

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 672 922**

51 Int. Cl.:

G02F 1/39 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.06.2011 PCT/GB2011/000899**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.12.2011 WO11157990**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.06.2011 E 11739120 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.03.2018 EP 2583136**

54 Título: **Generador paramétrico mejorado**

30 Prioridad:

16.06.2010 GB 201010023

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

18.06.2018

73 Titular/es:

**THE UNIVERSITY COURT OF THE UNIVERSITY
OF ST ANDREWS (100.0%)
College Gate North Street, St Andrews
Fife KY16 9AJ, GB**

72 Inventor/es:

**DUNN, MALCOLM HARRY;
RAE, CAMERON FRANCIS;
STOTHARD, DAVID JAMES MARK y
WALSH, DAVID ALAN**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 672 922 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

Generador paramétrico mejorado

- 5 Esta invención se refiere a la generación de radiación electromagnética a través de un proceso de generación de ondas paramétricas en un material no lineal, y en particular a un método para optimizar la eficiencia de generación y la extracción útil de dicha radiación cuando está sujeta a absorción en el material no lineal.

10 **Antecedentes de la invención**

- 10 Los dispositivos paramétricos son fuentes flexibles y convenientes de radiación coherente ampliamente ajustable. En estos, se aplica un haz coherente de radiación electromagnética a un cristal óptico no lineal para estimular un proceso óptico no lineal que da lugar a la división de la potencia/energía de esta onda bomba coherente en dos ondas generadas, normalmente denominadas señal y complemento. La señal generalmente se define como aquella
15 onda que proporciona la salida útil, y como tal a lo largo de este documento se identifica como la onda que tiene la longitud de onda más larga de las dos ondas generadas.

- 20 Existe un interés considerable en extender la cobertura espectral de los dispositivos paramétricos. Esto se debe a que a menudo se utilizan como fuentes de radiación coherente en dominios espectrales que no están cubiertos por ningún otro tipo de fuente, o en los que una única fuente de ondas paramétricas es capaz de reemplazar una cantidad de fuentes que de otro modo serían necesarias para proporcionar la cobertura espectral requerida. Sin embargo, una limitación de los dispositivos paramétricos conocidos es el efecto perjudicial de la absorción de una o más de las tres ondas implicadas en la interacción no lineal dentro del propio medio no lineal. Como resultado, la cobertura espectral alcanzable a través de un esquema de generación paramétrica particular a menudo está limitada
25 solo por la presencia de absorción y no por las características no lineales o de ajuste de fases del medio no lineal que se está empleando. La mitigación de la restricción impuesta por la absorción da lugar a una cobertura espectral mejorada que se obtiene mediante dispositivos de ondas paramétricas.

- 30 Una clase de dispositivo en el que se ha extendido la cobertura espectral de generadores paramétricos es el generador paramétrico óptico (OPG, por sus siglas en inglés, optical parametric generator) de terahercios (THz), en el que la salida útil (la onda señal) es un haz de longitud de onda consistente con frecuencias de THz. A menudo en tales dispositivos es prevalente la absorción de la onda señal ya que el medio no lineal puede ser altamente absorbente en las frecuencias de THz. Un ejemplo particular de este tipo de dispositivo incluye un esquema de ajuste de fases no colineal en el que la onda señal se hace salir rápidamente del medio no lineal en una dirección
35 que es sustancialmente lateral a la dirección de propagación de la onda bomba, minimizando de ese modo los efectos nocivos de la absorción en la onda señal. Ejemplos de esta técnica se describen en los artículos "Efficient, tunable optical emission from LiNbO3 without a resonator", por Yarborough et al., Applied Physics Letters 15 (3), páginas 102-104 (1969), "Terahertz wave parametric source", por Kawase et al., Journal of Physics D: Applied Physics 35 (3), páginas R1-14 (2002) y "Compact source of continuously and widely-tunable terahertz radiation", por
40 Dunn et al., Opt. Exp. 14 (4), página 1582, (2006).

- 45 La figura 1 es una ilustración de este conocido proceso de ajuste de fases no colineal. Más específicamente, la figura 1(a) ilustra la geometría de las ondas bomba1, complemento 2 y señal 3 interactuantes en el medio no lineal 4. La figura 1(b) ilustra el proceso de ajuste de fases a través de un llamado diagrama de vector k , en el que k_p , k_i y k_s son los vectores de onda de las ondas bomba, complemento y señal, respectivamente, el ángulo θ es el ángulo delimitado por las ondas bomba y complemento y el ángulo ϕ el ángulo delimitado por las ondas bomba y señal.

- 50 Como puede verse en la figura 1(a), en el conocido proceso de ajuste de fases no colineal, la onda bomba 1, la onda complemento 2 y la onda señal 3 son no colineales dentro del medio no lineal 4. Por lo tanto, para mantener la interacción no lineal deseada entre las ondas bomba y complemento en toda la longitud del medio no lineal 4, estas deben ser de suficiente extensión radial (transversal) para mantener una superposición espacial entre ellas en toda la longitud del medio 4. Además, para mantener la interacción no lineal entre las ondas bomba y señal a lo largo de una longitud para lograr la ganancia paramétrica necesaria para que el dispositivo funcione, la extensión radial de
55 los haces interactuantes debe ser lo suficientemente grande. Sin embargo, esto es contrario a la extensión radial de los haces interactuantes que es pequeña con el fin de aumentar las intensidades de los haces, para reducir la potencia de bombeo o la energía necesaria para alcanzar un nivel de ganancia paramétrica requerida para el funcionamiento del dispositivo.

- 60 Otro ejemplo de la clase de dispositivo OPG THz es el OPG híbrido de fases ajustadas colineal/no colineal basado en materiales no lineales de polarización oblicua periódica, en los que nuevamente la onda señal se propaga sustancialmente lateralmente (y puede ser ortogonal) a la dirección del haz de bombeo, véase el documento EP1771765, cuyos contenidos se incorporan como referencia en el presente documento. La figura 2 muestra un ejemplo de este conocido proceso híbrido de ajuste de fases. Más específicamente, la figura 2(a) ilustra la geometría de las ondas bomba1, complemento 2 y señal 3 interactuantes en el medio no lineal 4. La figura 2(b) ilustra el
65 proceso de ajuste de fases a través de un diagrama de vector k , en el que k_p , k_i y k_s son los vectores de onda de las

ondas bomba, complemento y señal respectivamente, el ángulo α es el ángulo delimitado por la bomba y la dispersión de polarización periódica normal y el ángulo φ el ángulo delimitado por las ondas bomba y señal.

5 Como puede verse en la figura 2(a), en el proceso híbrido de ajuste de fases colineal/no colineal, la onda bomba 1 y la onda complemento 2 son colineales dentro del medio no lineal 4. Sin embargo, la onda señal 3 se aleja rápidamente tanto de la onda bomba 1 como de la onda complemento 2 y sale rápidamente del medio no lineal 4 para evitar una pérdida de absorción excesiva. Nuevamente, existen requisitos contrarios de pequeña extensión radial a los haces interactuantes para minimizar los efectos de absorción en la onda señal y para alcanzar la intensidad de bomba necesaria para lograr una ganancia paramétrica suficiente para hacer que el dispositivo funcione y de gran extensión radial para maximizar la longitud de interacción.

15 En el caso general de generadores paramétricos del tipo de ajuste de fases no colineal y del tipo de ajuste de fases colineal en los que puede existir una forma de desviación entre las ondas interactuantes comúnmente denominada refracción doble, estos requisitos contradictorios sobre la extensión espacial de los haces interactuantes pueden abordarse mediante el uso de la conformación de haz elíptica utilizando ópticas de conformación de haz cilíndricas. En tales dispositivos, las ópticas cilíndricas conforman la extensión espacial transversal de los haces interactuantes de modo que la extensión de los haces en el plano que no se desvía se hace pequeña mientras que la extensión de los haces en el plano de desviación se hace suficientemente grande para mantener la superposición espacial entre los haces a lo largo de la longitud del cristal no lineal, pero al mismo tiempo el área total de los haces se hace deseablemente pequeña. Por lo tanto, la intensidad de bombeo puede ser deseablemente alta.

25 En la técnica anterior, la optimización de la extensión espacial de los haces interactuantes para maximizar la potencia/energía acoplada a la salida útil en el haz de la señal o del complemento preferido es aplicable a sistemas en los que la absorción no es significativa y depende únicamente de la intensidad del haz de bombeo operativa deseada y del grado de no colinealidad. Sin embargo, esto no es directamente aplicable cuando uno de los haces, normalmente el asociado con la dirección de gran desviación, está sujeto a absorción en el medio no lineal.

30 Los documentos "Development of a compact THz-wave parametric generator system including a pump source " de Sato et al., ISBN 978-0-7803-6738-8, y " Broadband min-infrared generation in elliptically pumped periodically poled lithium niobate devices" de Russell et al., ISBN 978-1-55752-662-5 describen ambos dispositivos paramétricos bombeados elípticamente. Sin embargo, ninguno proporciona una solución al problema de cómo optimizar la ganancia paramétrica cuando el haz de la señal está sujeto a absorción.

35 **Sumario de la invención**

De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se proporciona un método para optimizar la ganancia paramétrica en un cristal óptico no lineal que en respuesta a la aplicación de un haz de bombeo definido por el objetivo de la reivindicación 1

40 Usando la conformación de haz elíptica, la potencia/energía acoplada a la salida útil en el haz de la señal se mejora cuando se genera en presencia de la absorción de dicho haz de señal en el cristal no lineal.

45 La anchura del haz de bombeo puede estar en el intervalo de $0,5/\beta$ y $2,5/\beta$. La anchura del haz de bombeo puede estar en el intervalo de $1/\beta$ y $2/\beta$. La anchura del haz de bombeo puede seleccionarse para que sea $1/\beta$ o $2/\beta$.

Breve descripción de los dibujos

Diversos aspectos de la invención se describirán ahora a modo de ejemplo solamente y con referencia a los siguientes dibujos, de los que:

50 la figura 1 es una representación esquemática de (a) una geometría de propagación de haces no colineal en un cristal óptico no lineal, y (b) ajuste de fases no colineal de los haces interactuantes;

55 la figura 2 es una representación esquemática de (a) una geometría híbrida de propagación de haces colineal/no colineal en el cristal óptico no lineal, y (b) un ajuste de fases híbrido colineal/no colineal de los haces interactuantes;

la figura 3 es un diagrama esquemático de un generador paramétrico en el que la bomba está conformada elípticamente para optimizar la ganancia paramétrica, y

60 la figura 4 es un gráfico de la ganancia no lineal con respecto al producto de la anchura del haz y de la absorción del material óptico no lineal y de la transmisión del haz de la señal con respecto al producto de la anchura del haz y de la absorción del material óptico no lineal para los dispositivos de las figuras 1, 2 y 3.

Descripción detallada de la invención

65 La figura 3 muestra un generador paramétrico que tiene un material no lineal y utiliza un proceso de generación paramétrica para generar las ondas señal y complemento a partir de una onda bomba aplicada. En este caso, las ondas bomba y complemento son colineales y la señal se desvía y está sujeta a absorción debido al material no

lineal. Para optimizar la ganancia paramétrica en estas circunstancias, la bomba está conformada elípticamente en una cantidad que depende del coeficiente de absorción del material no lineal. Al diseñar la forma del haz de bombeo de esta manera, puede mejorarse el rendimiento de la salida. La optimización de la forma espacial de los haces también puede utilizarse para minimizar la potencia de bombeo requerida para lograr la ganancia paramétrica necesaria. Este es un avance técnico significativo.

Para demostrar la efectividad de la conformación de haz elíptica, a fin de optimizar la salida de un dispositivo generador paramétrico óptico (OPG) en presencia de la absorción de una de las ondas generadas paraméricamente, se emplea de forma útil una breve descripción matemática del dispositivo mostrado en la figura 2(a).

Para la geometría ilustrada en la figura 2(a), se supone que la onda bomba 1 y la onda complemento 2 son ondas planas infinitas que se propagan a lo largo del eje x del medio no lineal 4, mientras que la onda señal 3 (THz) es una onda plana que se propaga a lo largo del eje y del medio no lineal 4. Para el caso mostrado en la figura 2(b), es decir, en el que la interacción no lineal está apropiadamente ajustada en fases a través del llamado cuasi ajuste de fases, son válidas las ecuaciones de ondas acopladas que describen la evolución y la disminución de los campos de la señal (E_s), del complemento (E_i) y de la bomba (E_p) y la evolución de la amplitud del campo de la señal (E_s) sobre una distancia dy a lo largo de y se describe por:

$$\frac{dE_s}{dy} = i\kappa_s E_p E_i^* - \beta E_s \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde β es el coeficiente de absorción del material y κ_s está dado por:

$$\kappa_s = \frac{\omega_s d_{eff}}{2n_s c}$$

donde ω_s es la frecuencia angular de la onda señal 3, d_{eff} la respuesta no lineal del medio no lineal 4, n_s el índice de refracción del medio no lineal 4 en la longitud de onda de la señal y c la velocidad de la luz.

Suponiendo que el campo de la bomba (E_p) y el campo del complemento (E_i) son independientes de y , que es de intensidad uniforme, la expresión anterior (Ecuación 1) puede resolverse para obtener la fuerza de campo de la onda señal en función de y , es decir:

$$E_s = \frac{i\kappa_s E_p E_i^*}{\beta \{1 - \exp(-\beta y)\}}$$

Entonces es evidente que la amplitud de la onda señal depende de la amplitud de la onda complemento y la optimización de la ganancia de la onda complemento a su vez determina la generación óptima de la onda señal.

Aplicando entonces la ecuación de ondas acopladas para la propagación de la onda complemento a lo largo del eje x y observando que en el dispositivo el haz de bombeo 1 se propaga cerca del borde del medio no lineal 4 y de este modo la longitud de propagación y puede tomarse como la anchura del haz de bombeo w medida a lo largo del eje y , entonces:

$$\frac{dE_i}{dx} = \frac{i\kappa_i E_p}{\beta \{-i\kappa_s E_p^* E_i\} \{1 - \exp(-\beta w)\}}$$

$$I = \frac{EE^*nc\varepsilon_0}{2}$$

La amplitud del campo E se relaciona con la intensidad a través de la relación habitual. Haciendo la sustitución apropiada para κ y $\omega=2\pi c/\lambda$, el coeficiente de ganancia para la onda complemento a lo largo de x puede escribirse en la forma:

$$\alpha_i = \frac{1}{I_i} \frac{dI_i}{dx} = \frac{4\pi^2 d_{eff}^2 I_p}{n_p n_i n_s c \varepsilon_0 \lambda_i \lambda_s} \left\{ \frac{1 - \exp(-\beta w)}{\beta} \right\} \quad (\text{Ecuación 2})$$

5 Reexpresando la Ecuación 2 en términos de potencia de bombeo P_p en lugar de en intensidad I_p , entonces se produce la expresión:

$$\alpha_i = \frac{1}{I_i} \frac{dI_i}{dx} = \frac{4\pi d_{eff}^2 P_p}{n_p n_i n_s c \varepsilon_0 \lambda_i \lambda_s} \left\{ \frac{1 - \exp(-\beta w)}{\beta w h} \right\} \quad (\text{Ecuación 3})$$

10 donde tanto la anchura (w) del haz como la altura (h) del haz aparecen explícitamente para permitir que el haz de bombeo tome una forma elíptica con el área dada por $\pi w h$.

15 Para el caso en el que la generación paramétrica se lleva a cabo a la máxima intensidad de bombeo, consistente con evitar el daño óptico (es decir, I_{max}) entonces la ecuación (2) se aplica con $I_p=I_{max}$. Si no hay absorción de la onda señal generada ($\beta=0$), entonces la ecuación (2) predice que la ganancia del complemento, α_i , aumenta linealmente con w, como se esperaba, ya que la superposición entre las tres ondas interactuantes aumenta a medida que w aumenta.

20 Cuando la absorción está presente, y por lo tanto el coeficiente de absorción es finito, el término en {...} de la ecuación (2), y por lo tanto el coeficiente de ganancia del complemento, inicialmente aumenta monótonamente cuando w aumenta, pero se acerca asintóticamente a un valor de saturación (máximo) de $(1/\beta)$. Para el caso en el que $w=\beta^{-1}$ ($w\beta=1$), el término alcanza el 63 % de su valor de saturación, y por $w=2\beta^{-1}$ ($w\beta=2$) ha aumentado al 86 %, lo que se muestra gráficamente en la figura 4. Cualquiera de estas cifras puede considerarse en la práctica como
25 adecuada en términos de optimización de ganancia.

Por otro lado, como la anchura w de los haces de bombeo y del complemento se incrementan, habrá un retorno decreciente en la onda señal acoplada a la salida útil debido a la ruta más larga que experimenta aumentando su absorción antes de salir del medio de ganancia. De hecho, para el caso en el que $w=\beta^{-1}$ puede estimarse fácilmente
30 que solo el 37 % de la onda señal generada sale del medio de ganancia, disminuyendo al 14 % cuando $w=2\beta^{-1}$, lo que se muestra gráficamente en la figura 4. Por lo tanto, debe llegarse a un compromiso entre aumentar la ganancia y disminuir la eficiencia de extracción. Es evidente que este compromiso reside en algún lugar alrededor de los valores de w considerados anteriormente, la elección exacta depende en particular de cómo de crítica sea la optimización de ganancia en las circunstancias que pertenecen al funcionamiento del generador. Con las anchuras
35 de los haces de bombeo y del complemento determinados de este modo por las restricciones anteriores, entonces para una potencia de bombeo dada, el enfoque elíptico permite la operación a la intensidad $I_p=I_{max}$ mediante la elección apropiada del parámetro h. Sin embargo, debido a las posibles limitaciones impuestas a la altura h de los haces, puede ser necesario emplear valores mayores para w que los discutidos anteriormente para evitar daños ópticos.

40 La ecuación (3) explora la perspectiva desde el punto de vista de tener disponible una cantidad limitada de potencia de bombeo P_p . En el caso de no absorción, el término en {...} tiende a $(1/h)$, cuando la ganancia es independiente de w y se optimiza haciendo h lo más pequeño posible. La ganancia se vuelve independiente de w puesto que en las condiciones de aplicar una potencia de bombeo constante P_p constante y con h fijo, el beneficio de aumentar la
45 superposición de las tres ondas interactuantes que surge al aumentar w se compensa con la disminución correspondiente a la intensidad de bombeo I_p con el aumento de w. En el caso en el que la absorción está presente y, por lo tanto, el coeficiente de absorción es finito, el término en {...} de la ecuación (3) y, por tanto, el coeficiente de ganancia del complemento, ahora disminuye monótonamente al aumentar w. Esto es de esperar ya que la intensidad decreciente al aumentar w que anteriormente compensaba los beneficios de una superposición creciente
50 de las ondas interactuantes, se acompaña de una absorción creciente de la onda señal generada con el aumento de w. La optimización en la condición discutida previamente de máxima intensidad $I_p=I_{max}$, mientras que la adaptación de h y w para acomodar la potencia de bombeo disponible de acuerdo con las reglas establecidas se vuelve apropiada, y de nuevo se logra mediante enfoque elíptico.

55 La descripción anterior de una realización específica se hace solo a modo de ejemplo y no a efectos de limitaciones.

Por ejemplo, la óptica de conformación de haz puede ser de cualquier forma adecuada, por ejemplo, un par de prismas anamórficos o puede comprender una bomba cilíndrica y/o un complemento y/o espejos de cavidad óptica con haz de señales. Para los expertos en la materia será evidente que pueden realizarse modificaciones sin cambios significativos en la operación descrita. Por ejemplo, el OPO puede ser un OPO de ajuste de fases no colineal o el OPO puede ser externo a la cavidad del láser de bombeo.

REIVINDICACIONES

1. Método de optimización de ganancia paramétrica en un cristal óptico no lineal (4) que en respuesta a la aplicación de un haz de bombeo (1) genera, mediante un proceso de generación paramétrica de ajuste de fases, haces de señal (3) y de complemento (2), en el que el haz de la señal no es colineal con el haz de bombeo (1), y el haz de la señal (3) está sujeto a absorción debido al cristal óptico no lineal (4), implicando el método conformar el haz de bombeo (1) para tener una sección transversal elíptica, en donde el método implica además ajustar la anchura w del haz de bombeo (1) dependiendo del coeficiente de absorción β del cristal óptico (4), en donde la anchura w del haz de bombeo se selecciona para que el producto del coeficiente de absorción β del cristal óptico y la anchura del haz proporcione una extracción máxima de la potencia del haz de la señal del cristal óptico, que se determina mediante un compromiso entre la ganancia de la onda complemento y la absorción óptica del haz de la señal.
2. Método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la anchura w del haz de bombeo (1) está en el intervalo de $0,5/\beta$ y $2,5/\beta$.
3. Método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la anchura w del haz de bombeo (1) está en el intervalo $1/\beta$ y $2/\beta$.
4. Método de acuerdo con la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que la anchura w del haz de bombeo (1) se selecciona para que sea $1/\beta$ o $2/\beta$.

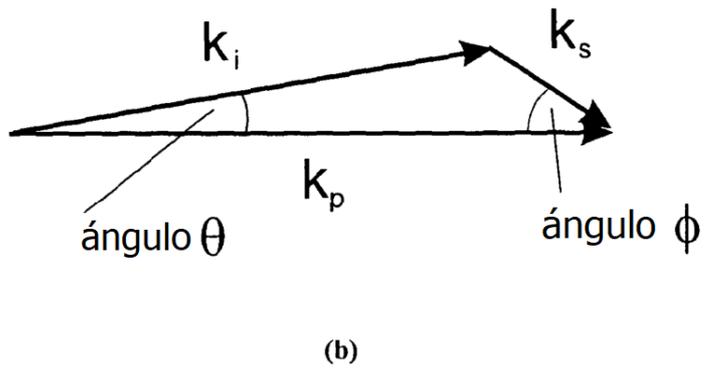
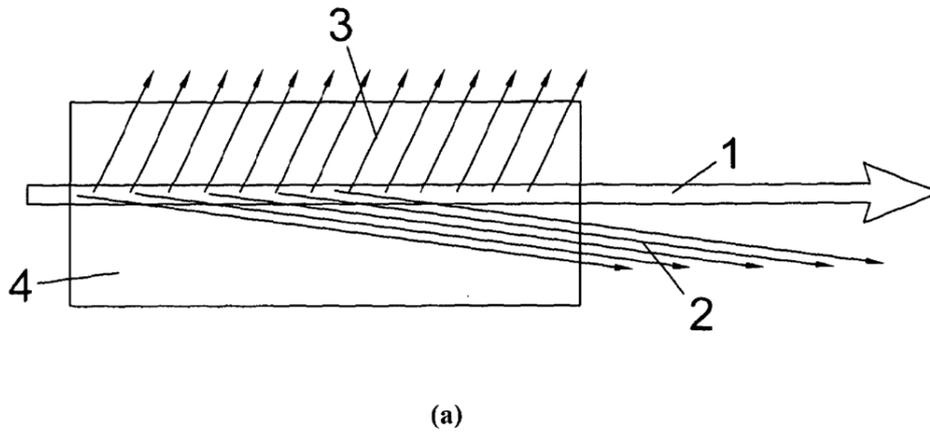
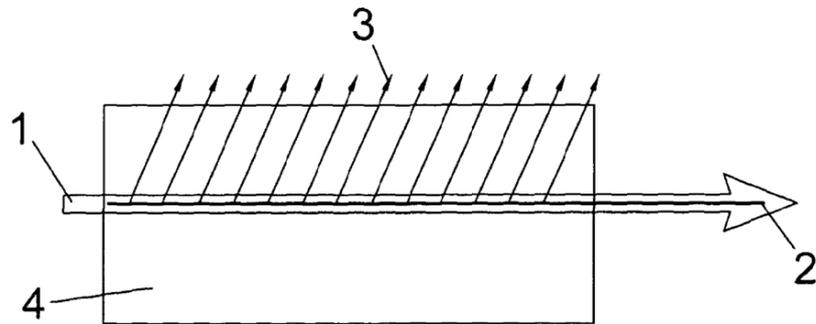
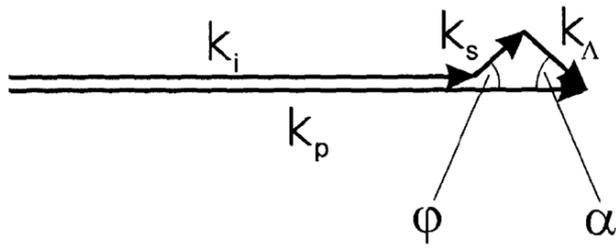


FIGURA 1



(a)



(b)

FIGURA 2

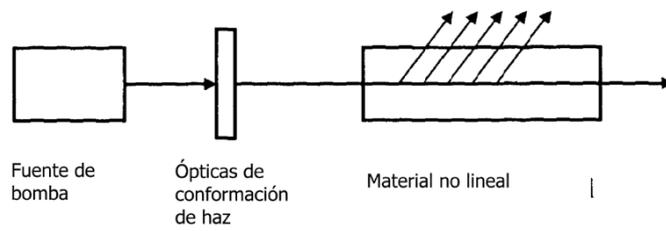


FIGURA 3

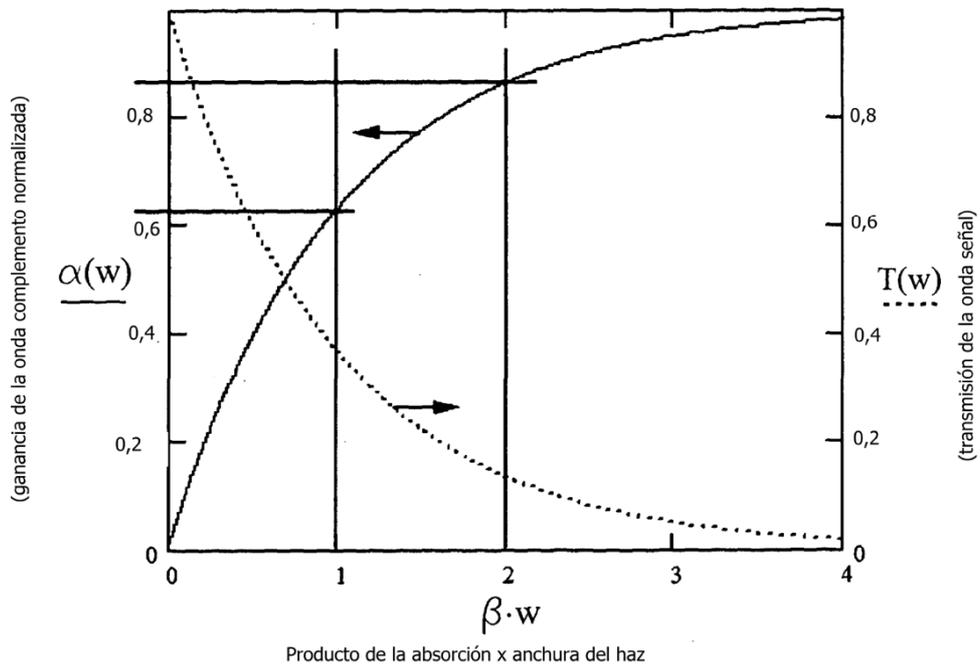


FIGURA 4