



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 363 173**

51 Int. Cl.:  
**B23K 26/38** (2006.01)  
**B23K 26/06** (2006.01)  
**B23K 26/14** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07731503 .4**  
96 Fecha de presentación : **22.01.2007**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2004360**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **24.12.2008**

54 Título: **Procedimiento de corte con un láser que tiene al menos una fibra a base de iterbio con control al menos de la potencia de la fuente de láser, del diámetro del haz focalizado y del factor calidad del haz.**

30 Prioridad: **03.02.2006 FR 06 50382**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**22.07.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**22.07.2011**

73 Titular/es: **L'Air Liquide, Société Anonyme pour l'Etude et l'Exploitation des Procédés Georges Claude**  
**75, quai d'Orsay**  
**75007 Paris, FR**  
**AIR LIQUIDE WELDING FRANCE**

72 Inventor/es: **Briand, Francis;**  
**Chouf, Karim;**  
**Maazaoui, Hakim y**  
**Verna, Eric**

74 Agente: **Justo Bailey, Mario de**

ES 2 363 173 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

- 5 Procedimiento de corte con un láser que tiene al menos una fibra a base de iterbio con control al menos de la potencia de la fuente de láser, del diámetro del haz focalizado y del factor calidad del haz
- 10 La invención se refiere a un procedimiento de corte mediante haz láser de una pieza que va a cortarse según el preámbulo de la reivindicación 1 (véase, por ejemplo, el documento DE-A-102004 024475), usando una fuente de láser de tipo fibra a base de iterbio.
- 15 El corte mediante haz láser usando una fuente de láser de tipo CO<sub>2</sub>, para generar un haz láser de longitud de onda igual a 10,6 μm, de una potencia que va hasta 6 kW, está actualmente muy extendido en la industria dado que ese tipo de fuente proporciona buenas características de haz, a saber un buen factor de calidad (M<sup>2</sup>, BPP...) y un buen reparto espacial de la energía (TEM01\*).
- 20 Con esas fuentes de láser de tipo CO<sub>2</sub> es posible cortar metales y sus aleaciones, tales como aluminio y sus aleaciones, acero inoxidable, acero al carbono, acero blando..., o cualquier otro material no metálico, tal como madera, cartón, cerámicas.
- 25 No obstante, las velocidades de corte que pueden obtenerse y la calidad de corte que se obtiene como resultado son muy variables según el material que va a cortarse y, por otro lado, según los parámetros del procedimiento de corte adoptados, tales como la naturaleza del gas de asistencia, el diámetro del haz focalizado y la potencia del láser incidente. Además, el camino óptico debe mantenerse imperativamente en una atmósfera inerte para evitar cualquier contaminación y conservar un medio de índice óptico constante necesario para la buena propagación del haz.
- 30 Para intentar aliviar esos problemas, se ha propuesto usar para el corte con láser, dispositivos láser de tipo Nd:YAG. En este caso, el resonador que genera el haz contiene un medio amplificador sólido, que es una barra de neodimio (Nd), y el haz así obtenido se transporta a continuación hasta el cabezal de focalización mediante una fibra óptica.
- 35 No obstante, esta solución tampoco es satisfactoria en el plano industrial ya que proporciona malos resultados en cuanto a la calidad y la velocidad de corte, no sólo debido al hecho de factores de calidad (BPP) del haz inadecuados para el corte con láser sino también a un reparto transversal de la energía en el haz no gaussiano sino en almena (denominado "top hat" en inglés), incluso aleatorio más allá del punto de focalización.
- 40 Por otro lado, el documento DE-A-102004024475 describe un procedimiento de corte mediante láser de iterbio a una longitud de onda de 1115 a 1125 nm y a una potencia de menos de 200 W de elementos semiconductores que tienen un espesor que va hasta 600 μm.
- 45 El documento US-A-2003/199859 se refiere a un sistema de láser con impulsos cortos, concretamente con amplificador de tipo Yb:YAG que puede producir impulsos de láser de una duración que va de 0,05 a menos de 10 picosegundos y con un ancho de banda de 1,5 a 35 nm para proporcionar un tamaño de punto de 0,406 mm de diámetro.
- 50 Además, el documento US-A-7369582 enseña un amplificador de láser de fibra de iterbio de alta potencia con longitud de onda láser de entre 1060 y 1100 nm, con una potencia de al menos 500 W y que tiene una calidad de haz muy limitada en cuanto a la difracción (M<sup>2</sup><1,5), mientras que el documento US-A-6723090 se refiere a un dispositivo de láser de iterbio que también tiene una calidad de haz aún más limitada en cuanto a la difracción (M<sup>2</sup><1,05).
- 55 Finalmente, el documento US-A-6181463 también describe un amplificador de láser de fibra para convertir las pulsaciones de baja intensidad en pulsaciones ultracortas de alta energía.
- 60 El problema que se plantea es entonces proponer un procedimiento de corte mediante haz láser mejorado, que no presente los inconvenientes y las limitaciones mencionados anteriormente, y que pueda permitir alcanzar, según el espesor considerado, velocidades que van hasta de 15 a 20 m/min, incluso más elevadas, y una buena calidad de corte, es decir caras de corte rectas, sin rebaba, con una rugosidad limitada.
- 65 La solución de la invención es entonces un procedimiento de corte mediante haz láser, en el que se usan medios de generación de haz láser que comprenden al menos una fibra que contiene iterbio para generar un haz láser que sirve para fundir la pieza y para realizar de ese modo el corte propiamente dicho.
- Más precisamente, la invención se refiere a un procedimiento de corte mediante haz láser de una pieza que va a cortarse, en el que se usan medios de generación de haz láser que comprenden al menos una fibra que contiene iterbio que tiene una longitud de onda de entre 1 y 4 μm para generar el haz láser de una potencia comprendida entre 0,1 y 40 kW.
- Según la invención, el haz láser se selecciona de manera que presenta:

- una densidad de potencia de entre 1,5 y 20 MW/cm<sup>2</sup>,
- un diámetro de haz focalizado de entre 0,1 mm y 0,50 mm, y
- un factor de calidad (BPP) de entre 2 y 8 mm·mrad.

5

Además, según la invención, los medios de generación de haz láser comprenden al menos un elemento excitador, preferiblemente varios elementos excitadores, que actúan conjuntamente con al menos un elemento excitado, también denominado medio amplificador, para generar el haz láser. Los elementos excitadores son preferiblemente varios diodos láser, mientras que el o los elementos excitados es o son una o preferiblemente varias fibras con núcleo de iterbio, preferiblemente de sílice.

10

Además, en el marco de la invención, se usan de manera indistinta las expresiones “medios de generación de haz láser” y “resonador”. Este tipo de fuente de láser se denomina habitualmente fuente de láser “de fibra” o “de fibra de iterbio” ya que su medio amplificador es una red de fibras ópticas particulares cuyo núcleo o centro es a base de iterbio.

15

Según el caso, el procedimiento de la invención puede comprender una o varias de las siguientes características:

20

- la (o las) fibra(s) está(n) formada(s) por un núcleo dopado con iterbio recubierto de sílice.
- el haz láser generado por la fibra a base de iterbio tiene una longitud de onda de entre 1,04 y 3 μm, preferiblemente entre 1,07 y 1,1 μm, preferiblemente igual a 1,07 μm.

25

- el haz láser tiene una potencia comprendida entre 0,5 y 15 kW.
- el haz láser es continuo o pulsado, preferiblemente continuo.

30

- la velocidad de corte está comprendida entre 0,1 y 20 m/min, preferiblemente de 1 a 15 m/min.
- el gas de asistencia del haz láser se elige de nitrógeno, helio, argón, oxígeno, CO<sub>2</sub> y sus mezclas, y eventualmente contiene, además, uno o varios compuestos adicionales elegidos de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

35

- más generalmente, la presión de gas de asistencia está comprendida entre aproximadamente 0,1 bares y 25 bares, y se elige en función del espesor que va a cortarse.
- el diámetro del orificio de inyección del gas está comprendido entre 0,5 y 5 mm, normalmente entre 1 y 3 mm.

40

- el factor de calidad del láser (BPP) está comprendido entre 2 y 6 mm·mrad.
- el diámetro de haz focalizado está comprendido entre 0,13 mm y 0,40 mm.

45

- el haz láser tiene un valor de longitud de Raleigh (Zr) comprendido entre 1 y 10 mm, preferiblemente entre 2 y 7 mm.

50

- se pone en práctica el haz según una abertura angular ( $\theta$ ) comprendida entre 0,25 y 5°, y un ángulo ( $\alpha$ ) de entre 1,25 y 8° correspondiente al ángulo definido por el diámetro del haz láser focalizado ( $2W_0$ ) dividido entre el espesor (E) de la plancha, de tal manera que la suma de los ángulos ( $\alpha + \theta$ ) está comprendida entre 1,5 y 8°.

- la pieza que va a cortarse tiene un espesor de entre 0,25 y 30 mm, preferiblemente entre 0,40 y 20 mm.

55

De hecho, las principales características de la radiación láser que intervienen en el proceso de corte son la longitud de onda del láser, el factor de calidad del haz (M<sup>2</sup>, K, BPP), el diámetro del haz medido a la salida de la fuente, la potencia láser incidente, y su modo focalización en la proximidad de la superficie del material que va a cortarse.

La longitud de onda de las fuentes de láser de “fibra” de iterbio es generalmente próxima a la de los láseres de Nd:YAG, a saber del orden de 1,07 μm.

60

En general, para este tipo fuente de láser de fibra de iterbio, se usa el parámetro BPP, para “Beam Parameter Product” (producto de los parámetros de haz), para caracterizar la calidad del haz. El BPP se define como el producto del diámetro del haz en el diámetro mínimo del haz (o “waist” en inglés) por su ángulo de divergencia. El BPP se expresa en mm·mrad. Cuanto menor es el BPP, mejor es la calidad del haz.

65

Desde un punto de vista industrial, estas fuentes de láser de fibra de iterbio presentan la ventaja de propagarse

hasta el sistema de focalización a través de una fibra óptica cerca de la zona de trabajo, al tiempo que se conserva una buena calidad de haz. El diámetro del haz disponible en la salida de la fuente es entonces igual al diámetro útil de la fibra óptica que lo transporte.

5 Las potencias y los factores de calidad de esos haces son satisfactorios para el proceso de corte con láser, en particular en cuanto a la velocidad y la calidad de corte. Las potencias disponibles con este tipo de fuente están comprendidas entre 100 W y 40 kW y sus factores de calidad (BPP) varían entre 0,3 mm·mrad y 15 mm·mrad. Además, el diámetro de la fibra óptica de propagación cambia con la potencia láser que debe suministrar. Cuanto más elevada es la potencia, mayor es el diámetro de fibra.

10 Así, por ejemplo, para una potencia de 2 kW, la fibra utilizada tendrá un diámetro de 50 μm y un BPP de 2 mm·mrad, mientras que para 4 kW, su diámetro será de 100 μm y su BPP de 4 mm·mrad.

15 Por otro lado, independientemente del tipo de fuente utilizado, el haz láser procedente de la fuente debe focalizarse mediante medios de focalización, tales como una lente o un sistema óptico particular, por ejemplo espejos. Según las propiedades de la lente utilizada, las características del haz focalizado cambian, conllevando una modificación de los rendimientos de corte con láser. La elección de una lente y de su puesta en práctica para focalizar el haz forma parte de los conocimientos generales del experto en la técnica.

20 En la práctica, se hace variar el BPP de la fuente de láser de fibra jugando con el número de fibras elementales contenidas en la fuente que genera el haz láser. En efecto, cada una de las fibras elementales proporciona en general un haz monomodo con un BPP del orden de 0,3 mm·mrad. Por ello, su número y su combinación mediante "agrupamiento" proporcionan BPP diferentes. Estas fibras elementales de láser, a su vez, se inyectan en una fibra óptica de propagación mediante diferentes medios. Cuanto más importante es el diámetro de esta fibra óptica de propagación, más aumenta el BPP del haz de salida. Por tanto, para una potencia dada puede hacerse variar el BPP en un intervalo bastante grande y por tanto elegir el BPP que se desea, a saber un BPP según la invención de menos de 10 mm·mrad, preferiblemente entre 1 y 8 mm·mrad, incluso más preferiblemente entre 2 y 6 mm·mrad.

30 La focalización de este haz sobre el material que va a cortarse se realiza generalmente gracias a 2 lentes ópticas cuyas características las determina empíricamente el experto en la técnica para obtener en la pieza una mancha focal de diámetro deseado, a saber un diámetro de haz focalizado de al menos 0,1 mm. Este diámetro depende en general del diámetro de salida de la fibra de propagación, de las distancias focales elegidas y del BPP en la salida de la fibra.

35 Finalmente, la densidad de potencia media es la razón entre la potencia del haz láser y la superficie de la mancha focal obtenida con ese haz láser, por tanto depende esencialmente del diámetro de la mancha focal. Determinar estos parámetros no plantea ninguna dificultad particular para un experto en la técnica.

40 Se deduce que un haz láser focalizado siempre presenta una abertura angular ( $2\theta$ ) que se define de la siguiente manera:

$$\tan(\theta) = \frac{D/2}{F}$$

45 donde: D es el diámetro del haz incidente en la superficie de la lente y F su longitud focal, tal como se esquematiza en la figura 2.

50 Los rendimientos del proceso de corte con láser dependen directamente de la absorción de la energía láser por el material. Esta absorción es función de la naturaleza del material que va a cortarse, de las características del haz láser, concretamente de la longitud de onda, tal como se explicó anteriormente, pero también del ángulo de incidencia entre el haz, el material que va a cortarse y su polarización.

55 Así, la figura 5 presenta la evolución de la absorción de un haz láser de CO<sub>2</sub> o Nd:YAG en función de su ángulo de incidencia y de su polarización, tal como se explica en Laser with different wavelength – implication for various application; F. Dausinger; Universität Stuttgart, ECLAT 90; vol. 1: 3rd Conference on Laser Treatment of Materials; págs. 1-14.

60 La longitud de onda de 1,07 μm del láser de fibra de iterbio muy próxima a la de 1,06 μm del láser de Nd:YAG deja presagiar una absorción de energía similar a la de Nd:YAG, máxima con un ángulo de incidencia diferente al de un láser de CO<sub>2</sub>.

Durante el proceso de corte, se establece una zona de frontera estacionaria entre el metal sólido y el metal líquido, denominada "frente delantero" de corte. Este frente se establece en función de la velocidad de avance y de las

características del haz con un ángulo  $\alpha$  invariable a lo largo de todo el corte.

5 Se define el ángulo  $\alpha$  máximo, esquematizado en la figura 3, como una magnitud teórica correspondiente al ángulo alcanzado por el frente delantero de metal en fusión durante el corte, y ello a la velocidad de corte máxima elegida, de tal manera que:

$$\tan(\alpha) = \frac{2W_0}{E}$$

10 donde:  $(2.W_0)$  corresponde al diámetro mínimo del haz focalizado y E al espesor de la pieza que va a cortarse.

Cuanto más espesor (E) tiene la plancha que va a cortarse, para un haz láser dado, menor es el valor del ángulo  $\alpha$ . Cuanto mayor es la mancha focal, para un espesor de material que va a cortarse dado, más elevado es el valor del ángulo  $\alpha$ .

15 El ángulo máximo de incidencia del haz con respecto al frente delantero está definido por tanto por el ángulo  $(\alpha + \theta)$ . Este ángulo corresponde en cierto modo al ángulo del radio extremo del haz láser con el frente delantero de corte.

20 Otro aspecto importante en el proceso de corte es la capacidad de distribuir, sin gran variación, la energía láser al núcleo del espesor del material. La longitud de Raleigh, o profundidad de campo, es la distancia del "waist" en el eje de propagación del haz en la que el diámetro del haz no aumenta más del 5%.

Se considera que, en esta región, la distribución de energía no evoluciona de manera significativa y que este valor debe relacionarse con el espesor del material que va a cortarse.

25 La distancia de Raleigh  $Z_r$  puede relacionarse con el factor de calidad del haz BPP mediante la siguiente relación:

$$Z_r = \frac{W_0^2}{BPP}$$

30 en la que  $W_0$  es el diámetro del haz en el "waist".

Por tanto, resulta primordial tener en cuenta el factor de calidad y por tanto la longitud de Raleigh si se desea mejorar el procedimiento de corte.

35 Se entiende entonces que también conviene tener en cuenta el diámetro del haz láser focalizado  $\Phi$  para poder esperar mejorar el proceso de corte ya que este parámetro influye directamente sobre el ángulo  $\alpha$  y por consiguiente sobre la absorción del haz mediante la suma  $\alpha + \theta$ .

40 A partir de ahí, interesándose muy particularmente en esos diferentes parámetros, se han realizado los ensayos comparativos indicados a continuación adoptando concretamente los parámetros y las condiciones facilitadas en la siguiente tabla.

45 Durante esos ensayos, se ha usado la instalación esquematizada en la figura 1 para realizar el corte mediante haz 3 láser de una pieza 10 de acero inoxidable. Esta instalación comprende una fuente 1 de láser de 2 kW con resonador 2 o medios de generación de haz láser que comprenden una fibra de sílice con núcleo dopado con iterbio para generar un haz 3 láser con una longitud de onda de  $1,07 \mu\text{m}$ .

50 El haz 3 se propaga a través de los medios 4 de transporte de haz, tales como una fibra óptica de sílice fundida con un diámetro de  $50 \mu\text{m}$  o  $100 \mu\text{m}$ , según el caso, hasta la zona 11 de interacción entre el haz 3 y la pieza 10 en la que el haz choca con la pieza que va a cortarse y funde el material constitutivo de dicha pieza formando así progresivamente la ranura de corte mediante desplazamiento del frente delantero.

55 En la salida de esta fibra 4, el haz 3 láser presenta características ópticas particulares y un factor de calidad (BPP) de 2 ó  $4,2 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ , respectivamente ( $\pm 0,2 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ) según el diámetro de fibra considerado. A continuación se colima el haz 3 con un colimador 5 óptico equipado con un par de colimación de sílice fundida revestida de manera que se limita la divergencia del haz en la salida de la fibra y hacer que el haz láser sea paralelo.

60 A continuación el haz 3 paralelo según el principio esquematizado en las figuras 2 y 3, se focaliza sobre o en la pieza 10 que va a cortarse con un espesor E mediante una lente 6 de sílice fundida revestida con una longitud focal comprendida entre 5 mm y 7,5 mm, tal como se facilita en la siguiente tabla. Antes de chocar con la pieza 10, el haz 3 atraviesa axialmente el cabezal 5 láser equipado con una boquilla 7 que comprende un orificio 8 de salida axial situado enfrente de la pieza 10 que va a cortarse por el que pasa el haz 3 y el gas de asistencia. El orificio de la

boquilla puede estar comprendido entre 0,5 mm y 5 mm, preferiblemente entre 1 mm y 3 mm.

5 El cabezal 5 láser se alimenta, por su parte, con gas de asistencia mediante una entrada 9 de gas, por ejemplo un gas inerte tal como nitrógeno, argón, helio o una mezcla de varios de esos gases, o incluso un gas activo, tal como oxígeno por ejemplo, incluso mezclas de gas activo y de gas inerte; realizándose la elección del gas que va a usarse en función del material que va a cortarse.

10 El gas de asistencia a presión sirve para evacuar el metal en fusión fuera de la ranura 12 de corte que se forma en la pieza 10, durante el desplazamiento relativo de la pieza con respecto al cabezal 5 láser según la trayectoria de corte deseada. La solución inversa que consiste en desplazar el cabezal de corte conservando la pieza estática conduce al mismo resultado.

Los valores de los demás parámetros (Zr, BPP, ángulos...) se facilitan en la siguiente tabla.

15

Tabla

Espesor E	Longitud focal	Diámetro de fibra	$\theta$	$\alpha$	$\alpha + \theta$	Diámetro del punto focalizado	Zr	Densidad de potencia	BPP
(mm)	(mm)	( $\mu\text{m}$ )	( $^\circ$ )	( $^\circ$ )	( $^\circ$ )	(mm)	(mm)	( $\text{MW}/\text{cm}^2$ )	( $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ )
1,5	127	50	1,5	5,7	7,2	0,15	2,8	11,5	2
2	127	50	1,5	4,6	6,1	0,16	3	10	2,1
2	190,5	50	1	5,9	6,9	0,21	5,8	6	1,8
4	95,25	100	2,2	3,2	5,4	0,22	2,9	5,2	4,3
4	127	100	1,7	4	5,7	0,28	4,8	3,2	4,1
4	190,5	100	1,4	4,9	6,3	0,34	6,9	2,1	4,3
6	228,6	100	1,2	3,9	5,1	0,40	9,8	1,5	4,2

Los ensayos de corte se realizaron con piezas de acero inoxidable que tenían espesores comprendidos entre 1,5 mm y 6 mm.

20 El gas usado es nitrógeno y se inyecta en la zona de interacción del haz con la pieza a presiones variables comprendidas entre 0,6 y 25 bares, a través de una boquilla de corte láser que presenta un orificio con un diámetro de 1,5 para espesores de 1,5 y 2 y de 2 mm para espesores de 4 y 6 mm.

25 Los resultados obtenidos que han dado buenos resultados en cuanto a la calidad de corte se situaron en la figura 4. Se observa que la curva extrapolada a partir de los puntos de resultados obtenidos pone de manifiesto que existe una estrecha relación entre la suma de los ángulos ( $\alpha + \theta$ ) (en ordenadas) y el espesor (E) de la pieza que va a cortarse (en abscisas).

30 Dicho de otro modo, los resultados obtenidos muestran que el corte con una fuente de haz láser de tipo de "fibra" de iterbio, con una longitud de onda de 1,07  $\mu\text{m}$ , sólo son satisfactorios si se reúne la totalidad o parte de las siguientes condiciones:

- la potencia del haz está comprendida entre 1 y 100 kW.

35 - la densidad de potencia focalizada es de al menos 1  $\text{MW}/\text{cm}^2$ , preferiblemente está comprendida entre 1  $\text{MW}/\text{cm}^2$  y 100  $\text{MW}/\text{cm}^2$ , ventajosamente de al menos 3  $\text{MW}/\text{cm}^2$ , incluso de al menos 3,2  $\text{MW}/\text{cm}^2$ .

- el diámetro del haz láser focalizado ( $\Phi$ ) es de al menos 0,1 mm, preferiblemente de 0,15 a 0,3 mm.

40 - el factor de calidad (BPP) es inferior a 10  $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ , preferiblemente de 1,5 a 6  $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ .

- la suma de los ángulos ( $\alpha + \theta$ ) debe seguir la siguiente curva de evolución, a saber un ángulo comprendido entre 1 $^\circ$  y 8 $^\circ$ , para placas de espesores comprendidos entre 1 mm y 15 mm.

45 - la longitud de Raleigh Zr está comprendida entre 0,1 mm y 40 mm, ventajosamente, se elige un valor para Zr correspondiente al menos a la mitad del espesor E de la plancha que va a cortarse.

50 Así, a modo de ejemplo, pueden citarse los dos últimos juegos de parámetros presentados en la tabla que han facilitado cortes que presentan rebabas. El análisis muestra que no verifican los criterios mencionados anteriormente, en particular una falta de correspondencia entre el ángulo ( $\alpha + \theta$ ) y el espesor cortado, y una densidad de potencia demasiado baja.

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento de corte mediante haz (3) láser de una pieza (10) que va a cortarse, en el que se usan medios (1) de generación de haz láser que comprenden al menos una fibra que contiene iterbio que tiene una longitud de onda de entre 1 y 4  $\mu\text{m}$  para generar el haz (3) láser de una potencia comprendida entre 0,1 y 40 kW, caracterizado porque dicho haz (3) láser se selecciona de manera que presenta:
- 10 - una densidad de potencia de entre 1,5 y 20  $\text{MW}/\text{cm}^2$ ,
- un diámetro de haz focalizado comprendido entre 0,1 mm y 0,50 mm y
- un factor de calidad (BPP) de entre 2 y 8  $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ .
- 15 2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque la fibra está formada por un núcleo dopado con iterbio recubierto de sílice.
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 ó 2, caracterizado porque el haz (3) láser generado por la fibra a base de iterbio tiene una longitud de onda de entre 1,04 y 3  $\mu\text{m}$ , preferiblemente de 1,07  $\mu\text{m}$ .
- 20 4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque el haz (3) láser generado por la fibra a base de iterbio tiene una longitud de onda de 1,07  $\mu\text{m}$ .
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque el factor de calidad del láser (BPP) está comprendido entre 2 y 6  $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ .
- 25 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque el haz (3) láser tiene una potencia comprendida entre 0,5 y 15 kW.
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado porque el diámetro de haz (3) focalizado está comprendido entre 0,13 mm y 0,40 mm.
- 30 8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque el haz (3) láser tiene un valor de longitud de Raleigh (Zr) comprendido entre 1 y 10 mm, preferiblemente entre 2 y 7 mm.
- 35 9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque se pone en práctica el haz (3) según una abertura angular ( $\theta$ ) comprendida entre 0,25 y 5°, y un ángulo  $\alpha$  de entre 1,25 y 8° correspondiente al ángulo definido por el diámetro del haz (3) láser focalizado ( $2W_0$ ) dividido entre el espesor (E) de la pieza (10), de tal manera que la suma de los ángulos ( $\alpha + \theta$ ) está comprendida entre 1,5 y 8°.
- 40 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado porque el gas de asistencia del haz (3) láser se elige de nitrógeno, helio, argón, oxígeno,  $\text{CO}_2$  y sus mezclas, y eventualmente contiene, además, uno o varios compuestos adicionales elegidos de  $\text{H}_2$  y  $\text{CH}_4$ .
- 45 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado porque la pieza (10) que va a cortarse tiene un espesor de entre 0,25 y 30 mm, preferiblemente entre 0,40 y 20 mm.

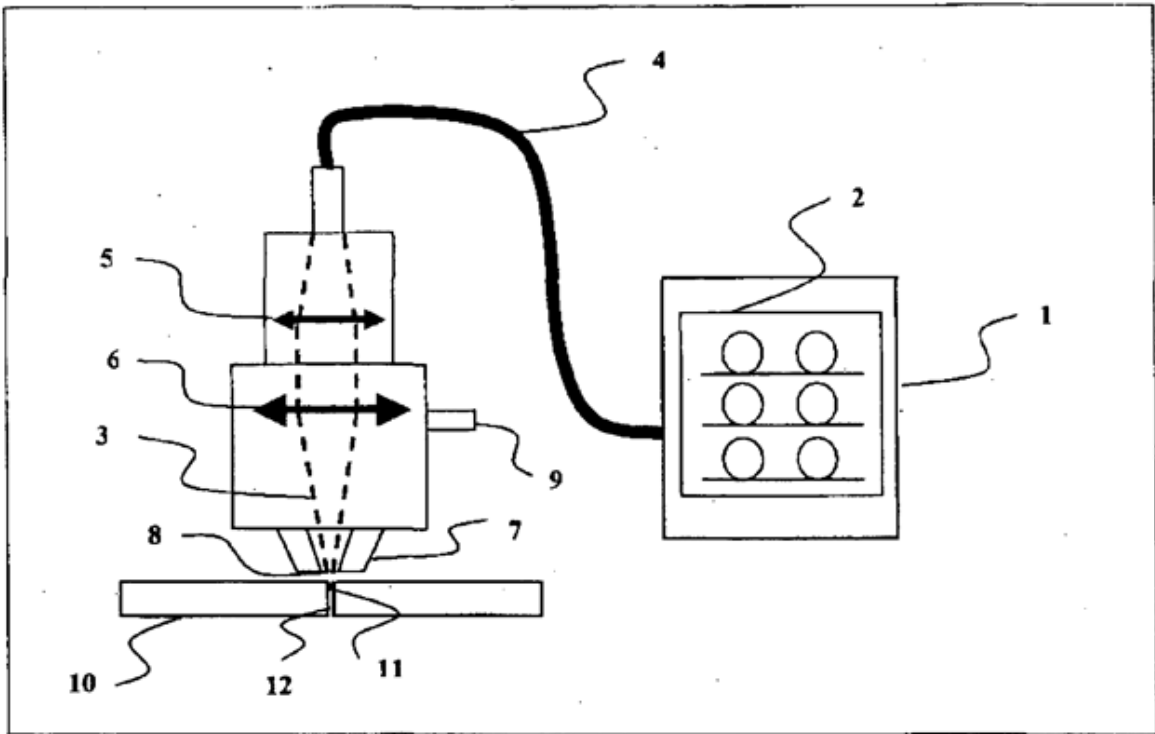


FIGURA 1

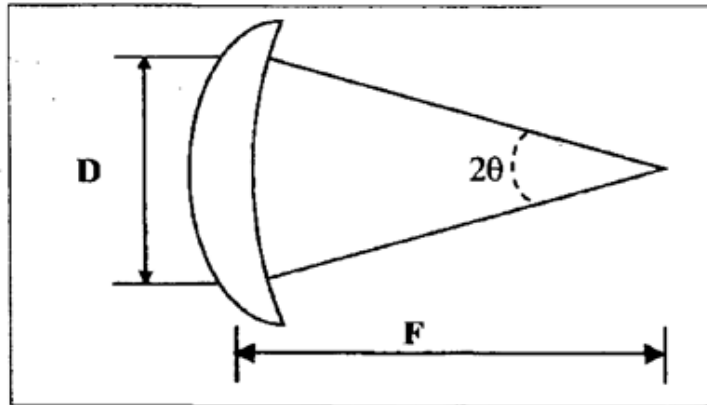


FIGURA 2



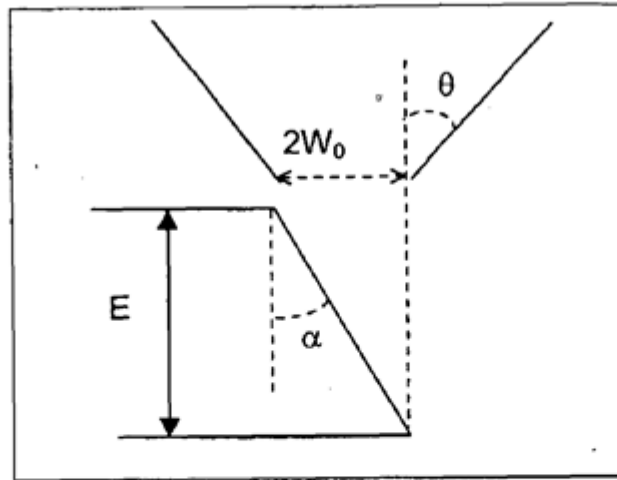


FIGURA 3

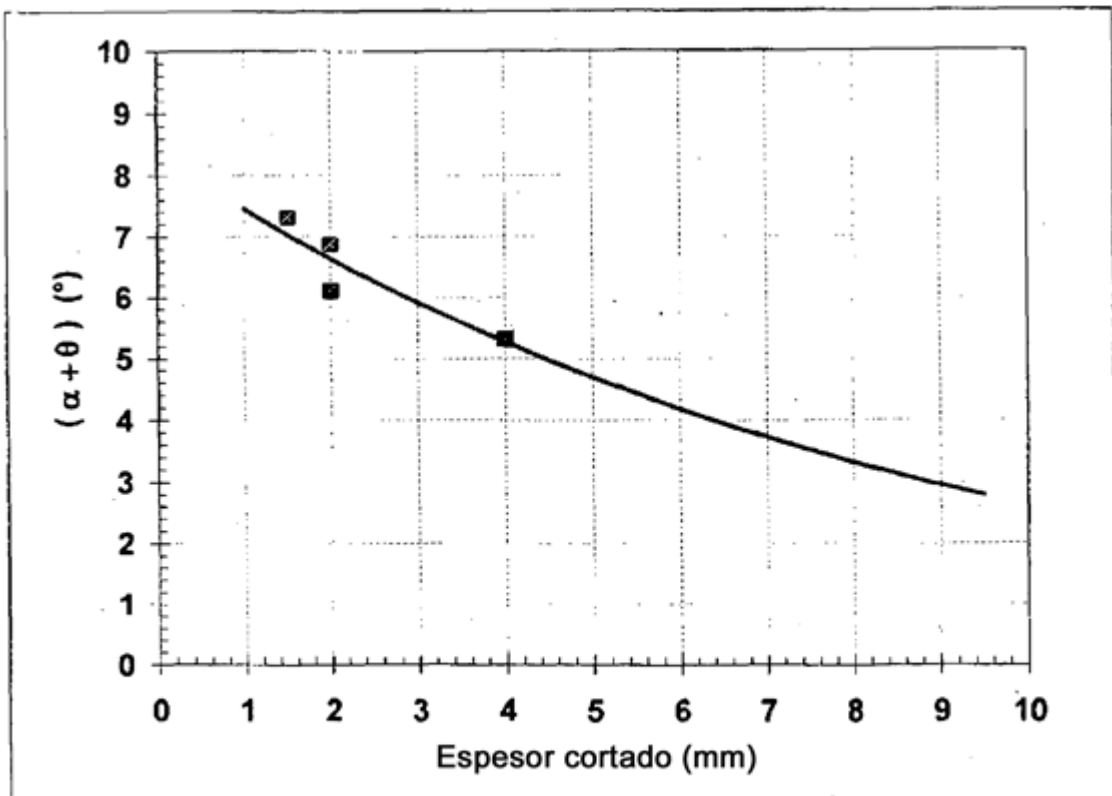


FIGURA 4

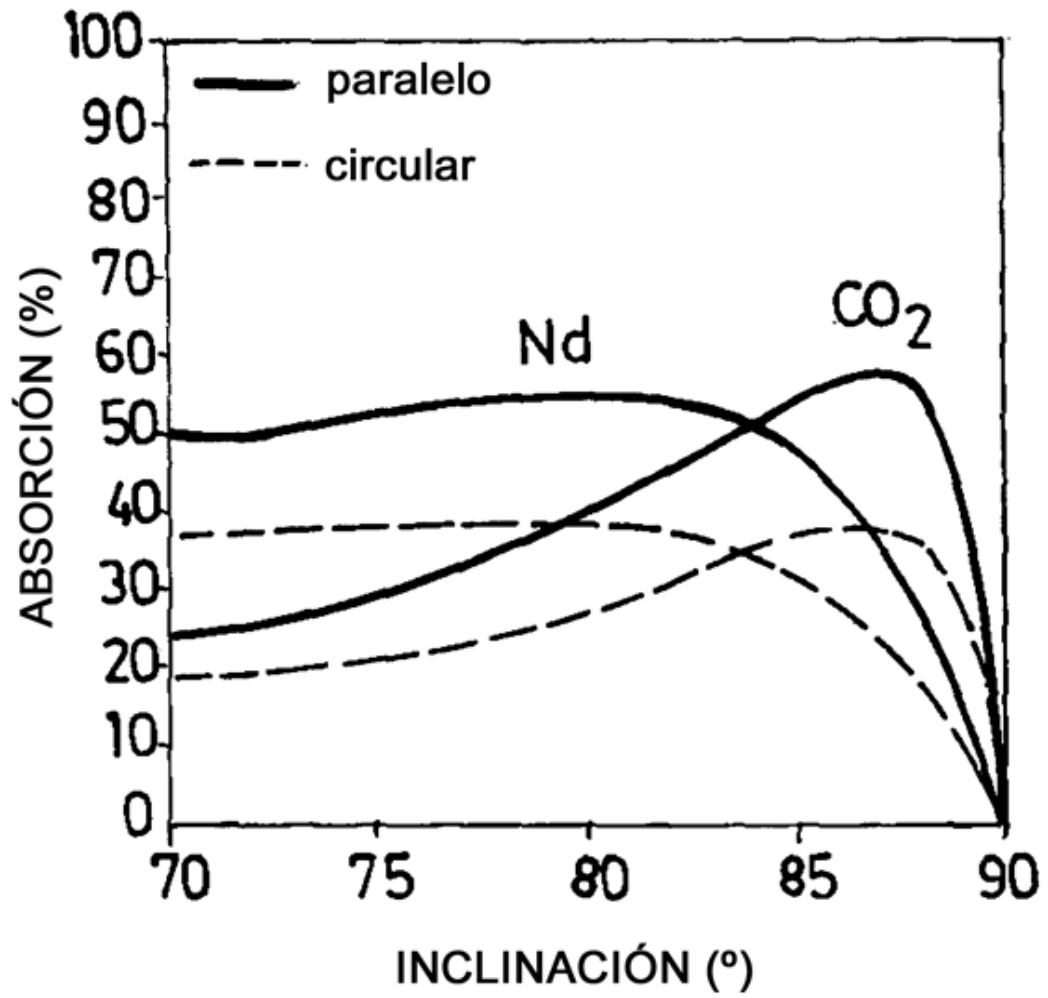


FIG.5