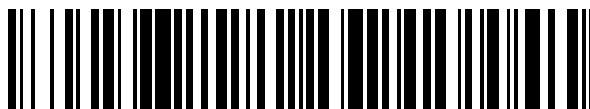


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 732 423**

51 Int. Cl.:

G02F 1/33 (2006.01)

G02B 21/00 (2006.01)

G01N 21/64 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.01.2012** **PCT/HU2012/000001**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.07.2013** **WO13102771**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.01.2012** **E 12703338 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.03.2019** **EP 2800995**

54 Título: **Método para escanear a lo largo de una trayectoria de escaneo continuo con un sistema de escáner**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.11.2019

73 Titular/es:

FEMTONICS KFT. (100.0%)
59 Tuzoltó utca
1094 Budapest, HU

72 Inventor/es:

RÓZSA, BALÁZS;
KATONA, GERGELY;
VERESS, MÁTÉ;
MAÁK, PÁL;
SZALAY, GERGELY;
KASZÁS, ATTILA;
CHIOVINI, BALÁSZ y
MÁTYÁS, PÉTER

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 732 423 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

Método para escanear a lo largo de una trayectoria de escaneo continuo con un sistema de escáner

La presente invención está relacionada con un método para escanear a lo largo de una trayectoria de escaneo continuo con un sistema de escáner que comprende una primera pareja de deflectores acusto-ópticos para desviar un punto focal de un haz electromagnético que atraviesa un sistema de lentes consecutivas que definen un eje óptico (z) en un plano x-z, y una segunda pareja de deflectores acusto-ópticos para desviar el punto focal en un plano y-z que es sustancialmente perpendicular al plano x-z.

Las tecnologías de escaneo láser tridimensional (3D) tienen gran importancia para realizar mediciones en especímenes biológicos (incluido escaneo, obtención de imágenes, detección, excitación, etc.).

Las tecnologías del estado de la técnica comúnmente aplican microscopios de escaneo láser con dos fotones que usan una luz láser de energía fotónica inferior de la que se necesitan dos fotones para excitar un fluoróforo en un acontecimiento cuanto, dando como resultado la emisión de un fotón de fluorescencia, que luego es detectado por un detector. La probabilidad de absorción casi simultánea de dos fotones es extremadamente baja que requiere un flujo alto de fotones de excitación, así la excitación con dos fotones prácticamente ocurre únicamente en el punto focal del haz láser, donde la intensidad de haz vence el umbral de dos fotones. El número de fotones se aumenta también mediante bloqueo de modo del láser de excitación que provoca que los fotones lleguen en rebotes de alta intensidad en la muestra. Generalmente se usa un láser pulsado por femtosegundo para proporcionar el flujo de fotones requerido para la excitación con dos fotones, mientras se mantiene la intensidad media de haz láser suficientemente baja como para evitar deterioro térmico de la muestra.

En caso de analizar especímenes biológicos generalmente se prefiere mover el punto de enfoque del haz láser en lugar de mover el espécimen, lo que sería más difícil de llevar a cabo cuando se usan cámaras de espécimen sumergido o cuando se realiza grabación eléctrica en el espécimen biológico con microelectrodos. El movimiento del punto de enfoque a lo largo de una trayectoria arbitraria se puede lograr al desviar el haz láser para escanear diferentes puntos en un plano focal (plano x-y) y al desplazar el objetivo a lo largo de su eje óptico (eje z) p. ej. por medio de un piezo-posicionador a fin de cambiar la profundidad del plano focal. El escaneo XY se logra convencionalmente al desviar el haz láser dentro de un plano focal dado (plano x-y) por medio de medios de desviación mecano-óptico tales como espejos de desviación montados en escáneres galvanométricos.

La inercia de los componentes mecánicos de escaneo (es decir, los espejos de escaneo y el objetivo de microscopio) presenta ciertas limitaciones con relación a la velocidad de escaneo alcanzable, dado que los componentes de escaneo tienen que ser desplazados físicamente a fin de realizar escaneo 3D.

Como alternativa a las soluciones convencionales mecano-ópticas se han propuesto deflectores acusto-ópticos rápidos (deflector).

Kaplan et al. ("Acousto-optic lens with very fast focus scanning", OPTICS LETTERS / Vol. 26 N.º 14 / 15 de julio, (2001)) propuso una lente acusto-óptica constituida de dos deflectores con ondas acústicas de propagación contraria bloqueadas en fase, para lograr desplazamiento puramente de plano focal a lo largo del eje z sin movimiento lateral del haz. En este tipo de aplicación se deben generar ondas acústicas de frecuencia cambiada en el tiempo, es decir, la frecuencia de la onda acústica en el medio acusto-óptico de los deflectores se cambia continuamente. El cambio del enfoque de la lente acusto-óptica se logra al cambiar la tasa de barrido de las frecuencias acústicas a través de la abertura óptica de los dispositivos acusto-ópticos. Para mover simultáneamente el haz y cambiar el plano focal se tienen que cambiar las tasas de barrido y se debe introducir diferencia de frecuencia acústica entre los dos deflectores de una pareja. Para mover el punto focal a lo largo del eje x se debe aplicar diferencia de frecuencia acústica entre los deflectores que desvían en el plano x-z, para mover a lo largo del eje y, diferencia de frecuencia acústica entre los deflectores de la pareja que desvían en el plano y-z. La cantidad de la diferencia de frecuencia en las respectivas parejas determina las coordenadas x e y del punto.

El principio anterior se usa en escáneres acusto-ópticos a fin de proporcionar escaneo 3D. En un escáner acusto-óptico se usan cuatro deflectores para lograr escaneo 3D verdadero - es decir, enfocar el haz láser de excitación a puntos dentro de un diamante como volumen espacial como se describe en el documento US 7 227 127. En funcionamiento normal, se usa escaneo de acceso aleatorio, que significa que se puede acceder a cualquier punto seleccionado en el espacio 3D añadiendo control apropiado a los deflectores acusto-ópticos. Este modo se llama escaneo multipunto de acceso aleatorio (RAMP, del inglés *random access multipoint scanning*).

Para el funcionamiento RAMP en 3D los deflectores se deben llenar con ondas acústicas de frecuencia cambiada en el tiempo que cambian sus frecuencias linealmente con el tiempo, con tasa de barrido de frecuencia casi igual, pero frecuencia de inicio diferente. La pendiente de los cambios de frecuencia en el tiempo determina la profundidad focal (nivel z) mientras que la diferencia entre las frecuencias instantáneas presentes en los miembros de las parejas de deflectores que desvían en los planos x-z o y-z, respectivamente, dada la distancia lateral x e y del punto focal, respecto al eje.

Las funciones de frecuencia en los miembros de la pareja que desvían p. ej. en el plano x-z se pueden definir como

$$f_{1x} = f_{10x} + a_{1x} \cdot t, \quad f_{2x} = f_{20x} + a_{2x} \cdot t$$

En el funcionamiento RAMP el nivel z es controlado (mantenido constante) al mantener la cantidad de a_{1x} y a_{2x} igual ($a_{1x}=a_{2x}$), de lo que sigue que el nivel x se determina mediante: $f_{2x}-f_{1x}=f_{20x}-f_{10x}$. En escáneres acusto-ópticos de la técnica anterior los valores a_{1x} y a_{2x} se mantienen iguales a fin de formar un punto de enfoque estable en una ubicación espacial deseada. El tiempo de conmutación entre dos puntos espaciales diferentes en modo RAMP se determina mediante la velocidad acústica, dado que las nuevas ondas acústicas deben llenar completamente la abertura óptica de los deflectores. Si la abertura tiene una anchura D por el sonido, el tiempo necesario para rellenar el medio acusto-óptico con la nueva onda acústica de velocidad V_{ac} es: $t_{sw}=D/V_{ac}$. (En configuración de deflector de TeO_2 rotado acústicamente este tiempo es 21 μs para una abertura de 15 mm).

Uno de los problemas asociados con el modo convencional RAMP es que no es posible realizar mediciones durante el tiempo de conmutación porque el cambio discreto de la frecuencia da como resultado la dispersión del punto en el espacio, por lo que ya no ocurre excitación multi-fotón.

Un objeto de la presente invención es vencer los problemas asociados con la técnica anterior. En particular, un objeto de la invención es eliminar el tiempo de conmutación asociado con el modo RAMP de deflectores acusto-ópticos y proporcionar un nuevo modo de funcionamiento para mover el punto de enfoque continuamente a lo largo de una trayectoria de escaneo arbitrario (curva).

Los inventores se han dado cuenta de que si las pendientes en los dos deflectores en una pareja x-z o y-z no se mantienen iguales, sino en cambio se varían en el tiempo, entonces es posible mover el punto focal a lo largo de trayectorias (curvas) en 2D y 3D.

Los objetos anteriores se logran mediante el método según la reivindicación 1.

Realizaciones particularmente ventajosas del método inventivo se definen en las reivindicaciones dependientes adjuntas.

Con el método inventivo no es necesario esperar hasta que las nuevas frecuencias llenan la abertura óptica, dado que si las diferencias de frecuencia cambian continuamente en el tiempo, esto provoca que el punto se mueva a lo largo de puntos vecinos, sin necesidad de "saltar" de un punto de medición a otro, que dispersaría el punto en el espacio. Los inventores han reconocido y demostrado teórica y experimentalmente que la función de dispersión de puntos PSF del punto focal no se distorsiona únicamente por el hecho de que se está moviendo. El control apropiado de los dispositivos acusto-ópticos, por otro lado, se puede lograr mediante impulsor electrónico adecuado y software de control.

Detalles adicionales de la invención serán evidentes a partir de las figuras acompañantes y realizaciones ejemplares.

La figura 1 es una ilustración esquemática de los aspectos básicos de desviación de haz por medio de una pareja de deflectores acusto-ópticos.

La figura 2 es una ilustración esquemática de un sistema de escaneo de la técnica anterior que comprende dos parejas consecutivas de deflectores que enfocan en los planos x-z e y-z.

La figura 3 es una ilustración esquemática de otro sistema de escaneo de la técnica anterior.

La figura 1 es una ilustración esquemática de los aspectos básicos de la desviación de haz por medio de una pareja de deflectores acusto-ópticos 10 que comprende un primer deflector 12 y un segundo deflector 12' que tiene ondas acústicas 13 y 13' de propagación contraria para realizar escaneo en el plano x-z de una manera conocida. Las constantes de entramado de cristal del cristal que constituye el deflector 12, 12' son ligeramente modificadas por las ondas acústicas que se propagan a través, por lo que los cristales de deflector actúan como rejillas ópticas gruesas de constante de rejilla modificable.

Por consiguiente, un haz electromagnético incidente 14 (generalmente un haz láser) es partido por el primer deflector 12 en un haz de orden cero no desviado 16, un haz desviado de primer orden 18 y haces desviados de orden más alto que son ignorados en la siguiente exposición ya que generalmente solo el haz de primer orden 16 es de interés. El haz de primer orden 18' desviado (difractado) por el segundo deflector 12' tendrá la misma dirección que el haz incidente 14 y en consecuencia como el haz de orden cero 16 desviado por el primer deflector 12. Por lo tanto este haz de orden cero 16 debe ser separado del haz de primer orden 18' difractado dos veces que sale del segundo deflector 12'. Comúnmente se aplican dos tecnologías para separar el haz de orden cero 16. Si los deflectores 12, 12' se constituyen de cristales anisótropos y usan difracción anisótropa de Bragg que implica ondas acústicas de cizalladura lenta la polarización del haz difractado de primer orden 18 se rota 90 grados comparado con el haz de orden cero no difractado 16, así el haz de orden cero 16 puede simplemente ser filtrado por medio de un filtro de polarización. Según la segunda tecnología el haz de primer orden difractado dos veces 18' y el haz de orden cero 16 son separados espacialmente: el espaciamiento d entre los dos deflectores 12, 12' debe ser mayor que el pronosticado

por la abertura de haz D del primer deflector 12 y el ángulo de difracción de primer orden θ . En la práctica el espaciado d requerido es de aproximadamente $d=10 \cdot D$. Esto supone que los dos haces acústicos de propagación contraria no se pueden realizar dentro del mismo deflector.

5 La figura 2 ilustra un sistema de escaneo de la técnica anterior 100 que comprende dos parejas consecutivas de deflectores 10 y 20. La primera pareja 10 (comprende un primer y un segundo deflector 12, 12' proporcionados para enfocar en el plano x-z, mientras la segunda pareja 20 () comprende un tercer y un cuarto deflector 22, 22' que se proporcionan para enfocar en el plano y-z.

10 La figura 3 ilustra un sistema de escaneo de la técnica anterior 100 que contiene una disposición diferente de los deflectores. Los deflectores 12, 12' y 22, 22' ahora están agrupados en dos parejas consecutivas 110 y 120, una unidad de compensación de deriva y una unidad de enfoque z. Ambas parejas 110 y 120 contienen un deflector 12, 12' que funciona en el plano x-z y un deflector 22, 22' que funciona en el plano y-z. Las dos parejas de deflectores 110, 120 están vinculadas ópticamente con un sistema telecéntrico de obtención de imágenes 60. El sistema de escaneo 100 se plasma como imagen además en la abertura posterior de un objetivo o sistema de lentes similar 200 por medio de un segundo sistema telecéntrico de obtención de imágenes 60.

15 A fin de compensar diferentes tipos de aberraciones ópticas se han propuesto diversos sistemas de escaneo 100 como se trata en detalle en el documento WO2010076579.

20 La presente invención se puede aplicar en cualquier escáner de la técnica anterior que comprenda dos parejas de deflectores acusto-ópticos y en particular con cualesquiera de sistemas de deflector acusto-óptica descritos en el documento WO2010/076579 El método inventivo es adecuado para aumentar la velocidad de escaneo acusto-óptico en tecnología de microscopio de dos fotones y permite tanto escanear en 2D (a lo largo de segmentos dentro de un plano focal dado, es decir, donde la coordenada z es constante), como escanear en 3D (a lo largo de una trayectoria 3D arbitraria dentro de la muestra).

Las funciones de frecuencia en los deflectores 12, 12' de la pareja 10 que desvían en el plano x-z se pueden definir como

25
$$f_{1x} = f_{10x} + a_{1x} \cdot t, \quad f_{2x} = f_{20x} + a_{2x} \cdot t$$

De manera similar las funciones de frecuencia para los deflectores 22, 22' de la pareja 20 que desvían en el plano y-z es:

$$f_{1y} = f_{10y} + a_{1y} \cdot t, \quad f_{2y} = f_{20y} + a_{2y} \cdot t$$

Escaneo 2D

30 En la realización más simple se hacen posible escaneos en línea en 2D al mantener constante la coordenada z y cambiar únicamente las coordenadas x e y. En este caso es posible hacer uso de la discordancia de pendiente entre los barridos de frecuencia acústica (es decir, a_{1x} no es igual a a_{2x} como en el modo de funcionamiento RAMP) dentro de los deflectores acusto-ópticos consecutivos 12, 12', o 22, 22' que desvían en el plano x-z o y-z. La velocidad del escaneo en un plano dado se puede establecer al aumentar casi simétricamente la discordancia entre las pendientes de los deflectores en las parejas de deflectores 10 y 20 respectivamente: esto significa que $a_{1x}-a_{2x}$, $a_{1y}-a_{2y}$ ya no es

35 cero. Si los deflectores 12 y 12' de la primera pareja 10 son idénticos, y los deflectores 22 y 22' de la segunda pareja 20 son idénticos también, el nivel z del plano del punto de enfoque desviado no cambia, si las pendientes en los dos deflectores 12, 12' y 22, 22' de una pareja 10 y 20 se desplazan simétricamente para mantener:

$$\Delta a_x = a_{1x} - a_{2x} = \text{constante}, \quad \text{y} \quad \Delta a_y = a_{1y} - a_{2y} = \text{constante}$$

40 Por tanto a_{1x} y a_{2x} y a_{1y} y a_{2y} se pueden elegir como:

$$a_{1x} = a_{10x} + \Delta a_x \quad \text{y} \quad a_{2x} = a_{10x} - \Delta a_x$$

$$a_{1y} = a_{10y} + \Delta a_y \quad \text{y} \quad a_{2y} = a_{10y} - \Delta a_y$$

Si los deflectores 12, 12' y 22, 22' respectivamente no son idénticos, entonces se pueden usar las siguientes ecuaciones.

45 Si los barridos de frecuencia responsables de la desviación en el plano x-z tienen las pendientes a_{1x} y a_{2x} , respectivamente, que el punto focal se moverá en el plano de medición a lo largo de la x eje con la velocidad:

$$v_x = (K_2(\lambda)a_{2x} - K_1(\lambda)a_{1x}) \cdot f_{obj} / M$$

donde $K(\lambda)$ es la dependencia de la desviación angular θ en la frecuencia acústica f en un deflector dado: $\theta = K(\lambda)f$, λ que es la longitud de onda óptica. Los deflectores primero y segundo de una pareja pueden ser de configuración y geometría diferentes, por lo tanto K_1 y K_2 son diferentes. M es la amplificación del sistema óptico entre la escáner 100 y el objetivo 200 y f_{obj} es la longitud focal efectiva del objetivo, o de cualquier sistema de lentes usado como objetivo 200. Lo mismo es válido para el plano y-z:

$$v_y = (K_2(\lambda)a_{2y} - K_1(\lambda)a_{1y}) \cdot f_{obj} / M$$

Así al establecer las dos velocidades se pueden ajustar ambas direcciones de deriva arbitraria en un plano focal dado.

Simulaciones han mostrado que el propio punto no cambia sus parámetros significativamente durante la deriva, la ratio de Strehl únicamente disminuye con la distancia desde el punto óptico (desde el medio del volumen escaneado) según la regla válida para puntos focales estacionarios.

La discordancia de pendiente de barrido se optimiza para astigmatismo mínimo en cualquier plano $z \neq 0$, para obtener el mejor tamaño y forma de punto. La restricción de astigmatismo mínimo provoca diferencia en las pendientes de frecuencia de las parejas de deflectores de desviación x y de desviación y: a_{1x} y a_{2x} así como a_{1y} y a_{2y} establecidos para los planos x-z e y-z respectivamente. En el algoritmo usamos un método bastante simple que determina las pendientes de barrido de frecuencia, que provocará que el punto se mueva en un plano en una z predeterminada en la dirección deseada con una velocidad v deseada.

En el sistema de escaneo 100 representado en la figura 3, los deflectores 12 y 22 de la unidad de compensación de deriva 110 se plasman como imágenes sobre los deflectores 22' y 12' de la unidad de escáner 120. El diseño del sistema óptico se ha hecho para astigmatismo cero en el plano focal nominal del microscopio que incorpora el sistema de escaneo 100, el astigmatismo aumentaría casi linealmente con la distancia Δz desde este plano, si los valores de pendiente en los deflectores x e y fueran iguales. Estos se establecen sin embargo para astigmatismo cero o casi cero para cualquier plano $z = \text{constante}$, al seleccionar experimentalmente las pendientes de cada deflector para obtener el mejor punto focal posible PSF sobre todo el volumen escaneado. La condición de astigmatismo cero es $z_x = z_y$. El valor z en el plano x-z o y-z se puede determinar directamente de las pendientes en los deflectores respectivos:

$$z_x = \frac{M_x^2 f_{obj} \left(\frac{v_{ac}}{K_{1x}a_{1x} + K_{2x}a_{2x}} \right)}{M_x^2 \left(\frac{v_{ac}}{K_{1x}a_{1x} + K_{2x}a_{2x}} \right) + f_{obj}},$$

$$z_y = \frac{M_y^2 f_{obj} \left(\frac{v_{ac}}{K_{1y}a_{1y} + K_{2y}a_{2y}} \right)}{M_y^2 \left(\frac{v_{ac}}{K_{1y}a_{1y} + K_{2y}a_{2y}} \right) + f_{obj}}$$

donde M_x y M_y son la amplificación del sistema telecéntrico que vincula el sistema de escaneo 100 y el objetivo 200 en los planos respectivos.

Las diferencias de pendiente $\Delta a_x = a_{1x} - a_{2x}$, $\Delta a_y = a_{1y} - a_{2y}$ entre los dos deflectores 12, 12' y 22, 22' que desvían en la misma dirección x o y, respectivamente, se establecen mediante los parámetros deseados de deriva de punto: dirección y velocidad. La dirección se puede definir como el ángulo α de la dirección de deriva con respecto al eje x. Una dirección dada α y una velocidad dada v se pueden establecer por las diferencias de pendiente determinadas como:

$$K_{2x}(\lambda)a_{2x} - K_{1x}(\lambda)a_{1x} = \frac{v \cdot \cos(\alpha) \cdot M_x}{f_{obj}},$$

$$K_{2y}(\lambda)a_{2y} - K_{1y}(\lambda)a_{1y} = \frac{v \cdot \sin(\alpha) \cdot M_y}{f_{obj}}.$$

El nivel z del plano no cambia, si las pendientes en los dos deflectores (12, 12' y 22, 22') de una pareja (10 y 20) se desplazan simétricamente para mantener $K_{2x}(\lambda)a_{2x} + K_{1x}(\lambda)a_{1x} = \text{constante}$ y $K_{2y}(\lambda)a_{2y} + K_{1y}(\lambda)a_{1y} = \text{constante}$.

Escaneo 3D

Cuando no se usan cambios de frecuencia en el tiempo lineales, en cambio se usan cambios de frecuencia en el tiempo no lineales, y al mismo tiempo no se mantiene desplazamiento simétrico en las pendientes de los diferentes

deflectores, en principio se puede lograr escaneo a lo largo de camino 3D arbitrario, dado por la función $z = f(x,y)$, x,y,z que son las coordenadas cartesianas del volumen de muestra, p. ej. con el origen en el punto definido por la intersección del eje óptico z y el plano focal nominal del objetivo. Las ecuaciones básicas para las velocidades usando los valores de pendiente bien conocidos a_{1x} etc. son:

$$v_{z_x} = 2M_x f_{obj} \frac{K_{2x}K_{1x}(\dot{a}_{2x}a_{1x} - \dot{a}_{1x}a_{2x})}{[M_x(K_{2x}a_{2x} - K_{1x}a_{1x}) + (K_{2x}a_{2x} + K_{1x}a_{1x})]^2}$$

$$v_{z_y} = 2M_y f_{obj} \frac{K_{2y}K_{1y}(\dot{a}_{2y}a_{1y} - \dot{a}_{1y}a_{2y})}{[M_y(K_{2y}a_{2y} - K_{1y}a_{1y}) + (K_{2y}a_{2y} + K_{1y}a_{1y})]^2}$$

Pero para que el punto no se disperse en el espacio, siempre se debe cumplir $z_x = z_y$ y $v_{zx} = v_{zy}$. Estos dan restricciones sobre los posibles valores de las pendientes y sus derivadas temporales, $\dot{a}_{1x}$, $\dot{a}_{2x}$ etc.:

$$M_x \frac{K_{2x}a_{2x} - K_{1x}a_{1x}}{K_{2x}a_{2x} + K_{1x}a_{1x}} = M_y \frac{K_{2y}a_{2y} - K_{1y}a_{1y}}{K_{2y}a_{2y} + K_{1y}a_{1y}}$$

10 y

$$2M_x f_{obj} \frac{K_{2x}K_{1x}(\dot{a}_{2x}a_{1x} - \dot{a}_{1x}a_{2x})}{[M_x(K_{2x}a_{2x} - K_{1x}a_{1x}) + (K_{2x}a_{2x} + K_{1x}a_{1x})]^2} =$$

$$= 2M_y f_{obj} \frac{K_{2y}K_{1y}(\dot{a}_{2y}a_{1y} - \dot{a}_{1y}a_{2y})}{[M_y(K_{2y}a_{2y} - K_{1y}a_{1y}) + (K_{2y}a_{2y} + K_{1y}a_{1y})]^2}$$

La coordenada z se puede expresar generalmente como:

$$z = f_{obj} - \frac{f_{obj}}{M_x \frac{K_{2x}a_{2x} - K_{1x}a_{1x}}{K_{2x}a_{2x} + K_{1x}a_{1x}} + 1} = f_{obj} - \frac{f_{obj}}{M_y \frac{K_{2y}a_{2y} - K_{1y}a_{1y}}{K_{2y}a_{2y} + K_{1y}a_{1y}} + 1}$$

Ejemplo 1

15 En una configuración ejemplar a_{1x} y a_{2x} se controlan según las ecuaciones: $a_{1x} = b_{1x}t + c_{1x}$, and $a_{2x} = b_{2x}t$.

En este caso:

$$\dot{a}_{1x} = b_{1x}, \dot{a}_{2x} = b_{2x},$$

Además, tomando un sistema de escaneo 100 en donde los deflectores 12, 12' son idénticos: $K_{1x} = K_{2x} = K_x$ así:

$$z_x = f_{obj} - \frac{f_{obj}}{M_x \frac{(b_{1x} - b_{2x})t + c_{1x}}{(b_{1x} + b_{2x})t + c_{1x}} + 1},$$

$$v_{z_x} = 2M_x f_{obj} \frac{c_{1x}b_{2x}}{[M_x(b_{1x}t - b_{2x}t + c_{1x}) + (b_{2x}t + b_{1x}t + c_{1x})]^2}.$$

Usando estos valores las frecuencias en una pareja de deflectores dada 10, p. ej. x son:

$$f_{1x} = f_{10x} + b_{1x}t^2 + c_{1x}t, \text{ y } f_{2x} = f_{20x} + b_{2x}t^2$$

Con estos se puede determinar la coordenada x :

$$x = f_{obj} K_x M_x ((b_{1x} - b_{2x})t^2 + c_{1x}t + (f_{10x} - f_{20x})).$$

25 Las consideraciones anteriores se pueden aplicar para controlar el escaneo en dirección y de manera similar:

$$a_{1y} = b_{1y}t + c_{1y}, \text{ y } a_{2y} = b_{2y}t \text{ y } K_{1y} = K_{2y} = K_y$$

desde la que de la misma manera se puede determinar la coordenada y:

$$y = f_{obj} K_y M_y \left((b_{1y} - b_{2y}) t^2 + c_{1y} t + (f_{10y} - f_{20y}) \right).$$

Usando las restricciones establecidas para z ($z_x = z_y$, y $v_{zx} = v_{zy}$) se pueden encontrar restricciones entre b_{1x} , b_{2x} , b_{1y} , b_{2y} , c_{1x} , c_{1y} , f_{10x} , f_{20x} , f_{10y} , f_{20y} .

- 5 A fin de hacer más simples las ecuaciones f_{10x} , f_{20x} se eligen como: $f_{10x} = d_x$, y $f_{20x} = 0$ y $f_{10y} = d_y$, y $f_{20y} = 0$.

En este caso las restricciones anteriores dan como resultado:

$$d_y = \frac{y - x}{f_{obj} M_y K_y} + \frac{M_x}{M_y} d_x.$$

Se puede establecer una restricción adicional al requerir que la velocidad a lo largo de z sea constante con t, lo que significa que los términos dependientes de t en la expresión de v_z deben tener coeficientes cero.

- 10 Esto pone la restricción a los coeficientes b:

$$b_{1x} = \frac{(-1 + M_x)}{(1 + M_x)} b_{2x}.$$

Aplicando esto a la fórmula de x (y simétricamente a y), se obtiene:

$$x = M_x K_x f_{obj} \left(\frac{-2b_{1x}}{M_x - 1} t^2 + c_{1x} t + d_{1x} \right)$$

y la velocidad a lo largo de x por consiguiente:

$$15 \quad v_x = \left(\frac{-4b_{1x}}{M_x - 1} t + c_{1x} \right)$$

la expresión de z:

$$z = \left(\frac{M_x f_{obj} c_{1x} (M_x + 1) - 2M_x b_{2x} t}{(M_x + 1)(M_x + 1)c_{1x}} \right).$$

- 20 Para evitar la dependencia que v_x tiene de t (y la dependencia que x tiene de t^2) b_{1x} se puede establecer como $b_{1x} = 0$. Esto implica inmediatamente $b_{2x} = 0$ que daría como resultado $v_{zx} = 0$, a menos que la amplificación entre las celdas y el objetivo en el plano x-z sea 1: $M_x = 1$.

- 25 Si $b_{1x} = 0$ y $M_x = 1$ simultáneamente, surgen fórmulas muy simples para las coordenadas, dado que únicamente la pendiente de la frecuencia en los segundos deflectores x 12' e y 22' debe variar con el tiempo. Para estas dos amplificaciones $M_x = M_y = 1$ debe estar restringido. Esto se puede satisfacer casi con una configuración que implica lentes de longitud focal larga (comparada con las distancias entre los deflectores x e y 12, 12', 22, 22' y los tamaños de deflector l), o se satisface exactamente con lentes astigmáticas de cilindro diseñado especialmente. En este caso simple las coordenadas son:

$$x = K_x f_{obj} (c_{1x} t + d_{1x}), \quad y = K_y f_{obj} (c_{1y} t + d_{1y}),$$

$$z_x = \left(\frac{f_{obj} c_{1x} - 2b_{2x} t}{2c_{1x}} \right), \quad z_y = \left(\frac{f_{obj} c_{1y} - 2b_{2y} t}{2c_{1y}} \right)$$

y las velocidades:

$$30 \quad v_x = c_{1x}, \quad v_y = c_{1y}, \quad v_z = f_{obj} \frac{b_{2x}}{2c_{1x}}$$

Pero las restricciones z

$$(z_x = z_y) \frac{b_{2x}}{c_{1x}} = \frac{b_{2y}}{c_{1y}},$$

y

$$d_y = \frac{y - x}{f_{obj} K_y} + d_x$$

- 5 Cuando se desea escanear a lo largo de una trayectoria continua arbitraria las ecuaciones anteriores permiten establecer c_{1x} , c_{1y} y $d_y - d_x$ para determinar las coordenadas x , y deseadas, mientras que las coordenada z se pueden establecer por consiguiente al establecer b_{2x} , y b_{2y} , usando c_{1x} y c_{1y} determinados a partir de x e y .

Las realizaciones descritas anteriormente están pensadas únicamente como ejemplos ilustrativos y no se tienen que considerar como que limitan la invención. Para un experto en la técnica serán evidentes diversas modificaciones sin salir del alcance de protección determinado por las reivindicaciones adjuntas.

10

REIVINDICACIONES

1. Método para escanear a lo largo de una trayectoria de escaneo tridimensional continua con un sistema de escáner (100) que comprende una primera pareja de deflectores acusto-ópticos (10) para desviar un punto focal de un haz electromagnético generado por un sistema de lentes consecutivas (200) que definen un eje óptico (z) en un plano x-z, y una segunda pareja de deflectores acusto-ópticos (20) para desviar el punto focal en un plano y-z que es sustancialmente perpendicular al plano x-z, caracterizado por pasar el haz electromagnético a través de las parejas primera y segunda de deflectores acusto-ópticos (10, 20) mientras se proporcionan cambios en el tiempo de frecuencia acústica dependientes del tiempo, que cambian con el tiempo continuamente y no linealmente en los deflectores (12, 12') de la primera pareja de deflectores (10) y en los deflectores (22, 22') de la segunda pareja de deflectores (20) para provocar que el punto focal del haz electromagnético se mueva continuamente a lo largo de la trayectoria de escaneo.
2. El método según la reivindicación 1, caracterizado por cambiar los cambios en el tiempo de frecuencia acústica al:
 - establecer una discordancia de pendiente entre los barridos de frecuencia acústica de los deflectores (12, 12') de la primera pareja de deflectores (10) a fin de provocar que el punto focal se mueva a lo largo del eje x con una primera velocidad (v_x), y
 - 15 - establecer una discordancia de pendiente entre los barridos de frecuencia acústica de los deflectores (22, 22') de la segunda pareja de deflectores (20) a fin de provocar que el punto focal se mueva a lo largo del eje y con una segunda velocidad (v_y) habiendo considerado la primera velocidad (v_x) para mover el punto focal continuamente a lo largo de la trayectoria de escaneo y
 - 20 - cambiar los cambios en el tiempo de frecuencia acústica con el tiempo de manera que las pendientes de frecuencia en los dos deflectores (12, 12' y 22, 22') de una pareja (10, 20) se desplazan no simétricamente a fin de provocar que el punto focal se mueva a lo largo del eje z con una tercera velocidad (v_z) habiendo considerado la primera y segunda velocidad (v_x y v_y) para mover el punto focal continuamente a lo largo de la trayectoria de escaneo tridimensional.
3. El método según la reivindicación 2, caracterizado por:
 - 25 - cambiar los cambios en el tiempo de frecuencia acústica en los deflectores (12, 12') de la primera pareja de deflectores (10) según la función: $f_{1x} = f_{10x} + b_{1x}t^2 + c_{1x}t$, y $f_{2x} = f_{20x} + b_{2x}t^2 + c_{2x}t$ y
 - cambiar los cambios en el tiempo de frecuencia acústica en los deflectores (22, 22') de la segunda pareja de deflectores (20) según la función: $f_{1y} = f_{10y} + b_{1y}t^2 + c_{1y}t$, y $f_{2y} = f_{20y} + b_{2y}t^2 + c_{2y}t$ y
 - 30 - determinar constantes b_{1x} , b_{2x} , b_{1y} , b_{2y} , c_{1x} , c_{2x} , c_{1y} , c_{2y} , f_{10x} , f_{20x} , f_{10y} , f_{20y} de manera que los dos parejas de deflectores (10, 20) produzcan las mismas coordenadas z ($z = z_x = z_y$) y las mismas terceras velocidades ($v_z = v_{zx} = v_{zy}$) para el punto focal.

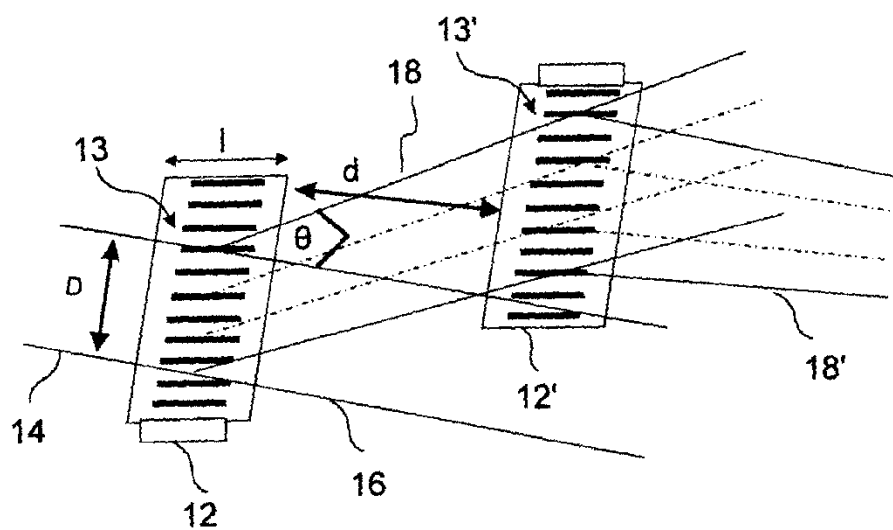


Figura 1

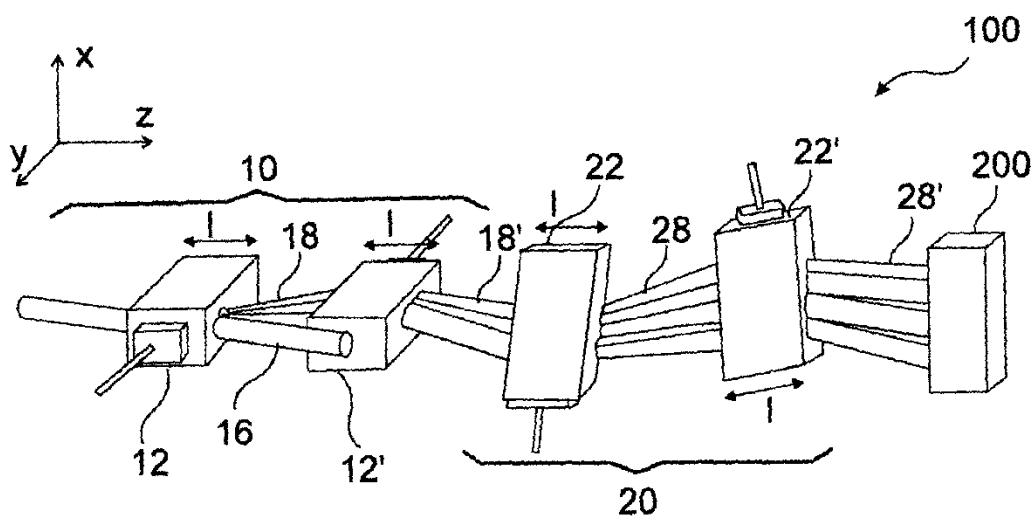


Figura 2

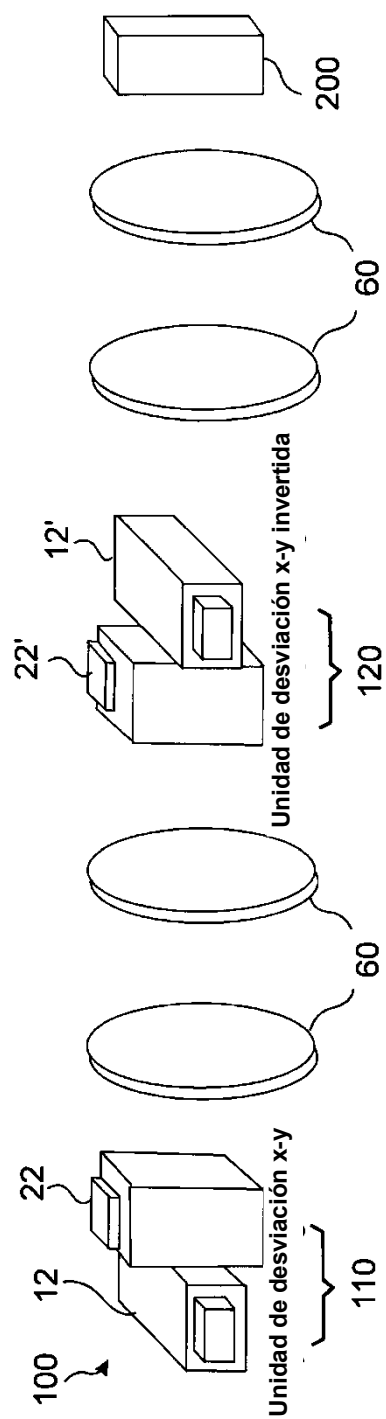


Figura 3