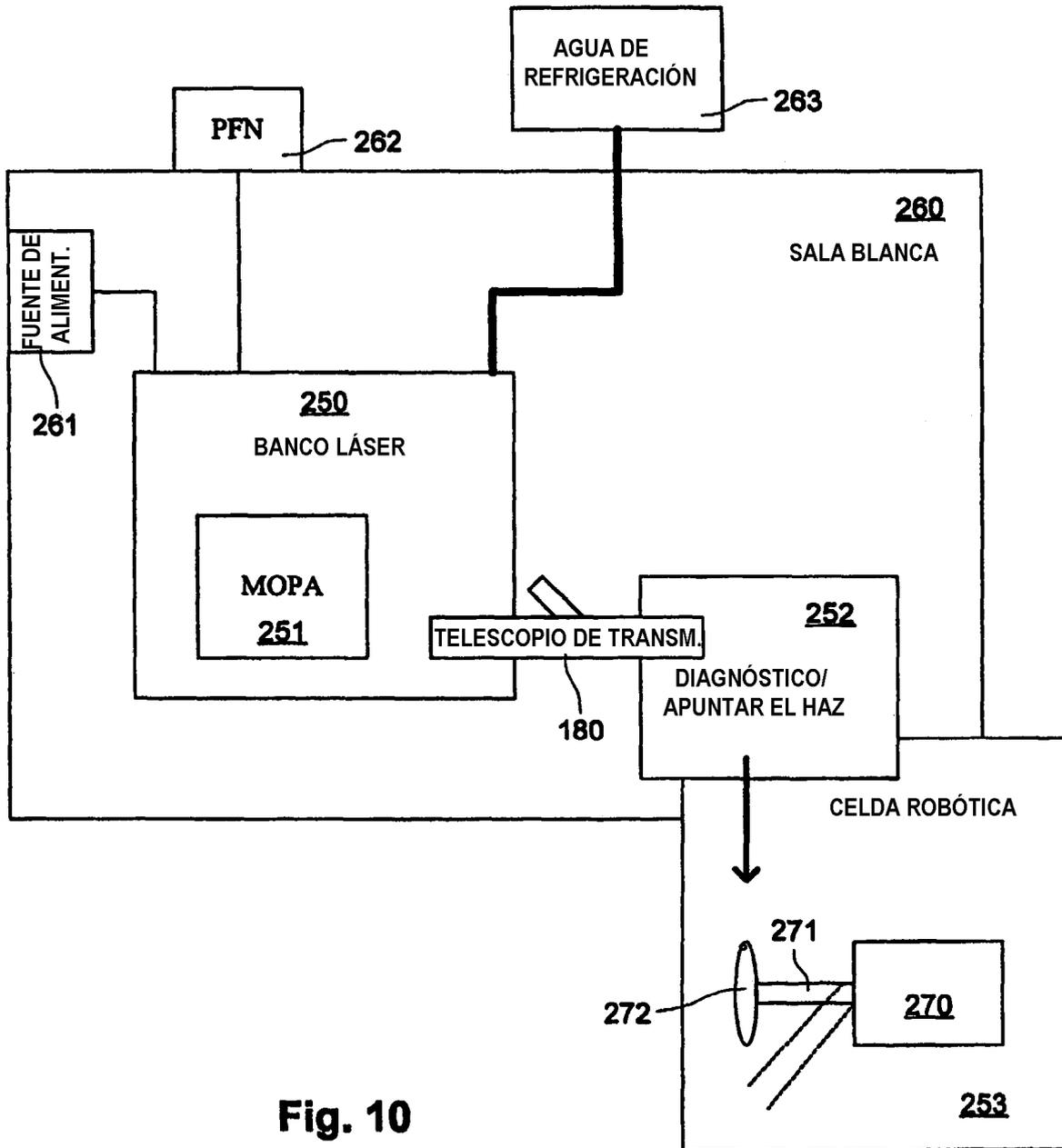


Fig. 10