

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 526 218**

51 Int. Cl.:

**H01S 3/00**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.07.2009 E 09802562 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.09.2014 EP 2311158**

54 Título: **Dispositivo de generación de un impulso láser de duración reducida**

30 Prioridad:

**01.08.2008 FR 0855324**

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

**08.01.2015**

73 Titular/es:

**ECOLE POLYTECHNIQUE (100.0%)**

**Route de Saclay**

**91128 Palaiseau Cedex, FR**

72 Inventor/es:

**MOUROU, GÉRARD;**

**CHERIAUX, GILLES y**

**RADIER, CHRISTOPHE**

74 Agente/Representante:

**LINAGE GONZÁLEZ, Rafael**

**ES 2 526 218 T3**

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

## DESCRIPCIÓN

Dispositivo de generación de un impulso láser de duración reducida

5 La invención se refiere a un dispositivo de generación de un impulso láser de duración reducida.

En tal dispositivo, el impulso láser de duración reducida se obtiene por reducción de la duración de un impulso de entrada.

10 Un objetivo de la invención es proporcionar tal dispositivo de generación de un impulso láser de duración reducida que permite la utilización de un impulso láser de entrada de alta energía, típicamente superior al Julio y de corta duración, típicamente del orden de los femtosegundos.

15 Los dispositivos clásicos de generación de un impulso láser de duración reducida en los que el impulso láser de entrada es inyectado en fibras ópticas de efecto no lineal para ensanchar el espectro del impulso láser de entrada, tales como los descritos en la publicación de Shekel y col., «Generación of 3.8 fs. pulses from adaptative compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum», no permiten la utilización de impulsos láser de entrada de alta energía debido al daño de las fibras con este nivel de energía.

20 La publicación de Shah y col., «Ultrafast high energy amplifiers beyond the B-integral limit», describe láseres de alta energía que utilizan fibras ópticas y se interesa entre otros por los límites de la integral de rotura B.

La invención se refiere entonces a un dispositivo de generación de un impulso láser de duración reducida en propagación libre, es decir en un medio no guiado.

25 La invención se refiere más en particular a un dispositivo de generación de un impulso láser de duración reducida que comprende:

30 - medios de generación de un haz láser de entrada que proporciona un impulso láser de entrada de la longitud de onda  $\lambda$ ;

- una lámina transparente que comprende un material no lineal dispersivo que tiene un índice de refracción no lineal;

35 - estando los medios de generación de un haz láser de entrada adaptados para que el haz láser de entrada tenga una densidad de potencia superior a  $10^{11}$  vatios por centímetro cuadrado sobre la lámina con el fin de que la lámina ensanche el espectro del impulso láser de entrada por auto-modulación de fase para generar un impulso láser de espectro ensanchado;

40 - medios de compresión dispuestos para comprimir el impulso láser de espectro ensanchado para generar el impulso láser de duración reducida,

- estando el dispositivo caracterizado porque los medios de generación de un haz láser de entrada están adaptados para que el haz de entrada sea espacialmente uniforme en amplitud sobre la lámina transparente y para que la

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l n_2(z) \cdot I(z) dz$$

45 integral de rotura del haz sea inferior a tres cuando atraviesa la lámina transparente, siendo  $n_2(z)$  el índice de refracción de la lámina transparente, siendo  $l$  el espesor de la lámina transparente, siendo  $I(z)$  la densidad de superficie de potencia del haz de entrada y donde  $z$  es según la dirección del haz a la travesía de la lámina transparente.

50 Se ha constatado que el efecto de auto-modulación de fase se obtenía para densidades de potencia del impulso láser superiores a  $10^{11}$  W.cm<sup>2</sup>.

Tal dispositivo es conocido a partir de la publicación de Mével y col., «Extracavity compression technique for high-energy femtosecond pulses», que apunta asimismo a permitir la utilización de impulsos láser de entrada de alta energía, típicamente superior al Julio y de corta duración, típicamente del orden de los femtosegundos.

55 En la publicación de Mével y col., la auto-modulación de fase que permite ensanchar el espectro del impulso de entrada es realizada en un medio no guiado gracias a una lámina de material no lineal BK7 sobre la que es inyectado el haz láser de entrada. Un impulso ensanchado que comprende nuevas frecuencias se obtiene entonces a la salida de la lámina. En efecto, para densidades de potencia superiores a  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> del haz láser recibido por la lámina, un efecto de auto-modulación de fase se produce en la lámina de material no lineal.

60 Espejos chirpeados, es decir, de dispersión controlada, permiten entonces comprimir este impulso ensanchado para generar el impulso corto.

En la publicación de Mével y col. mencionada anteriormente, el haz láser de entrada es espacialmente un gaussiano. Este haz está focalizado sobre un filtro espacial por una lente. La lámina no lineal está posicionada entre la lente y el filtro espacial para generar un impulso láser de espectro ensanchado.

5 Sin embargo, en la publicación de Mével mencionada anteriormente, los efectos no lineales son desiguales en el conjunto del haz, de manera que la recompresión y la reducción de la duración no son homogéneas y son imperfectas.

Además, en la publicación mencionada anteriormente, debido a la utilización de una distribución espacial gaussiana, un efecto de autofocalización del haz se produce en la travesía de la lámina no lineal. Este segundo efecto no lineal de autofocalización tiene por consecuencia degradar espacialmente el haz láser, haciéndolo de este modo inutilizable y peligroso para las ópticas especialmente en el caso de haces energéticos.

10 Un objeto de la invención es mejorar la calidad de la reducción de la duración de impulso en un dispositivo tal como el descrito anteriormente, especialmente preservando las ópticas del dispositivo.

Este objeto se consigue mediante la invención gracias al hecho de que los medios de generación láser están dispuestos para que el haz de entrada sea espacialmente uniforme sobre la lámina transparente y tenga una integral B inferior a tres cuando atraviesa la lámina transparente.

20 De este modo, el efecto no lineal y el efecto dispersivo de la lámina son uniformes en el conjunto del haz. De ello resulta que el ensanchamiento espectral por efecto de auto-modulación es uniforme, lo que garantiza una reducción uniforme de la duración en todo el haz.

25 La calidad de la reducción de la duración del impulso se mejora por lo tanto en gran medida. En particular, se ha constatado que la invención permite obtener, en salida del dispositivo, impulsos muy energéticos en regímenes de duración del orden de una decena de femtosegundos, gracias a un factor de reducción de la duración de impulso respecto del impulso de entrada del orden de dos a tres. Este factor de reducción puede obtenerse para una energía del impulso de entrada superior a 100 Julios.

30 Por el contrario, el dispositivo descrito en la publicación de Mével mencionada anteriormente no permitiría la utilización de un haz espacialmente uniforme como en la invención. En efecto, la lente convergente utilizada en el dispositivo de Mével antes de la lámina transparente no permite obtener una repartición uniforme sobre la lámina transparente.

35 Se describen ahora modos de realización ventajosos de la invención.

Por otra parte, es conocido que la integral B de un haz láser de longitud de onda  $\lambda$  en la travesía en la dirección z de un medio de espesor l que tiene un índice de refracción no lineal  $n_2(z)$  y una densidad de potencia I(z) se define como sigue:

Integral

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l n_2(z) \cdot I(z) dz$$

45 El valor de la integral B es importante para un haz láser de alta energía, puesto que para estos haces, la intensidad es tal que efectos no lineales se acumulan aún más a medida que avanza el impulso en la lámina.

50 Para un valor de la integral B inferior a 3, se ha constatado que la deformación espacial era relativamente insignificante. En efecto, cuando el haz de entrada uniforme, es decir en escalón, es ruidoso, el ruido presenta frecuencias espaciales elevadas. Ahora bien, al paso por la lámina transparente, se produce una amplificación proporcional a una exponencial de la integral B dependiente de la frecuencia. La deformación espacial del haz empieza entonces a ser significativa para valores de la integral B superiores a 3.

55 El factor de compresión de la duración de impulso obtenido gracias al dispositivo de la invención es entonces del orden del valor de la integral B. Es precisamente igual a ese valor de la integral B en el caso ideal de un impulso gaussiano temporalmente.

60 Preferentemente, los medios de generación láser están dispuestos para que el haz de entrada tenga una integral B comprendida entre dos y tres cuando atraviesa la lámina transparente para obtener un factor de compresión de la duración de impulso sensiblemente comprendido entre 2 y 3.

El haz láser de entrada tiene preferentemente una densidad de potencia superior a  $10^{11}$  vatios por centímetro

cuadrado en la lámina, con el fin de permitir la obtención del efecto de auto-modulación en la lámina.

El haz láser es preferentemente colimado hacia la lámina transparente para evitar la pérdida de la repartición espacial uniforme del haz láser de entrada antes de la lámina. En particular, como se ha mencionado anteriormente, la utilización de una lente antes de la lámina transparente no permitiría mantener una repartición uniforme sobre la lámina transparente.

Los medios de compresión pueden comprender al menos un espejo chirpeado o una red de compresión de impulso.

Preferentemente, la lámina puede ser una lámina de sílice SiO<sub>2</sub>. Se ha constatado en efecto que este material tiene una buena resistencia al flujo y permite obtener rendimientos satisfactorios para el dispositivo. La lámina es transparente al haz láser de entrada. La lámina puede asimismo ser de vidrio.

Ventajosamente, los medios de generación láser pueden comprender un láser de amplificación de deriva de frecuencia. Tal láser de amplificación de deriva de frecuencia, denominado en inglés «Chirped Pulse amplificación» o CPA, permite obtener altas energías para el impulso de entrada en el ámbito del femtosegundo.

Según un modo de realización de la invención, los medios de generación láser pueden comprender un filtro espacial dispuesto para uniformizar un haz láser para proporcionar, en salida del filtro espacial, el haz láser de entrada espacialmente uniforme sobre la lámina. Este modo de realización es ventajoso cuando el único haz láser disponible no es uniforme, especialmente cuando no tiene suficiente energía. En este caso, el filtro espacial permite uniformizar este haz láser para obtener el haz láser de entrada espacialmente uniforme que se transmite hacia la lámina.

Preferentemente, la invención comprende, además, medios dispuestos para reinyectar el haz de salida que proporciona el impulso láser de duración reducida hacia la lámina transparente. De este modo, es posible realizar varios pasadas por la lámina transparente y por lo tanto repetir los efectos de reducción de duración de impulso del dispositivo.

En este caso, medios de filtración espacial pueden estar dispuestos para filtrar el haz de salida que proporciona el impulso láser de duración reducida antes de su reinyección en la lámina transparente. Tales medios de filtración permiten especialmente asegurar que el haz incidente sobre la lámina transparente, es decir en este caso el haz reinyectado, tiene una integral B inferior a 3.

La invención se refiere asimismo a un sistema de generación de un impulso láser de duración reducida que comprende un primer dispositivo tal como el descrito anteriormente y un segundo dispositivo tal como el descrito anteriormente y en el que el haz de salida del primer dispositivo que proporciona el impulso láser de duración reducida se utiliza para proporcionar el haz de entrada en el segundo dispositivo.

El sistema puede, además, comprender medios de filtración dispuestos para filtrar espacialmente el haz de salida del primer dispositivo para generar un haz filtrado utilizado como haz de entrada en el segundo dispositivo. Tales medios de filtración permiten especialmente asegurar que el haz incidente sobre la lámina transparente del segundo dispositivo tiene una integral B inferior a 3.

La invención se refiere asimismo a un procedimiento para generar un impulso láser de duración reducida que comprende las etapas que consisten en:

- generar un haz láser de entrada que proporciona un impulso láser de entrada de la longitud de onda  $\lambda$ , teniendo el haz láser de entrada una densidad de potencia superior a  $10^{11}$  vatios por centímetro cuadrado sobre la lámina;

- transmitir el haz láser de entrada hacia una lámina transparente que comprende un material no lineal dispersivo para que la lámina ensanche el espectro del impulso láser de entrada por auto-modulación de fase para generar un impulso láser de espectro ensanchado;

- comprimir el impulso láser de espectro ensanchado para generar el impulso láser de duración reducida;

estando caracterizado el procedimiento porque el haz láser de entrada es espacialmente uniforme sobre la lámina y

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l n_2(z) \cdot I(z) dz$$

porque la integral de rotura es inferior a tres cuando atraviesa la lámina transparente, siendo  $n_2(z)$  el índice de refracción de la lámina transparente, siendo  $l$  el espesor de la lámina transparente, siendo  $I(z)$  la densidad de superficie de potencia del haz de entrada y donde  $z$  es según la dirección del haz a la travesía de la lámina transparente.

Se describen ahora modos de realización de la invención con referencia a las figuras anexas en las que:

- la figura 1 representa esquemáticamente un dispositivo de generación de un impulso láser de duración reducida

según un primer modo de realización de la invención;

- las figuras 2a a 2d representan el perfil espacial y espectral del impulso láser de entrada y del impulso láser de espectro ensanchado en un dispositivo según la invención;

5 - la figura 3 representa esquemáticamente un dispositivo de generación de un impulso láser de duración reducida según un segundo modo de realización de la invención;

10 - la figura 4 representa la distribución en longitud de onda de un impulso de entrada y de un impulso de espectro ensanchado según la invención;

- la figura 5 representa la anchura espectral a media altura de un impulso de espectro ensanchado en un dispositivo según la invención;

15 - la figura 6 representa la duración de un impulso de entrada y de un impulso de duración reducida en un dispositivo según la invención;

- la figura 7 representa un sistema que comprende una cadena de dispositivos tales como los descritos con referencia a las figuras 1 a 6;

20 - la figura 8 representa medios de filtración utilizados en un sistema que comprende una cadena de dispositivos tales como los descritos con referencia a las figuras 1 a 6.

En las figuras, las referencias numéricas idénticas se refieren a elementos técnicos del mismo tipo.

25 Como se ilustra en la figura 1, un dispositivo 1 de generación de un impulso láser de duración reducida según la invención comprende un láser ultra-intenso de femtosegundo 2. El láser ultra-intenso de femtosegundo 2 es por ejemplo un láser de amplificación de deriva de frecuencia asimismo denominado láser CPA, por «Chirped Pulse Amplificación». El principio de funcionamiento de tal láser CPA por estirado temporal, amplificación y recompresión es bien conocido.

El láser 2 genera un haz láser 3 que proporciona un impulso láser denominado impulso de entrada. La duración del impulso láser es por ejemplo de 30 femtosegundos.

35 El haz láser 3 es espacialmente uniforme, es decir que tiene una forma espacial en escalón. Esta forma espacial en escalón es asimismo denominada «top hat» en inglés. Para un láser 2 de fuerte energía, típicamente superior al Julio, el haz láser 3 en salida del láser 2 es de amplitud espacial uniforme, lo que evita tener que uniformizar un haz no uniforme y en consecuencia, perder una parte de la energía de este haz.

40 El haz láser 3 es colimado y transmite hacia una lámina 4 que comprende un material no lineal, por ejemplo sílice SiO<sub>2</sub> o de vidrio. La lámina 4 es transparente a las longitudes de onda en el espectro del impulso de entrada.

45 El láser 2 es tal que el haz láser 3 tiene una densidad de potencia superior a 10<sup>11</sup> W.cm<sup>-2</sup> en la lámina 4, estando la densidad de potencia definida como la energía del impulso de entrada, dividida por el producto de la duración del impulso de entrada y de la superficie del haz láser 3 en su entrada sobre la lámina 4.

50 Pa tal densidad de potencia, la no-linealidad del material de la lámina 4 induce un efecto de auto-modulación de fase que se produce en la lámina 4. Este efecto de auto-modulación de fase ensancha el espectro del impulso de entrada por la creación de nuevas longitudes de onda. El haz 5 en salida de la lámina 4 es por lo tanto un haz impulsional con impulsos que tiene un espectro ensanchado respecto del espectro del impulso de entrada del haz de entrada 3.

El impulso de entrada 3 y el impulso de espectro ensanchado 5 están representados espacialmente y espectralmente más en detalle a continuación con referencia a las figuras 2a a 2d.

55 El material que constituye la lámina 4 es asimismo un material dispersivo de dispersión positiva para generar, además del ensanchamiento espectral del impulso, un estirado temporal del impulso por dispersión de las velocidades de grupo del impulso.

El orden de magnitud z<sub>0</sub> del espesor de la lámina se obtiene mediante las siguientes fórmulas:

60

$$z_0 = \frac{t_0^2}{C}$$

donde t<sub>0</sub> es la duración inicial del impulso y la magnitud C es dada por la siguiente expresión:

$$C = \frac{\lambda D(\lambda)}{0,322 \cdot \pi^2 \cdot c^2}$$

con  $D(\lambda)$  la dispersión en el material en función de  $\lambda$ , la longitud de onda del haz y  $c$  la celeridad en el vacío.

5 Por ejemplo,

para  $\lambda = 1$  micrómetro, se obtiene  $C = 0,031 \text{ m}^{-1} \cdot \text{ps}^2$ ,

para  $\lambda = 800$  nanómetros, se obtiene  $C = 0,080 \text{ m}^{-1} \cdot \text{ps}^2$ .

10 En la práctica, el espesor de la lámina puede asimismo obtenerse por simulación resolviendo la ecuación de Schrödinger no lineal.

15 El haz de entrada 3 tiene una integral B inferior a tres cuando atraviesa la lámina transparente 4. Es conocido que la integral B de un haz láser de longitud de onda  $\lambda$  tiene la travesía en la dirección z de un medio de espesor l que tiene un índice de refracción no lineal  $n_2(z)$  y una densidad de potencia  $I(z)$  se define como sigue:

$$\text{Integral de rotura } B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l n_2(z) \cdot I(z) dz$$

20 El valor de la integral B es importante para un haz láser de alta energía, puesto que para estos haces, la intensidad es tal que efectos no lineales se acumulan aun más a medida que avanza el impulso en la lámina. Para un valor de la integral B inferior a 3, se ha constatado que la deformación espacial era relativamente insignificante.

25 El valor de la integral B es preferentemente elegido entre dos y tres para obtener un factor de reducción del impulso entre dos y tres.

30 Los impulsos de espectro ensanchado 5 se transmiten a continuación hacia un compresor 6 para reducir la duración del impulso. El compresor 6 está por ejemplo constituido por espejos chirpeados, asimismo denominados espejos de dispersión controlada tales como los utilizados en los láseres CPA. Estos espejos chirpeados son preferentemente utilizados en el compresor 6 debido a su buen umbral de daño, a su eficacia y a su simplicidad.

Redes ópticas, denominadas en inglés «gratings», pueden asimismo utilizarse para realizar la compresión.

35 En salida del compresor 6, se obtiene un impulso denominado impulso de duración reducida 7. La duración de este impulso es en efecto reducida respecto de la duración del impulso de entrada 3.

40 Gracias a este dispositivo, se obtiene un factor de compresión de algunas unidades, típicamente dos o tres para hacer pasar por ejemplo la duración de impulso de una treintena de femtosegundos a una decena de femtosegundos.

45 Esta reducción de duración está limitada por la deformación espacial del impulso. Para una reducción de la duración de impulso simplemente del orden de dos o tres, se evitan los inconvenientes de esta deformación, entre los que se encuentra la amplificación importante de las frecuencias espaciales debidas al ruido que puede dañar los materiales debido a la sobreintensidad.

50 Se observa finalmente que la propagación de los impulsos es libre, es decir no guiada en el dispositivo 1 según la invención, de manera que la energía de los impulsos utilizados no está limitada por condicionantes debidos al guiado, especialmente por fibras ópticas. La invención proporciona por lo tanto una alternativa muy ventajosa para el ensanchamiento espectral realizado de manera clásica por fibras ópticas no lineales, como en la publicación de Schenkel y col. mencionada anteriormente.

Las figuras 2a a 2d representan esquemáticamente el impulso de entrada 3 y el impulso de espectro ensanchado 5.

55 La figura 2a representa la distribución espacial del haz de entrada 3. Como se ilustra en la figura 2a, el haz de entrada 3 es espacialmente uniforme, es decir según un perfil en forma de escalón en el diámetro d del haz. Según la invención, este haz 3 espacialmente uniforme en su diámetro, se transmite sobre la lámina 4.

60 La figura 2c representa la distribución espacial del haz impulsional de espectro ensanchado 5 en salida de la lámina 4. Como se ilustra en la figura 2c, el haz 5 es asimismo espacialmente uniforme, es decir que tiene un perfil en forma de escalón sobre el diámetro d del haz.

5 La figura 2b representa la distribución espectral del haz impulsional de entrada 3. La anchura espectral del impulso es  $\Delta\lambda_1$ . La figura 2d representa la distribución espectral del haz impulsional de espectro ensanchado 5. La anchura espectral del impulso de espectro ensanchado es  $\Delta\lambda_2$  que es superior a  $\Delta\lambda_1$  debido al efecto de auto-modulación en el material no lineal anteriormente descrito.

Se describe ahora un segundo modo de realización de la invención con referencia a la figura 3.

10 En la figura 3, el dispositivo 1 de generación de un impulso láser de duración reducida comprende un láser del tipo CPA 2 que emite un haz láser 8 a una frecuencia de 100 Hz. Después de la compresión, el impulso asociado a este haz tiene una energía de 13 milijulios, una anchura espectral de 19 nanómetros y una duración de 55 femtosegundos limitada por la distorsión de fase (1,3 veces el límite de Fourier). El dispositivo 1 comprende además un filtro espacial 9 constituido por un diafragma 9 de 11 milímetros de diámetro. El haz 8 se transmite a través del diafragma 9.

15 El filtro espacial 9 está destinado a seleccionar la parte central espacialmente uniforme del haz 8 para generar un haz láser de entrada 3 espacialmente uniforme. En efecto, la energía del haz láser 8 (13 milijulios como se ha mencionado anteriormente), no es suficiente en este modo de realización para obtener directamente un haz espacialmente uniforme.

20 En salida del diafragma 9, el haz de entrada 3 es espacialmente uniforme y tiene una energía de 9 milijulios, para una densidad de potencia aproximadamente igual a 0,17 Teravatios por centímetro cuadrado ( $0,17 \text{ TW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ).

25 El haz de entrada 3 es colimado hacia una lámina 4 de sílice,  $\text{SiO}_2$ , de 22 milímetros de espesor que actúa como medio no guiado no lineal para generar un impulso de espectro ensanchado 5.

30 Veinte por ciento de la energía del haz 5 es transmitido a continuación hacia una línea 6 de prismas de compresión de sílice,  $\text{SiO}_2$ , para comprimir el impulso de espectro ensanchado 5 para obtener en salida del compresor 6 un impulso 7 de duración reducida.

35 La figura 4 ilustra la repartición espectral normalizada en función de la longitud de onda en nanómetros, para el impulso de entrada 3 y el impulso de espectro ensanchado 5. Esta figura permite observar nuevas longitudes de onda creadas por el efecto de automodulación debido a las no-linealidades en la lámina de sílice 4. El espectro del impulso de entrada 3 tiene una anchura a media altura de 19 nanómetros mientras que el espectro del impulso de espectro ensanchado tiene una anchura a media altura de 38 nanómetros.

40 La figura 5 representa la anchura espectral a media altura del impulso de espectro ensanchado 5 en función de la distancia al centro del haz impulsional 5. Esta figura ilustra la buena uniformidad espacial del efecto de ensanchamiento espectral para todo el haz.

45 La figura 6 representa de manera normalizada el impulso de entrada 3 y el impulso de duración reducida 7, es decir el impulso obtenido en salida del compresor 6, en función del tiempo, en femtosegundos.

En esta figura, la duración a media altura del impulso de entrada es de 55 femtosegundos, mientras que la duración a media altura del impulso de duración reducida es de 33 femtosegundos.

De ello resulta una buena reducción de la duración de impulso para una energía de entrada relativamente elevada.

50 El dispositivo 1 según la invención puede utilizarse con láseres intensos del orden del centenar de Julios. Para estos láseres, una duración de impulso del orden de 15 femtosegundos puede obtenerse en salida del dispositivo 1.

55 Como se ilustra en la figura 7, según un modo de realización de la invención, un sistema 10 comprende un dispositivo 1 tal como se ha descrito anteriormente que genera en salida un haz 7 de impulso de duración reducida. El sistema comprende, además, medios 11 para filtrar espacialmente el haz 7 para generar un haz filtrado 12.

Estos medios de filtración 11 se describen más en detalle en la figura 8 y comprenden por ejemplo una primera lente 13 que focaliza el haz en un diafragma 14 y una segunda lente 15 para recolimar el haz filtrado 12.

60 El haz filtrado 12 se utiliza entonces como haz de entrada 3 en un dispositivo 1' de generación de un impulso láser de duración reducida tal como se ha descrito anteriormente con referencia a las figuras 1 a 6.

65 Más en general, varios dispositivos de generación de un impulso láser de duración reducida tales como se han descrito anteriormente en las figuras 1 a 6 pueden utilizarse en un sistema en cascada para obtener, en salida del sistema, una duración de impulso aún más reducida.

Entre los diferentes dispositivos del sistema en cascada, se posicionan preferentemente medios 11 para filtrar

especialmente el haz de salida y generar un haz filtrado 12 utilizado como haz de entrada para el siguiente dispositivo para que este haz de entrada tenga una integral B inferior a 3.

5 En efecto, en ausencia de estos medios de filtración, se ha constatado que el haz de salida del primer dispositivo según la invención podía tener una integral B demasiado importante para ser directamente inyectado en una lámina transparente.

10 Gracias a este sistema en cascada, es por ejemplo posible obtener una reducción de la duración de impulso de un factor nuevo, con dos dispositivos en cascada y entre estos dispositivos, medios de filtración 11 tales como se han descrito anteriormente.

El sistema en cascada se puede utilizar en transmisión, pero asimismo en reflexión, gracias a espejos. Tal reflexión permite reinyectar el haz de salida en la lámina transparente 4, lo que permite especialmente utilizar la misma lámina transparente 4 para varias pasadas del haz. Este modo de realización permite obtener un dispositivo más compacto.

**REIVINDICACIONES**

1.- Dispositivo (1) de generación de un impulso láser de duración reducida (7) que comprende:

- 5 - medios de generación de un haz láser de entrada (3) que proporciona un impulso láser de entrada de la longitud de onda  $\lambda$ ;
- una lámina transparente (4) que comprende un material no lineal dispersivo que tiene un índice de refracción no lineal;
- 10 - estando los medios de generación de un haz láser de entrada (3) adaptados para que el haz láser de entrada (3) tenga una densidad de potencia superior a  $10^{11}$  vatios por centímetro cuadrado en la lámina para que la lámina ensanche el espectro del impulso láser de entrada por auto-modulación de fase para generar un impulso láser de espectro ensanchado (5);
- 15 - medios de compresión (6) dispuestos para comprimir el impulso láser de espectro ensanchado para generar el impulso láser de duración reducida (7),

estando caracterizado el dispositivo porque los medios de generación de un haz láser de entrada (3) están adaptados para que el haz de entrada (3) sea espacialmente uniforme en amplitud en la lámina transparente (4) y

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l n_2(z) \cdot I(z) dz$$

para que la integral de rotura del haz sea inferior a tres cuando atraviesa la lámina transparente (4), siendo  $n_2(z)$  el índice de refracción de la lámina transparente, siendo  $l$  el espesor de la lámina transparente, siendo  $I(z)$  la densidad de superficie de potencia del haz de entrada (3) y donde  $z$  es según la dirección del haz a la travesía de la lámina transparente.

- 25 2.- Dispositivo según la reivindicación anterior en el que los medios de generación de un haz láser de entrada (3) están adaptados para que la longitud de onda  $\lambda$  y/o la distribución espacial de la intensidad  $I(z)$  del haz de entrada (3) sean tales que la integral B del haz esté comprendida entre dos y tres cuando atraviesa la lámina transparente.
- 30 3.- Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el haz láser está colimado hacia la lámina transparente.
- 4.- Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores en el que los medios de compresión comprenden al menos un espejo chirpeado o una red de compresión de impulso.
- 35 5.- Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores en el que la lámina es una lámina de sílice  $\text{SiO}_2$ .
- 6.- Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores en el que la lámina es una lámina de vidrio.
- 40 7.- Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores en el que los medios de generación de un haz láser de entrada (3) comprenden un láser de amplificación de deriva de frecuencia.
- 8.- Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que los medios de generación de un haz láser de entrada (3) comprenden un filtro espacial constituido por un diafragma y situado entre el láser y la lámina transparente para uniformizar un haz láser para proporcionar, en salida del filtro espacial, el haz láser de entrada (3) espacialmente uniforme sobre la lámina.
- 45 9.- Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, medios dispuestos para reinyectar el haz de salida que proporciona el impulso láser de duración reducida hacia la lámina transparente (4).
- 50 10.- Dispositivo según la reivindicación anterior que comprende, además, medios de filtración espacial dispuestos para filtrar el haz de salida que proporciona el impulso láser de duración reducida antes de su reinyección en la lámina transparente (4).
- 55 11.- Sistema (10) de generación de un impulso láser de duración reducida que comprende un primer dispositivo (1) según una de las reivindicaciones anteriores y un segundo dispositivo (1') según una de las reivindicaciones anteriores y en el que el haz de salida del primer dispositivo que proporciona el impulso láser de duración reducida se utiliza para proporcionar el haz de entrada en el segundo dispositivo.
- 60 12. Sistema de generación de un impulso láser de duración reducida según la reivindicación 11 que comprende, además, medios de filtración (11) dispuestos para filtrar espacialmente el haz de salida del primer dispositivo para generar un haz filtrado (12) utilizado como haz de entrada en el segundo dispositivo.

13. Procedimiento para generar un impulso láser de duración reducida (7) que comprende las etapas que consisten en:

5 - generar un haz láser de entrada (3) que proporciona un impulso láser de entrada de la longitud de onda  $\lambda$ , teniendo el haz láser de entrada (3) una densidad de potencia superior a  $10^{11}$  vatios por centímetro cuadrado en la lámina;

10 - transmitir el haz láser de entrada hacia una lámina transparente (4) que comprende un material no lineal y dispersivo para que la lámina ensanche el espectro del impulso láser de entrada por auto-modulación de fase para generar un impulso láser de espectro ensanchado (5);

- comprimir el impulso láser de espectro ensanchado para generar el impulso láser de duración reducida;

estando el procedimiento caracterizado porque el haz láser de entrada (3) es espacialmente uniforme en amplitud

15 sobre la lámina (4) y porque la integral de rotura  $B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l n_2(z) \cdot I(z) dz$  es inferior a tres cuando atraviesa la lámina transparente (4), siendo  $n_2(z)$  el índice de refracción de la lámina transparente, siendo  $l$  el espesor de la lámina transparente, siendo  $I(z)$  la densidad de superficie de potencia del haz de entrada (3) y donde  $z$  es según la dirección del haz a la travesía de la lámina transparente.

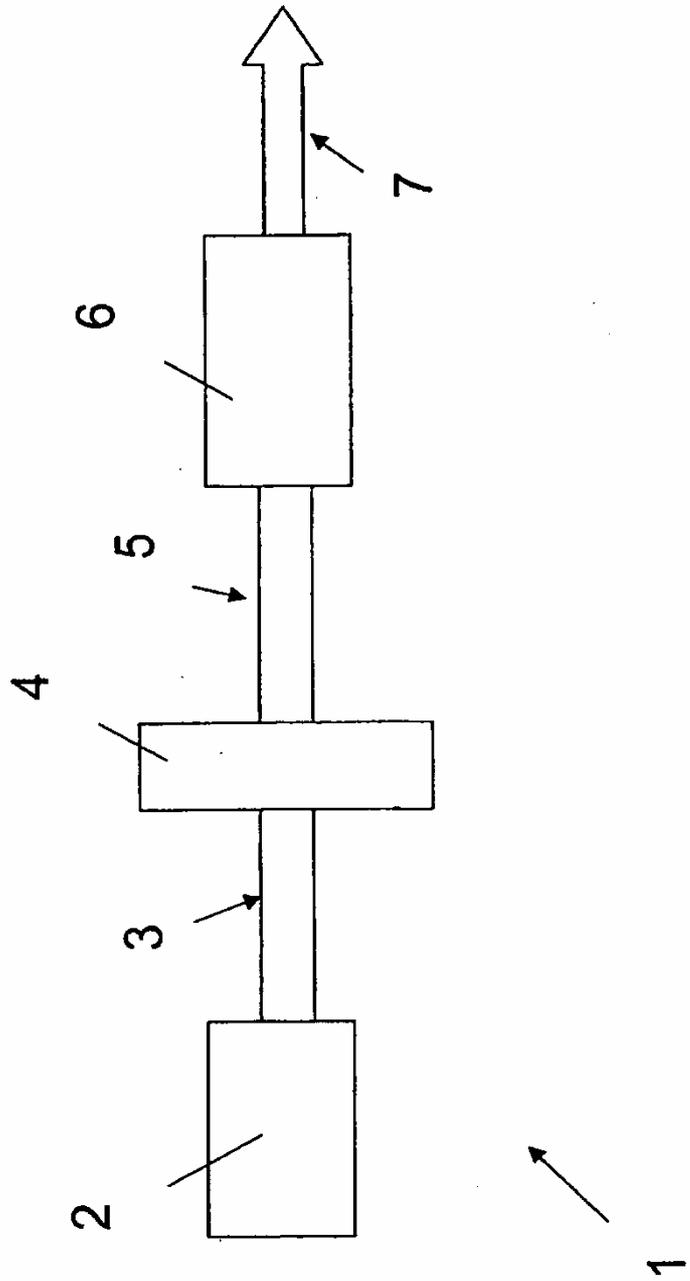
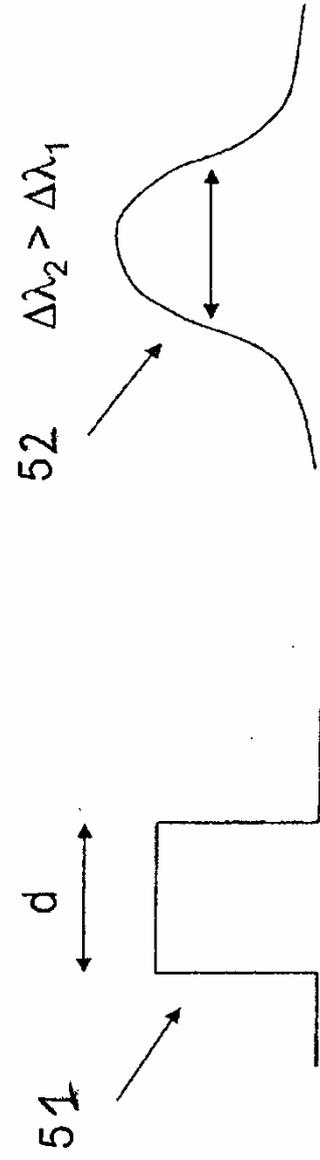
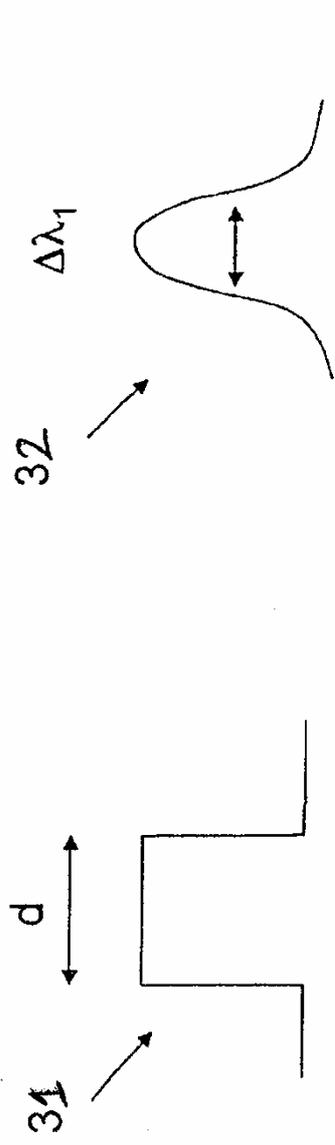


FIG. 1



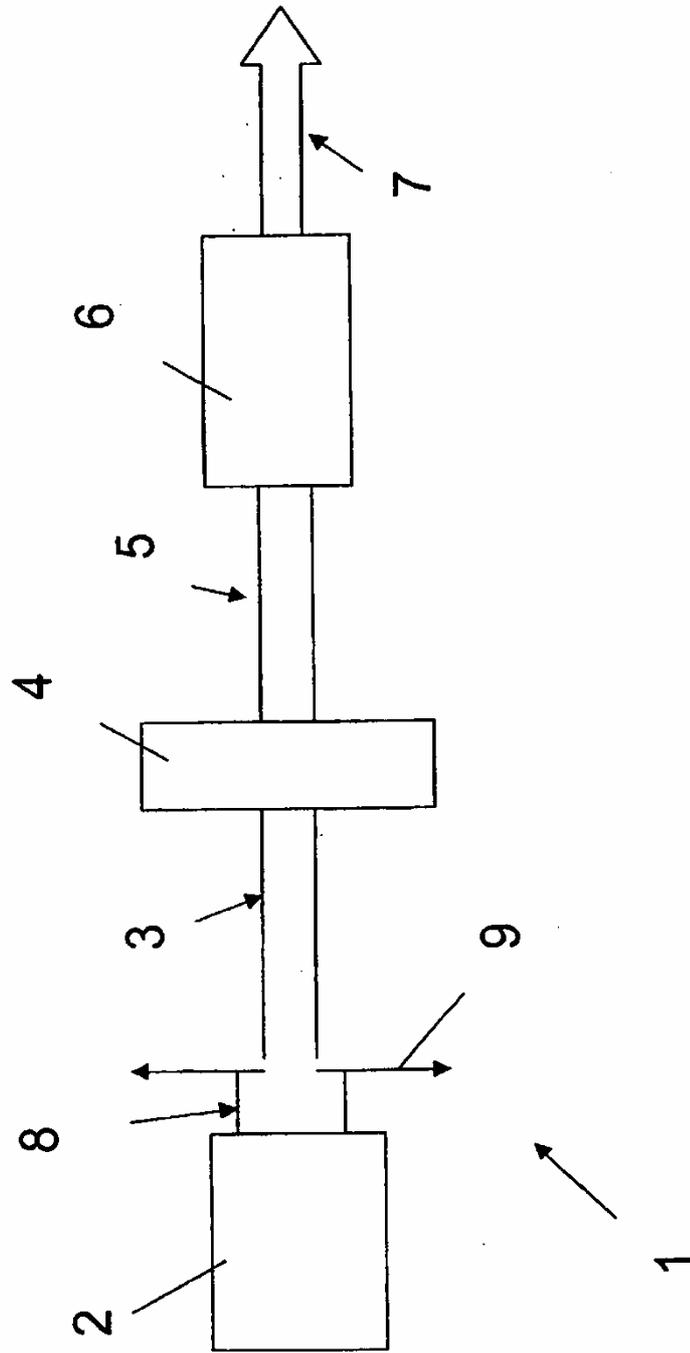


FIG. 3

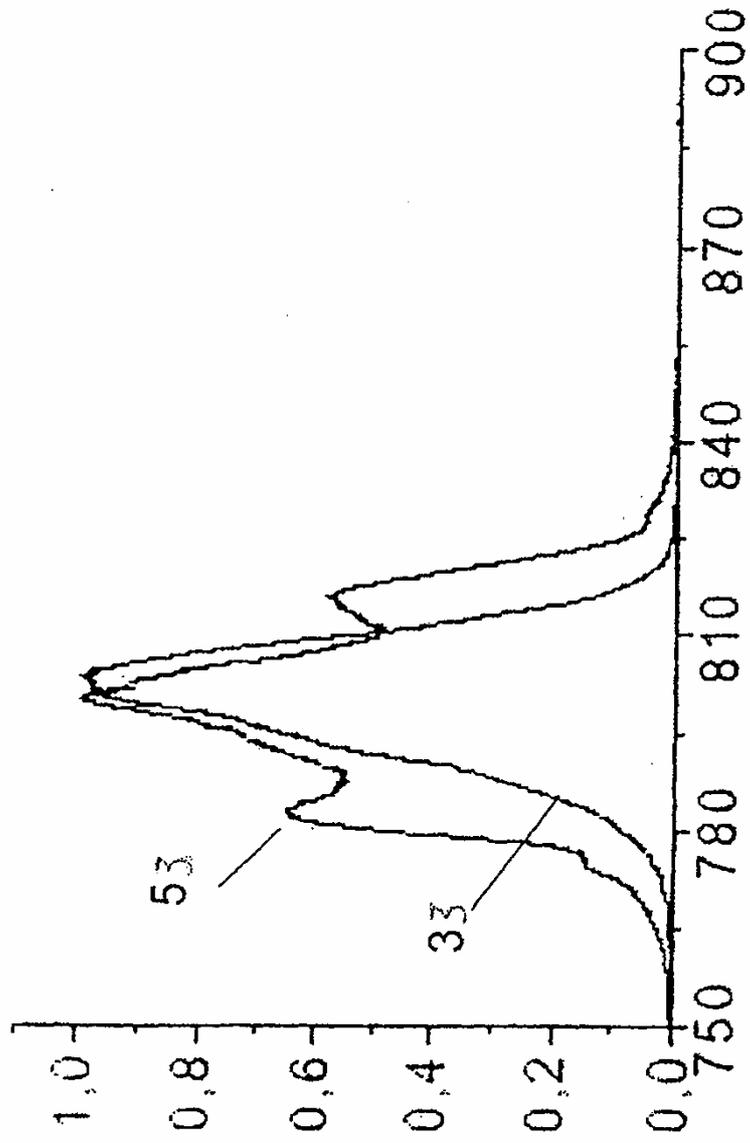


FIG. 4

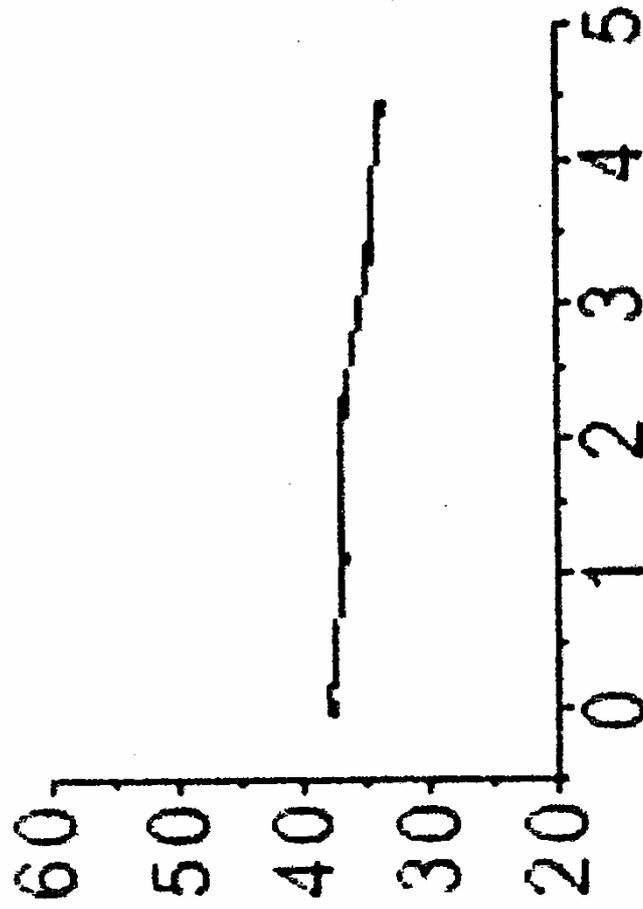


FIG. 5

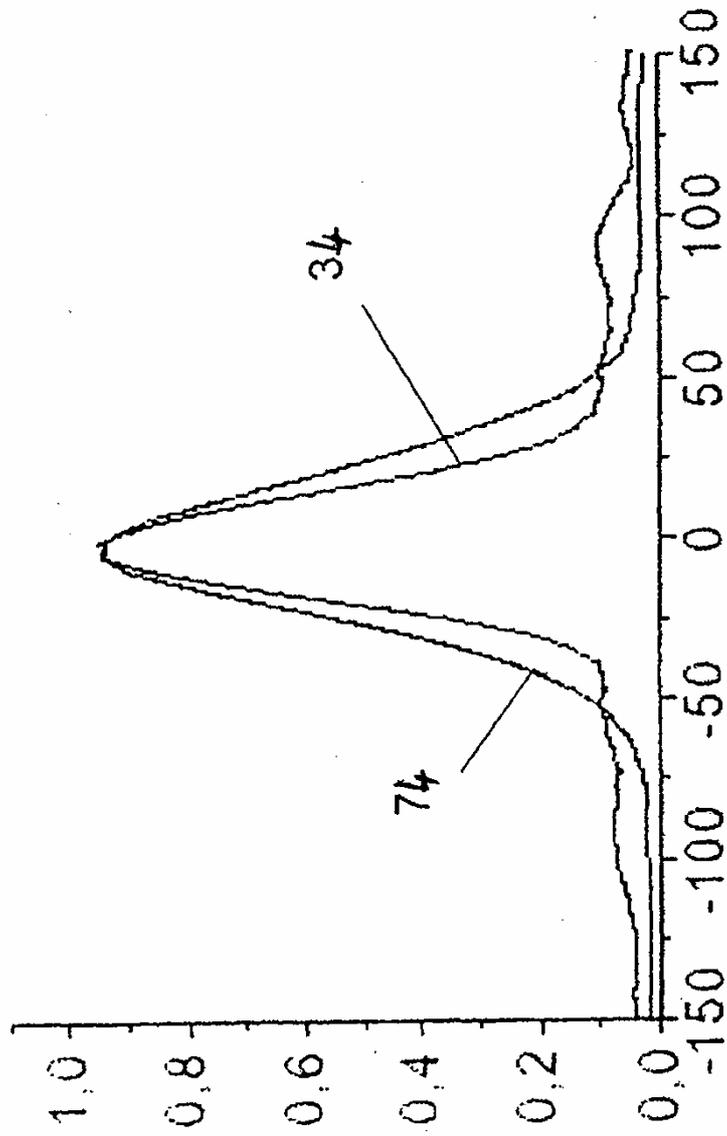


FIG. 6

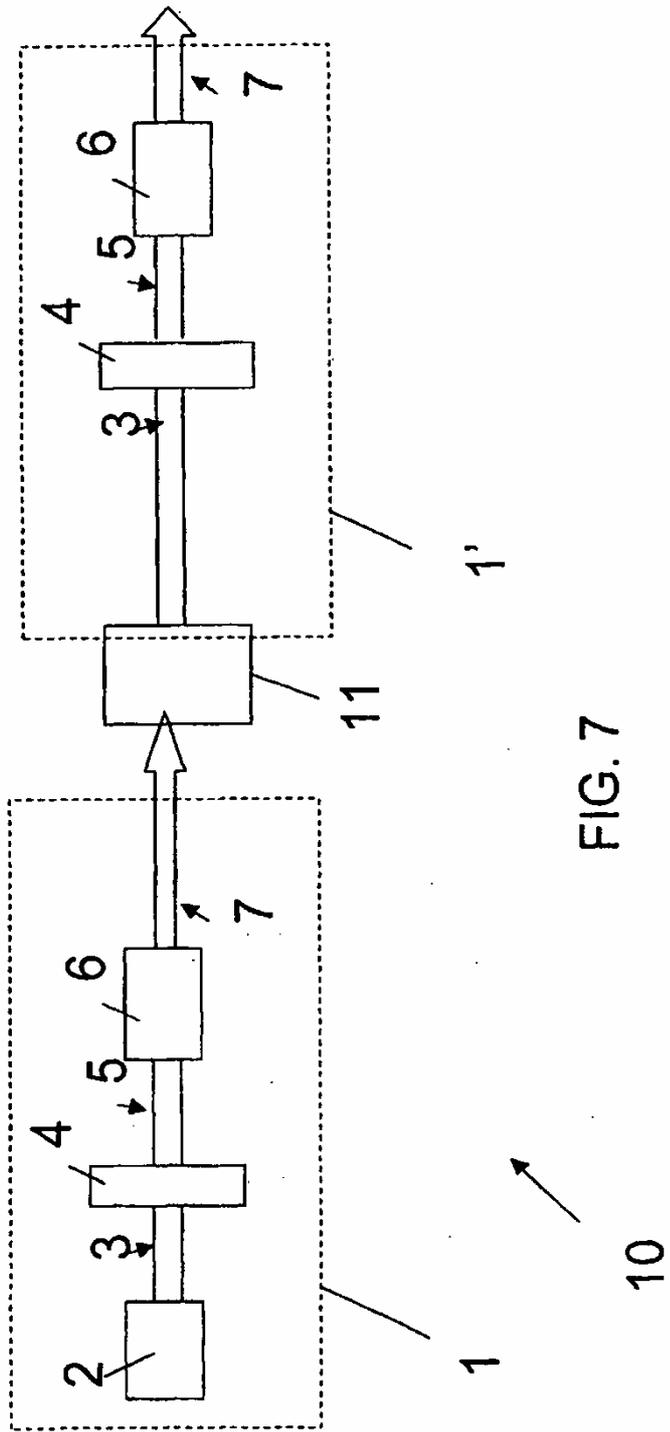


FIG. 7

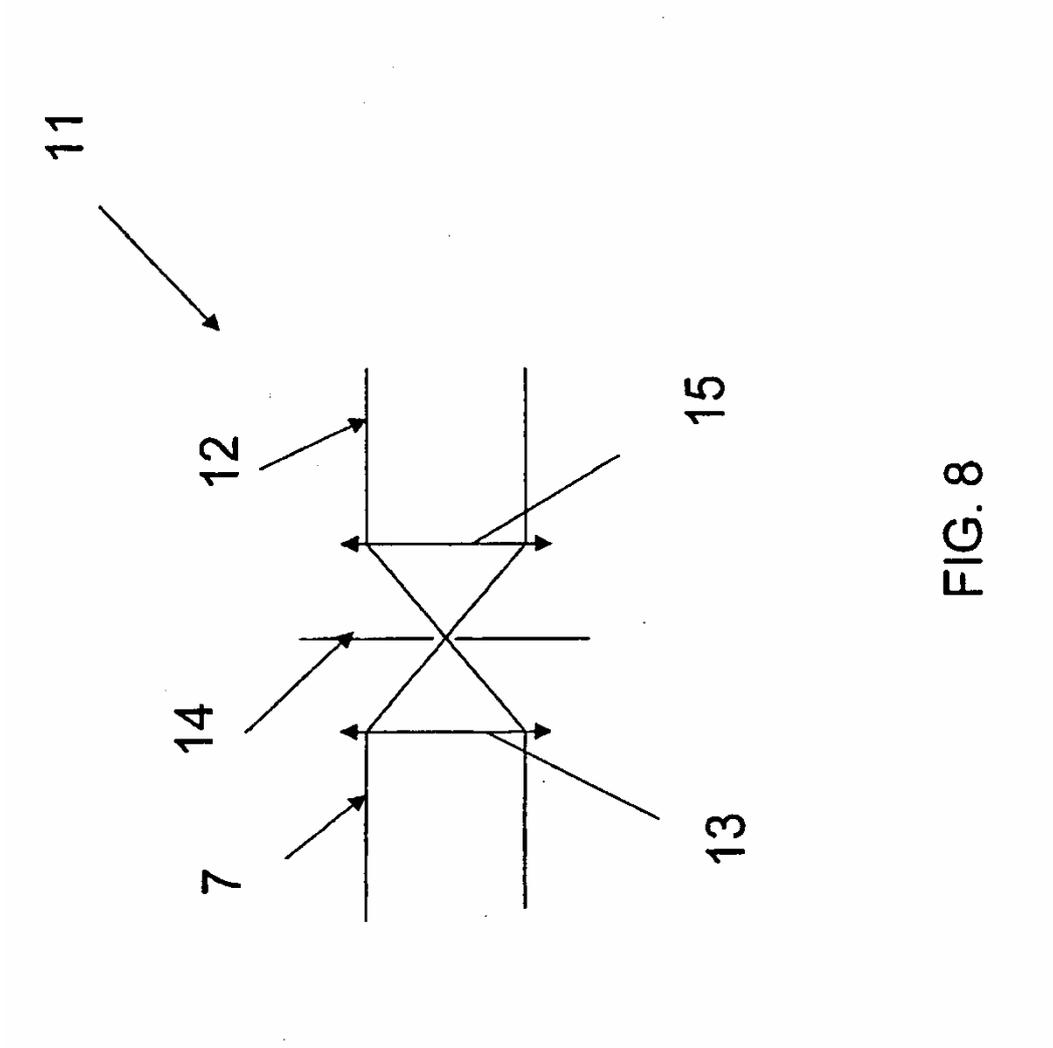


FIG. 8