

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 704 950**

51 Int. Cl.:

**G02B 5/20** (2006.01)

**H04N 5/232** (2006.01)

**H04N 5/33** (2006.01)

**G01J 1/42** (2006.01)

**G02B 13/14** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.12.2015 PCT/EP2015/080777**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.06.2016 WO16102453**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.12.2015 E 15816180 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.12.2018 EP 3237860**

54 Título: **Sistema de formación de imagen de gran campo infrarrojo**

30 Prioridad:

**22.12.2014 FR 1463070**

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

**20.03.2019**

73 Titular/es:

**OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE  
RECHERCHES AÉROSPATIALES (ONERA)  
(100.0%)  
Chemin de la Hunière  
91120 Palaiseau, FR**

72 Inventor/es:

**DRUART, GUILLAUME;  
GRULUIS, TATIANA;  
GUERINEAU, NICOLAS y  
DESCHAMPS, JOËL**

74 Agente/Representante:

**STEPHANN, Valérie**

**ES 2 704 950 T3**

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

**DESCRIPCIÓN**

Sistema de formación de imagen de gran campo infrarrojo

5 **Ámbito técnico**

La presente invención está relacionada con el ámbito de la formación de imagen de gran campo.

10 De manera más precisa, la invención se refiere a un sistema de formación de imagen de gran campo para el ámbito espectral infrarrojo que comprende un recinto de vacío abierto ópticamente para el paso de los rayos de campo que provienen de la escena que hay que formar en imagen, una cámara oscura enfriada colocada en el interior del recinto de vacío y provista de un diafragma frío, un detector infrarrojo colocado en el interior de la cámara oscura enfriada y un dispositivo de conjugación óptica de los rayos de campo con el detector.

15 **Estado de la técnica**

El experto en la materia conoce un sistema de este tipo, en concreto, por el ejemplo que da de ello la patente de los Estados Unidos publicada con el número US4783593A, considerada como que es el estado de la técnica más cercano.

20 Particularmente, esta patente describe un sistema de formación de imagen de gran campo infrarrojo que comprende un recinto de vacío abierto ópticamente por una ventanilla que permite el paso de los rayos de campo que provienen de la escena que hay que formar en imagen en el recinto de vacío. Además, este sistema comprende una cámara oscura enfriada colocada en el interior del recinto de vacío y provista de un diafragma frío, un detector infrarrojo  
25 colocado en el interior de la cámara oscura enfriada y un dispositivo de conjugación óptica de los rayos de campo con el detector.

30 Como se ilustra en la figura 3 de la patente de los Estados Unidos US4783593A, el dispositivo de conjugación óptica mencionado incluye una lente caliente 16 (que es el objetivo de este dispositivo) que está colocada en el exterior del recinto de vacío y lleva lo esencial de la potencia óptica del sistema de formación de imagen. Particularmente, la lente caliente 16 forma una imagen intermedia real de los rayos de campo que provienen de la escena que hay que formar en imagen sobre un plano en el exterior del recinto de vacío. El dispositivo de conjugación óptica incluye, además, un sistema telecéntrico de recogida de esta imagen intermedia. Particularmente, este sistema telecéntrico  
35 comprende una primera lente caliente 17 en el exterior del recinto de vacío que colima los rayos que provienen del plano de la imagen intermedia y una segunda lente 18, denominada lente fría, en el interior de la cámara oscura enfriada que focaliza sobre el detector los rayos colimados por la primera lente caliente 17. La lente fría 18 está colocada a una distancia de la lente caliente 16 superior a la longitud focal de la lente caliente 16 y, además, la distancia entre el diafragma frío y el detector infrarrojo de la cámara oscura enfriada es sustancialmente igual al doble de la longitud focal de la lente fría 18.

40 El efecto del dispositivo de conjugación óptica mencionado más arriba es que se forma una imagen intermedia entre la lente caliente 16 y la primera lente caliente 17 del sistema telecéntrico, de modo que se permita cambiar el ángulo de campo del sistema de formación de imagen de gran campo infrarrojo cambiando sencillamente el objetivo (la lente caliente 16). Particularmente, se conoce que un objetivo con una distancia focal proporciona un gran ángulo de campo. Al contrario, un objetivo con una distancia focal larga proporciona un ángulo de campo escaso. De este modo, sustituyendo un objetivo que tiene una distancia focal corta con un objetivo que tiene una distancia focal larga, el ángulo de campo del sistema de formación de imagen se cambia de un ángulo de campo grande a un  
45 ángulo de campo escaso.

50 Además, debe señalarse que en el sistema de formación de imagen de gran campo infrarrojo de la patente mencionada, un eventual error de posicionamiento de la lente fría 18 en la cámara oscura enfriada y, por lo tanto, un error de la longitud focal del sistema, se corrige por un ajuste de la posición de la lente caliente 16 con respecto a la lente fría 18, sin necesitar una intervención sobre la lente fría 18 en el interior del recinto de vacío, estando, de manera general, este recinto de vacío sellado.

55 Sin embargo, este sistema de la técnica anterior presenta varios inconvenientes, en concreto, una longitud importante relacionada con el número de lentes y con la longitud de la cámara oscura enfriada, una duración elevada de enfriamiento relacionada con la longitud importante de la cámara oscura enfriada y una sensibilidad importante a las variaciones de temperatura de la lente caliente 16.

60 El problema que se propone resolver la presente invención es el diseño de un sistema de formación de imagen compacto de gran campo infrarrojo que permita corregir de manera eficaz un error de posicionamiento de la lente fría en la cámara oscura enfriada, sin intervenir sobre la lente fría y que resuelva los inconvenientes de la técnica anterior mencionados más arriba.

65

El documento WO 03/044476 A1 divulga un aparato de formación de imagen infrarrojo que comprende una lente esférica. El documento WO 2012/140389 A1 divulga un sistema de formación de imagen que comprende una lente de Fresnel. El documento de los Estados Unidos US 3.492.058 divulga un ensamblaje de lentes para un detector infrarrojo. El documento WO 2012/035509 A1 divulga un sistema óptico de formación de imagen de FTM mejorada.  
 5 El documento WO 2010/040914 A2 divulga un sistema de formación de imagen de gran campo infrarrojo en un recinto de vacío. Ninguno de estos documentos resuelve el problema técnico anteriormente citado.

#### Definiciones

10 En lo que sigue, se entiende por "lente" un componente óptico transparente destinado a hacer converger o divergir la luz. Una lente posee, por lo tanto, una potencia óptica no nula y al menos uno de sus dioptrios ópticos presenta un radio de curvatura no nulo.

15 Los radios de curvatura de una lente tienen un valor algebraico. En lo que sigue, se utilizará la siguiente convención de signo: el valor del radio de curvatura del dioptrio es positivo si el centro de curvatura del dioptrio está situado a la derecha de la cúspide del dioptrio y el valor del radio de curvatura del dioptrio es negativo si el centro de curvatura del dioptrio está situado a la izquierda de la cúspide del dioptrio.

20 Una lámina de caras paralelas, que no posee una potencia óptica y que presenta dos caras planas, no es una lente.

Una ventanilla es un componente que tiene una función de apertura óptica y de estanquidad. Una ventanilla puede ser una lente, una lámina de caras paralelas, etc.

#### Descripción de la invención

25 Para resolver uno o varios de los inconvenientes citados anteriormente, el sistema de formación de imagen de gran campo según la invención comprende un recinto de vacío abierto ópticamente por una ventanilla para el paso de los rayos de campo que provienen de la escena que hay que formar en imagen, una cámara oscura enfriada colocada en el interior del recinto de vacío y provista de un diafragma frío, un detector infrarrojo colocado en el interior de la cámara oscura enfriada y un dispositivo de conjugación óptica de los rayos de campo con el detector, comprendiendo el dispositivo de conjugación óptica al menos una lente fría convergente colocada en el interior de la cámara oscura enfriada para focalizar los rayos de campo sobre el detector infrarrojo y al menos una lente caliente convergente o divergente colocada en el exterior de la cámara oscura enfriada.

30 Con este objetivo a la vista, el sistema de formación de imagen de gran campo según la invención, por otra parte, conforme con el preámbulo citado anteriormente, está esencialmente caracterizado por que la lente fría convergente lleva lo esencial de la potencia óptica, el diafragma frío es el diafragma del dispositivo de conjugación óptica, la lente caliente forma una imagen intermedia virtual situada ya sea aguas arriba de la lente caliente, ya sea aguas abajo de la lente fría. En las dos configuraciones, la forma de la lente caliente es tal que el valor absoluto de la diferencia entre los radios de curvatura  $R_g$  y  $R_d$  de los dos dioptrios de la lente caliente es inferior o igual a  $e(1-1/n)$ , donde  $e$  y  $n$  son respectivamente el espesor y el índice óptico de la lente caliente.

Unas características o unos modos de realización particulares, utilizables solos o en combinación, son:

- 45
- la lente caliente es convergente y está colocada a una distancia de la lente fría inferior a la longitud focal de dicha lente caliente, de modo que la imagen intermedia virtual está situada aguas abajo de la lente fría (es decir, después de la lente fría en el sentido de propagación de los rayos de campos), formando la combinación de la lente caliente y de la lente fría una arquitectura óptica del tipo Petzval;
  - 50 • la lente caliente es divergente y la imagen intermedia virtual está situada aguas arriba de la lente caliente (es decir, antes de la lente caliente en el sentido de propagación de los rayos de campos), formando la combinación de la lente caliente y de la lente fría una arquitectura óptica del tipo retrofoco;
  - la lente fría tiene un diámetro inferior al tamaño del detector;
  - la lente caliente es un menisco (siendo un menisco una lente cuyos dos dioptrios son esféricos y los centros de las esferas están situados del mismo lado del plano de la lente);
  - 55 • la lente fría es un menisco;
  - la lente fría tiene una forma en planoconvexa;
  - la lente fría planoconvexa tiene un espesor inferior a la décima parte de su diámetro;
  - la lente fría es una lente de Fresnel;
  - la lente de Fresnel tiene un orden de difracción superior a 5;
  - 60 • un filtro espectral está colocado en el recinto de vacío;
  - el filtro espectral está colocado en la cámara oscura enfriada aguas arriba o aguas abajo de la lente fría;
  - el filtro espectral está colocado sobre la lente fría;
  - una lámina está colocada al nivel del diafragma frío, dependiendo la apertura de la lámina de la banda espectral utilizada en el sistema de formación de imagen de gran campo;
  - 65 • el detector es un detector biespectral que es sensible a dos bandas espectrales diferentes;
  - la ventanilla también tiene una función de lente caliente.

En resumen, un aspecto fundamental de la invención es que su arquitectura óptica es compatible con un entorno criogénico (existencia de una cámara enfriada en un recinto de vacío), contrariamente a las arquitecturas del estado de la técnica teniendo también lo esencial de la potencia óptica del sistema óptico llevada por su lente fría.

5 Gracias a la invención, la masa óptica que hay que enfriar es muy reducida, de manera que se obtengan unos tiempos de enfriamiento cortos. Esta masa óptica reducida puede obtenerse por al menos uno de tres planteamientos siguientes:

- 10 - se integra el mínimo de lentes frías (en el ejemplo de las figuras más abajo, no se utiliza más que una sola lente fría)
- se reduce el diámetro de la lente fría sea la que sea su forma (esto es, por lo tanto, válido también en el caso de una lente fría que es una lente de Fresnel), lo que reduce la masa que hay que enfriar y, por lo tanto, la duración
- 15 de enfriamiento
- una lente fría que puede ser muy adelgazada, en concreto, si es planoconvexa y en un modo de realización particular, un filtro espectral puede depositarse sobre el dioptrio plano de la lente planoconvexa reduciendo también de este modo la masa que hay que enfriar.
- 20

Otra ventaja de la invención es que el ajuste de los radios de curvatura de la lente caliente, permite corregir un error de posicionamiento de la lente fría, que una vez integrada en un recinto de vacío sellado, ya no puede desplazarse.

25 Por otra parte, estando lo esencial de la potencia óptica llevada por la lente fría, el sistema de formación de imagen es atermal (es decir, que es sólido a las variaciones de temperatura).

#### Breve descripción de las figuras

30 La invención se comprenderá mejor tras la lectura de la descripción que sigue, hecha únicamente a título de ejemplo y con referencia a las figuras adjuntas en las que:

- La figura 1 representa un esquema de un sistema de formación de imagen de gran campo infrarrojo según un primer modo de realización de la invención;
- 35 - La figura 2 representa un esquema de un sistema de formación de imagen de gran campo infrarrojo según un segundo modo de realización de la invención donde se añade un filtro espectral;
- La figura 3a representa un esquema de un sistema óptico procedente de un software convencional ZEMAX, teniendo este sistema óptico la misma arquitectura óptica que el sistema de formación de imagen de gran campo de la figura 2, salvo que la lente fría convergente de este sistema óptico es una lente planoconvexa en lugar de un menisco;
- 40 - La figura 3b representa un diagrama con las prestaciones ópticas del sistema óptico de la figura 3a en el caso de un error de posicionamiento de la lente fría.
- 45 - La figura 4a representa un diagrama con las prestaciones ópticas del sistema óptico de la figura 3a en el caso de un error de posicionamiento de la lente fría de +300 micrómetros con respecto al detector.
- La figura 4b representa un diagrama con las prestaciones ópticas mejoradas del sistema óptico de la figura 3a después de sustitución de la lente caliente por otra lente caliente de espesor adaptado para corregir dicho error de posicionamiento de la lente fría de +300 micrómetros con respecto al detector.
- 50 - La figura 5a representa un diagrama con las prestaciones ópticas del sistema óptico de la figura 3a en el caso de un error de posicionamiento de la lente fría de -300 micrómetros con respecto al detector.
- 55 - La figura 5b representa un diagrama con las prestaciones ópticas mejoradas del sistema óptico de la figura 3a después de sustitución de la lente caliente por otra lente caliente de espesor adaptado para corregir dicho error de posicionamiento de la lente fría de -300 micrómetros con respecto al detector.

#### 60 Modos de realización

Los ejemplos de realización a continuación se aplican para cualquier sistema de formación de imagen de gran campo en unas bandas espectrales de infrarrojo, en concreto, en las bandas espectrales II (longitud de onda entre 3 y 5 micrómetros) y III (longitud de onda entre 8 y 12 micrómetros).

65

La figura 1 representa un sistema de formación de imagen de gran campo 1 para el ámbito espectral infrarrojo que comprende un recinto de vacío 13 abierto ópticamente para el paso de los rayos de campo que provienen de una escena que hay que forman en imagen situada en el infinito (es decir, situada a una distancia superior a diez veces la longitud focal o a una distancia tal que los frentes de onda de los rayos de campo son prácticamente planos). Los rayos de campo son por definición los rayos luminosos que provienen de la escena situada en el infinito.

En el modo de realización de la figura 1, el recinto de vacío 13 incluye una ventanilla 14 que permite abrir ópticamente el recinto de vacío 13 asegurando al mismo tiempo su estanquidad. En este caso de aquí, los rayos de campo pasan por la ventanilla 14 al interior del recinto de vacío 13.

Además, el sistema de formación de imagen de gran campo 1 comprende una cámara oscura enfriada 3 colocada en el interior del recinto de vacío 13 y provista de un diafragma frío 5. Debe señalarse que la cámara oscura enfriada 3 también se conoce en el estado de la técnica como "pantalla fría".

El sistema de formación de imagen de gran campo 1 comprende, además, un detector infrarrojo 2 colocado en el interior del recinto de vacío 13.

En un ejemplo, el detector infrarrojo 2 es un detector biespectral que es sensible a dos bandas espectrales diferentes. En otro ejemplo, el detector biespectral es sensible a la banda espectral II y a la banda espectral III.

Además, el sistema de formación de imagen de gran campo 1 comprende un dispositivo de conjugación óptica de los rayos de campo con el detector infrarrojo 2. Este dispositivo de conjugación óptica comprende al menos una lente fría convergente 4 colocada en el interior de dicha cámara oscura enfriada 3 para focalizar los rayos de campo sobre el detector infrarrojo 2 y al menos una lente caliente convergente 8 colocada en el exterior de la cámara oscura enfriada 3 y más particularmente en el exterior del recinto de vacío 13. En otro ejemplo, la lente caliente 8 es divergente.

Ventajosamente, en el modo de realización de la figura 1, solamente una lente caliente convergente 8 está colocada en el exterior del recinto de vacío 13 y una sola lente fría convergente 4 está colocada en la cámara oscura enfriada 3, permitiendo, de este modo, por una parte, reducir la longitud del sistema de formación de imagen de gran campo 1 y, por otra parte, reducir la masa óptica que hay que enfriar.

Además, en otro modo de realización (no ilustrado en las figuras) la ventanilla 14 desempeña también el papel de la lente caliente 8. En este caso de aquí, no hay necesidad de poner una lente caliente 8 aguas arriba de la ventanilla 14 (es decir, antes de la ventanilla 14 en el sentido de propagación de los rayos de campos), lo que permite reducir la longitud del sistema de formación de imagen de gran campo.

En el modo de realización de la figura 1, la lente caliente convergente 8 y la lente fría convergente 4 son unos meniscos. En otro ejemplo no ilustrado en las figuras, la lente fría convergente 4 tiene una forma planoconvexa. Debe señalarse que la forma de cada lente (caliente o fría) se optimiza, de manera general, para reducir las aberraciones ópticas. En el ámbito espectral del infrarrojo, por el hecho de los índices elevados, las formas optimizadas de las lentes tienen tendencia a ser unos meniscos. En el caso particular de la lente fría convergente 4 de forma planoconvexa, una forma de este tipo permite facilitar la fabricación de una lente de espesor reducido, pudiendo este espesor, entonces, tener un valor inferior al dado por la regla de ingeniería de una décima parte de su diámetro. Este espesor reducido permite limitar al máximo la masa de la óptica fría que hay que enfriar.

Por otra parte, debe señalarse que el sistema de formación de imagen de gran campo 1 de la figura 1 es un sistema de arquitectura óptica de tipo Petzval, caracterizado por la sucesión de una primera y de una segunda lente convergente lo suficientemente espaciadas la una de la otra como para que no se consideren como constitutiva de un grupo óptico. En particular, en este sistema de formación de imagen de gran campo 1, la lente caliente convergente 8 está colocada a una distancia de la lente fría convergente 4 inferior a la longitud focal de la lente caliente convergente 8 y la distancia entre el diafragma frío 5 y el detector infrarrojo 2 es sustancialmente igual a la longitud focal de la lente fría convergente 4. De este modo, la lente caliente convergente 8 forma una imagen intermedia virtual situada aguas abajo de la lente fría convergente 4. Además, en este sistema de formación de imagen de gran campo 1, el diafragma frío 5 es el diafragma del dispositivo de conjugación óptica.

Debe señalarse que el sistema de formación de imagen de gran campo 1 de la figura 1 tiene una longitud reducida en comparación con la longitud de la patente de los Estados Unidos US4783593A donde la lente caliente convergente está colocada a una distancia de la lente fría superior a la longitud focal de la lente caliente y donde la distancia entre el diafragma frío y el detector infrarrojo es el doble que la longitud focal de la lente fría. Además, el hecho de que en el caso de la configuración de tipo Petzval de la figura 1 la distancia entre el diafragma frío 5 y el detector infrarrojo 2 del sistema de formación de imagen de gran campo 1 sea sustancialmente igual a la longitud focal de la lente fría convergente 4, permite tener una cámara oscura enfriada 3 de una longitud inferior a la del documento de los Estados Unidos US4783593A y, de este modo, tener una duración menos elevada de enfriamiento.

Las distancias entre los diferentes elementos de la arquitectura óptica se definen en el transcurso de una etapa de optimización con la ayuda de un software de diseño óptico y no hay ecuaciones sencillas que den la posición exacta de estos diferentes elementos. Un experto en la materia sabe determinar estas distancias, en concreto, si se le precisa que se trata de una arquitectura óptica de tipo Petzval.

5 En otro ejemplo no ilustrado en las figuras, el sistema de formación de imagen de gran campo es un sistema de arquitectura óptica de tipo retrofoco caracterizado por la sucesión de una primera lente, divergente y, luego, de una segunda lente, convergente, siendo esta segunda lente convergente fría y siendo esta primera lente divergente caliente y formando una imagen intermedia situada aguas arriba de esta primera lente divergente.

10 Debe señalarse que teniendo en cuenta las restricciones para abrir y volver a cerrar en un recinto de vacío, desacoplamos el diafragma de la primera lente para colocarlo entre la primera y la segunda lente de la arquitectura óptica considerada. Esto permite colocar la primera lente en el exterior del recinto de vacío obteniendo al mismo tiempo lo suficientemente de espacio entre la primera lente y el diafragma, con el fin de insertar una ventanilla que va a sellar el recinto de vacío.

15 En el caso particular donde un sistema de formación de imagen de gran campo es de tipo Petzval (véase el sistema de la figura 1), se trata, de hecho, de un caso particular de arquitectura donde la segunda lente (lente fría) tiene una potencia óptica superior a la de la primera lente (lente caliente). La concentración de la potencia óptica sobre la lente fría permite tener una propiedad de atermalización del sistema óptico a pesar de la presencia de la lente caliente en el exterior del recinto de vacío.

20 Debe señalarse que en el sistema de formación de imagen de gran campo 1 de la figura 1, la lente fría convergente 4 lleva lo esencial de la potencia óptica del sistema de formación de imagen, es decir, que la longitud focal de la lente fría convergente 4 es bastante más escasa que la longitud focal de la lente caliente convergente 8. De este modo, el sistema de formación de imagen de gran campo 1 no presenta una sensibilidad a las variaciones de temperatura. En efecto, la longitud focal  $f$  del sistema se define a partir de la longitud focal  $f_1$  de la primera lente de espesor  $e$  y de la longitud focal  $f_2$  de la segunda lente, por la relación  $1/f = 1/f_1 + 1/f_2 - e/f_1f_2$ , por lo tanto, de orden 1, como  $f_2 \gg f_1$  entonces,  $f = f_1$  y como  $f_1$  es atermalizada, entonces,  $f$  tampoco varía a las variaciones de temperatura. Al contrario, en el sistema de formación de imagen del documento de los Estados Unidos US4783593A, lo esencial de la potencia óptica lo lleva la lente caliente y, de este modo, este sistema presenta una sensibilidad a las variaciones de temperatura.

25 Debe señalarse que la forma de la lente caliente 8 convergente del sistema de formación de imagen de gran campo 1 es tal que el valor absoluto de la diferencia entre los radios de curvatura  $R_g$  y  $R_d$  de los dos dioptrios de la lente caliente convergente 8 es inferior o igual a  $e(1-1/n)$ , donde  $e$  y  $n$  son respectivamente el espesor y el índice óptico de la lente caliente convergente 8. Debe señalarse que en el ejemplo donde la lente caliente 8 es divergente, la forma de la lente caliente divergente 8 también respeta la condición mencionada más arriba para la forma de la lente caliente convergente 8.

30 Por otra parte, como se ilustra en la figura 1,  $R_g$  corresponde al radio de curvatura del dioptrio izquierdo de la lente caliente convergente 8, puesto que  $R_d$  corresponde al radio de curvatura del dioptrio derecho de la lente caliente convergente 8. El dioptrio izquierdo de la lente caliente convergente 8 está aguas arriba del dioptrio derecho de la lente caliente convergente 8 en el sentido de propagación de los rayos de campos. Debe señalarse que un dioptrio es una superficie que separa dos medios de índices ópticos diferentes, tradicionalmente un primer medio constituido por el material de la lente considerada y un segundo medio constituido por aire.

35 Se ha constatado que en el caso donde la forma de la lente caliente convergente 8 es tal que el valor absoluto de la diferencia entre los radios de curvatura de los dos dioptrios de la lente caliente convergente 8 es inferior o igual a  $e(1-1/n)$ , la longitud focal de la lente caliente convergente 8 se vuelve muy sensible a una variación de espesor de esta lente. En este caso de aquí, la longitud focal de la lente caliente convergente 8 puede ajustarse por un ajuste del espesor de esta lente.

40 Se conoce que un error de posicionamiento de la lente fría en la cámara oscura enfriada y, por lo tanto, un error de enfoque, puede corregirse ya sea por el ajuste del posicionamiento de la lente caliente convergente 8, como se hace en el documento de los Estados Unidos US4783593A, ya sea por el ajuste de la longitud focal de la lente caliente convergente 8.

45 Debe señalarse que en el sistema de formación de imagen de gran campo 1, no es posible corregir completamente un error de posicionamiento de la lente fría convergente 4 por un ajuste del posicionamiento de la lente caliente convergente 8, como en el documento de los Estados Unidos US4783593A. La razón es que en el sistema de formación de imagen de gran campo 1, lo esencial de la potencia óptica de este sistema la lleva la lente fría convergente 4 y ya no la lente caliente 8, como en el documento de los Estados Unidos US4783593A. De este modo, un ajuste del posicionamiento de la lente caliente convergente 8 no sería suficiente para corregir completamente un error de posicionamiento de la lente fría convergente 4, como es este el caso en el documento de los Estados Unidos US4783593A.

Sin embargo, en el sistema de formación de imagen de gran campo 1, la corrección de un error de posicionamiento de la lente fría convergente 4 en la cámara oscura enfriada 3 se efectúa por el ajuste del espesor de la lente caliente convergente 8, con la condición de que la diferencia entre los radios de curvatura de los dos dioptrios de la lente caliente convergente 8 debe ser inferior o igual a  $e(1-1/n)$ .

Ventajosamente, esta diferencia entre los radios de curvatura de los dos dioptrios de la lente caliente es no nula. En efecto, cuanto más tiende esta diferencia hacia 0, más sensible es la longitud focal de la lente a una variación de espesor de esta lente hasta un punto donde la lente se vuelve difícilmente realizable. Por lo tanto, es necesario encontrar un compromiso entre la sensibilidad de la longitud focal en función del espesor y la factibilidad de la lente.

Debe señalarse que el experto en la materia puede ajustar el espesor de la lente caliente convergente 8 según el caso particular de error de posicionamiento de la lente fría convergente 4 que desea corregir, sustituyendo la lente caliente convergente 8 por otra lente caliente convergente que tenga un espesor ajustado para corregir este error y que también tenga una forma que respete la condición mencionada más arriba. En el ejemplo donde la lente caliente 8 es divergente, el experto en la materia puede ajustar el espesor de la lente caliente convergente 8 según el caso particular de error de posicionamiento de la lente fría convergente 4 que desea corregir, sustituyendo la lente caliente convergente 8 por otra lente caliente divergente que tenga un espesor ajustado para corregir este error y que también tenga una forma que respete la condición mencionada más arriba.

Además, debe señalarse que en la patente de los Estados Unidos US4783593A, el sistema presenta un plano de imagen intermedia entre la óptica caliente y la óptica fría. Estando el campo de visión definido, en la configuración de esta patente, por la óptica caliente, es suficiente con cambiar la longitud focal de la óptica caliente para cambiar el campo de visión. En la presente invención, la óptica caliente y la óptica fría forman un todo, esto es, un objetivo de Petzval o un objetivo de tipo retrofoco y no se puede retirar la una o la otra de las ópticas de la arquitectura sin tener impacto en la calidad de imagen del sistema.

El ángulo de campo del sistema de formación de imagen de gran campo 1 puede fijarse en una gama entre  $10^\circ$  y  $90^\circ$  para una arquitectura de tipo Petzval. En el caso donde el ángulo de campo deseado sea más elevado (tradicionalmente entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ) que el de un sistema Petzval, la lente caliente es divergente y la lente fría es convergente, constituyendo la combinación de lente caliente y lente fría una arquitectura óptica de la familia de los retrofocos.

Tradicionalmente, para un ángulo de campo entre  $10^\circ$  y  $90^\circ$ , el sistema es más bien un Petzval, con todos los efectos bien conocidos relacionados con este tipo de arquitectura óptica. Una arquitectura de este tipo permite tener un tiro (distancia entre la última lente fría y el detector) sustancialmente igual a la mitad de la longitud focal del sistema.

Tradicionalmente, para un ángulo de campo entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , el sistema es más bien un retrofoco con todos los efectos bien conocidos relacionados con este tipo de arquitectura óptica. Una arquitectura de este tipo permite tener un tiro superior a la longitud focal del sistema.

Sin embargo, debe señalarse que las familias de arquitectura óptica pueden solaparse en lo que se refiere al ángulo de campo de visión.

A partir de lo que antecede, está claro que el sistema de formación de imagen de gran campo 1 permite, en compensación de ángulo de campo no modificable, corregir de manera eficaz un error de posicionamiento de la lente fría en la cámara oscura enfriada y reducir la longitud, la duración de enfriamiento y la sensibilidad a las variaciones de temperatura de los sistemas ópticos de formación de imagen con respecto al estado de la técnica.

La figura 2 ilustra otro modo de realización del sistema de formación de imagen de gran campo 1 que es idéntico al modo de realización de la figura 1, salvo por que también comprende un filtro espectral 7. El filtro espectral 7 puede utilizarse para limitar las bandas espectrales infrarrojas que hay que detectar por el detector infrarrojo 2 del sistema óptico. En un ejemplo, el filtro espectral 7 está adaptado para permitir el paso de los rayos de campo de una longitud de onda que corresponde a las bandas espectrales II y III.

Como se ilustra en la figura 2, el filtro espectral 7 está colocado al nivel del diafragma frío 5. Sin embargo, en otro ejemplo no ilustrado en las figuras, el filtro espectral 7 está colocado en la cámara oscura enfriada 3 aguas abajo de la lente fría convergente 4, es decir, después de la lente fría convergente 4 en el sentido de propagación de los rayos de campos. En otro ejemplo no ilustrado en las figuras, el filtro espectral 7 puede estar colocado en la cámara oscura enfriada 3 aguas arriba de la lente fría convergente 4, es decir, antes de la lente fría convergente 4 en el sentido de propagación de los rayos de campos.

En los casos mencionados más arriba, el filtro espectral 7 está colocado a lo largo del eje óptico de la lente fría convergente 4 en el interior de la cámara oscura enfriada 3.

Sin embargo, en otro ejemplo no ilustrado en las figuras, el filtro espectral 7 está colocado a lo largo del eje óptico de la lente fría convergente 4 en el exterior de la cámara oscura enfriada 3, pero todavía en el interior del recinto de vacío 13. Este modo de funcionamiento es, sin embargo, un modo de funcionamiento degradado.

5 Además, en otro ejemplo, el filtro espectral 7 puede estar colocado sobre el uno o los dos dioptrios de la lente fría convergente 4 de la figura 2 que es un menisco (siendo un menisco una lente cuyos dos dioptrios son esféricos, uno de los dioptrios cóncavo y el otro convexo, estando los centros de las esferas situados del mismo lado del plano de la lente).

10 En otro ejemplo, el sistema de formación de imagen de gran campo 1 es idéntico al modo de realización de la figura 2, salvo por que la lente fría convergente 4 tiene una forma de planoconvexa.

La forma en planoconvexa de la lente fría convergente permite considerar un espesor muy escaso de esta lente, lo que permite reducir de manera considerable la masa de la óptica que hay que enfriar.

15 Esta forma facilita, igualmente, el depósito del filtro espectral 7 que es, en general, una estructura multicapa. El hecho de que el filtro espectral 7 esté colocado sobre el dioptrio plano de la lente fría convergente 4 permite limitar al máximo la masa óptica que hay que enfriar evitando el recurso a una lámina específica para el filtrado espectral.

20 En otro ejemplo, el filtro espectral 7 está colocado sobre el dioptrio convexo de la lente fría convergente 4 que tiene una forma planoconvexa.

25 En otro ejemplo, un filtro espectral 7 puede estar colocado sobre cada uno de dos dioptrios de la lente fría convergente 4. Un ejemplo de caso donde esto podría ser ventajoso sería un caso donde la función de filtrado es compleja donde, puede ser necesario aplicar unas multicapas diferentes a cada lado de la lente fría convergente 4. En este caso, por lo tanto, se puede estar obligado a colocar unas multicapas sobre el dioptrio convexo y el dioptrio plano de la lente fría convergente 4 que es una lente de forma planoconvexa.

30 En otro ejemplo no ilustrado en las figuras, el sistema de formación de imagen de gran campo es idéntico al sistema de formación de imagen de gran campo 1 de la figura 2, salvo por que la lente fría convergente 4, que tiene una forma planoconvexa, es una lente de Fresnel.

35 Se conoce bien que, con respecto a una lente planoconvexa convencional, la lente de Fresnel reduce la flecha óptica de la lente recortándola en un conjunto de anillos concéntricos de sección prismática conocidos con el nombre de zonas de Fresnel. Para cada una de estas zonas, el espesor se reduce, lo que hace que la superficie global de la lente ya no sea homogénea, sino que se componga de varias superficies de misma curvatura, separadas por unas discontinuidades (por ejemplo, de espesor o de índice).

40 De este modo, la ventaja de tener una lente fría convergente 4 de forma planoconvexa que es una lente de Fresnel, en lugar de tener una lente fría convergente 4 de forma planoconvexa convencional, es que se puede adelgazar más la lente. De este modo, la masa de la lente fría convergente 4 se reduce.

45 En un ejemplo, la lente de Fresnel tiene un orden de difracción elevado que es superior a 5. Este orden de difracción elevado permite reducir el cromatismo axial con respecto al que se generaría por una lente de Fresnel convencional de orden de difracción igual a 1.

50 La utilización de una lente caliente en el exterior del recinto de vacío permite ventajosamente reducir el diámetro de la lente de Fresnel fría permitiendo que los rayos en el borde de campo lleguen según una incidencia media inclinada con respecto a la perpendicular del detector. Un diámetro reducido de lente de Fresnel permite que los rayos en el borde de campo iluminen menos discontinuidades y la calidad de imagen se encuentra por ello mejorada. Debe señalarse que, con el fin de limitar los efectos de sombras ocasionados por las discontinuidades, el lado fresnelizado de la lente fría se orienta preferentemente cara al detector.

55 En otro modo de realización no ilustrado en las figuras, una lámina está colocada al nivel del diafragma frío 5, cuya apertura depende de la banda espectral utilizada en el sistema de formación de imagen de gran campo 1. Se conoce bien que una lámina por definición es una lente de caras paralelas. El hecho de tener una lámina al nivel del diafragma frío 5 permite encontrar un compromiso entre la necesidad de tener una gran apertura para la banda III y la posibilidad de trabajar con una apertura menor para la banda II que permite limitar la amplitud de las aberraciones que hay que corregir, así como reducir la sensibilidad del sistema a los errores de fabricación y de posicionamiento de los elementos ópticos en la banda espectral II. Precisemos que la necesidad mencionada más arriba viene del hecho de que la mancha de imagen depende de la longitud de onda y de la apertura y, por lo tanto, que, para tener una mancha de imagen adaptada, en una misma superficie elemental centrada sobre un píxel, a la vez en banda II y en banda III, hace falta que el sistema en banda III esté más abierto que en banda II. No obstante, si se utiliza la apertura de la banda III para la banda II, el sistema producirá demasiadas aberraciones ópticas en banda II y la calidad de imagen estará degradada en banda II, de donde procede el interés de tener una lámina que modifique la apertura en función de la banda espectral.

Debe señalarse que el índice de refracción de la lente fría convergente 4 es preferentemente superior a 3. Los materiales utilizados para realizar una lente de este tipo pueden ser, por ejemplo, germanio, cuyo índice es igual a 4 o silicio, cuyo índice es igual a 3,5. De manera más general, la lente está realizada preferentemente con cualquier tipo de material de índice fuerte. Esto contribuye, en efecto, a mejorar las prestaciones del sistema, puesto que limitan las aberraciones geométricas gracias al índice fuerte y las aberraciones de cromaticidad por el hecho de su escasa dispersión cromática. Un índice fuerte de refracción permite, igualmente, reducir el radio de curvatura de la lente fría convergente 4 y, por lo tanto, realizar una lente más delgada.

Además, debe señalarse que preferentemente la lente caliente convergente 8 está compuesta por unos vidrios de calcogenuro (por ejemplo, unos vidrios de GASIR™). El índice refractivo de una lente de Gasir es menos sensible a las variaciones de temperatura que el índice refractivo de una lente de Germanio. De este modo, una lente caliente convergente de Gasir es menos sensible a las variaciones de temperatura que una lente caliente convergente de Germanio. Por lo tanto, se elegirán preferentemente unos materiales cuyo índice varíe poco a las variaciones de temperatura y que se contraigan poco a las variaciones de temperatura.

La figura 3a ilustra un esquema de un sistema óptico procedente de un software ZEMAX bien conocido por el experto en la materia, teniendo este sistema óptico la misma arquitectura óptica que el sistema de formación de imagen de gran campo de la figura 2, salvo que la lente fría convergente 4 de este sistema óptico es una lente planoconvexa en lugar de un menisco. En particular, como se ilustra en la figura 3a, el sistema óptico incluye una lente caliente convergente 8, una ventanilla 14, un filtro espectral 7, una lente fría convergente 4 que es una lente planoconvexa. El filtro espectral 7 está colocado al nivel del diafragma frío, como es este el caso para el filtro espectral 7 de la figura 2. Debe señalarse que la cámara oscura enfriada y el recinto de vacío de la figura 2 no están representados en el esquema de la figura 3a. Además, el esquema de la figura 3a ilustra unos rayos de campo que provienen de la escena que hay que formar en imagen y que forman diferentes ángulos de campo a1, a2 y a3.

Las principales magnitudes estructurales del sistema óptico de la figura 3a se listan más abajo:

Campo de visión: 57,4 °

Volumen: 31.4 mm

Longitud focal del sistema: 31.4 mm

Longitud focal de la lente caliente: 60.5 mm

Radio de curvatura Rg del dioptrio lado escena de la lente caliente inicial: 19,251 mm

Radio de curvatura Rd del dioptrio lado detector de la lente caliente: 21,251 mm

Espesor e de la lente caliente: 4.17 mm

Para la lente caliente, se respeta bien la condición  $(R_g - R_d) / e \approx 2,5$  mm (con  $n=2,5$ )

Longitud focal de la lente fría: 20,1 mm (se constata que se está cerca de la longitud focal del sistema óptico)

Radio de curvatura Rg del dioptrio lado escena de la lente fría planoconvexa: 58,87 mm Diámetro de la lente fría: 16 mm

Espesor de la lente fría: 0,7 mm (inferior a su diámetro/10 que vale 1,6 mm)

La lente fría es sólida a unos errores sobre el espesor.

Distancia lente caliente/lente fría: 14 mm

Distancia diafragma frío/detector: 18,6 mm

La figura 3b representa un diagrama con las prestaciones ópticas del sistema óptico de la figura 3a en el caso donde no hay un error de posicionamiento de la lente fría convergente 4.

En particular, el diagrama de la figura 3b ilustra la Función de Transferencia de Modulación (FTM) policromática procedente del software ZEMAX. El eje horizontal del diagrama corresponde a las frecuencias espaciales en ciclos por mm y el eje vertical del diagrama corresponde al módulo de la función óptica de transferencia. Las diferentes curvas ilustradas en el diagrama corresponden a los diferentes ángulos de campo de rayos de la figura 3a y la línea recta ilustrada en el diagrama corresponde al límite de difracción (véase "Límite Dif." en la figura 3b). Cuanto más se acerquen las curvas a la línea recta (límite de difracción) mejor es la calidad de imagen (resolución espacial) del

sistema de formación de imagen. Además, las barras verticales del diagrama de la figura 3b permiten asociar cada curva a un ángulo de campo (véanse, por ejemplo, los ángulos de campo  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  de la figura 3a que corresponden respectivamente a los ángulos de 0 grados, 15 grados y 28,70 grados ilustrados en la figura 3b). En particular, como se ilustra en la figura 3b, las barras verticales corresponden ya sea a la FTM sagital (S), ya sea a la FTM tangencial (T).

La figura 4a representa un diagrama con las prestaciones ópticas del sistema óptico de la figura 3a en el caso de un error de posicionamiento de la lente fría convergente de +300 micrómetros con respecto al detector. En particular, el diagrama de la figura 4a ilustra la Función de Transferencia de Modulación (FTM) policromática procedente del software convencional ZEMAX en el caso de un error de posicionamiento de la lente fría de +300 micrómetros con respecto al detector.

Como se ilustra en la figura 4a, las diferentes curvas están muy alejadas de la línea recta que corresponde al límite de difracción (véase "Límite Dif." en la figura 4a) y, de este modo, la calidad de imagen (resolución espacial) del sistema de formación de imagen está degradada.

La figura 4b representa un diagrama con las prestaciones ópticas mejoradas del sistema óptico de la figura 3a después de sustitución de la lente caliente de espesor 4,17 mm por otra lente caliente de espesor 4 mm adaptado para corregir dicho error de posicionamiento de la lente fría de +300 micrómetros con respecto al detector. Debe señalarse que el espesor  $e$  de 4 mm de la lente caliente que sustituye a la lente caliente de espesor  $e$  de 4,17 mm respeta bien la condición  $R_g - R_d (=2 \text{ mm}) < (1 - 1/n)e = 2,4 \text{ mm}$  (con  $n=2,5$ ).

En la figura 4b, las diferentes curvas están menos alejadas de la línea recta que corresponde al límite de difracción (véase "Límite Dif." en la figura 4b) en comparación con las diferentes curvas de la figura 4a que están muy alejadas de la línea recta. De este modo, la calidad de la imagen (resolución espacial) después de la sustitución de la lente caliente mencionada más arriba está mejorada.

La figura 5a representa un diagrama con las prestaciones ópticas del sistema óptico de la figura 3a en el caso de un error de posicionamiento de la lente fría convergente de - 300 micrómetros con respecto al detector. En particular, el diagrama de la figura 5a ilustra la Función de Transferencia de Modulación (FTM) policromática procedente del software convencional ZEMAX en el caso de un error de posicionamiento de la lente fría de -300 micrómetros con respecto al detector.

Como se ilustra en la figura 5a, las diferentes curvas están muy alejadas de la línea recta que corresponde al límite de difracción (véase "Límite Dif." en la figura 5a) y, de este modo, la calidad de la imagen (resolución espacial) del sistema de formación de imagen está degradada.

La figura 5b representa un diagrama con las prestaciones ópticas mejoradas del sistema óptico de la figura 3a después de sustitución de la lente caliente de espesor 4,17 mm por otra lente caliente de espesor 4.48 mm adaptado para corregir dicho error de posicionamiento de la lente fría de -300 micrómetros con respecto al detector. Debe señalarse que el espesor  $e$  de 4,48 mm de la lente caliente que sustituye a la lente caliente de espesor  $e$  de 4,17 mm respeta bien la condición  $R_g - R_d (=2 \text{ mm}) < (1 - 1/n)e \approx 2,6 \text{ mm}$  (con  $n=2,5$ ).

En la figura 5b, las diferentes curvas están menos alejadas de la línea recta que corresponde al límite de difracción (véase "Límite Dif." en la figura 5b) en comparación con las diferentes curvas de la figura 5a que están muy alejadas de la línea recta. De este modo, la calidad de la imagen (resolución espacial) del sistema de formación de imagen después de la sustitución de la lente caliente mencionado más arriba se mejora.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Sistema de formación de imagen de gran campo (1) para el ámbito espectral infrarrojo que comprende un recinto de vacío (13) abierto ópticamente por una ventanilla (14) para el paso de los rayos de campo que provienen de la escena que hay que formar en imagen, una cámara oscura enfriada (3) provista de un diafragma frío (5), un detector infrarrojo (2) colocado en el interior de la cámara oscura enfriada (3) y un dispositivo de conjugación óptica de los rayos de campo con el detector infrarrojo (2), comprendiendo el dispositivo de conjugación óptica al menos una lente fría convergente (4) colocada en el interior de dicha cámara oscura enfriada (3) para focalizar los rayos de campo sobre el detector infrarrojo (2) y al menos una lente caliente convergente o divergente (8) colocada en el exterior de dicha cámara oscura enfriada (3), caracterizado por que la lente fría convergente (4) lleva lo esencial de la potencia óptica; el diafragma frío (5) es el diafragma del dispositivo de conjugación óptica; la lente caliente (8) forma una imagen intermedia virtual situada ya sea aguas arriba de la lente caliente (8), ya sea aguas abajo de la lente fría (4) y la forma de la lente caliente (8) es tal que el valor absoluto de la diferencia entre los radios de curvatura ( $R_g$ ) y ( $R_d$ ) de los dos dioptrios de la lente caliente (8) es inferior o igual a  $e(1-1/n)$ , donde e y n son respectivamente el espesor y el índice óptico de la lente caliente (8).
- 10 2. Sistema según la reivindicación 1, en el que la lente caliente (8) es convergente y está colocada a una distancia de la lente fría (4) inferior a la longitud focal de dicha lente caliente (8), de modo que la imagen intermedia virtual esté situada aguas abajo de la lente fría, formando la combinación de la lente caliente (8) y de la lente fría (4) una arquitectura óptica del tipo Petzval.
- 15 3. Sistema según la reivindicación 1, en el que la lente caliente (8) es divergente y la imagen intermedia virtual está situada aguas arriba de la lente caliente (8), formando la combinación de la lente caliente (8) y de la lente fría (4) una arquitectura óptica del tipo retrofoco.
- 20 4. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la lente fría (4) tiene un diámetro inferior al tamaño del detector.
- 25 5. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la lente caliente (8) es un menisco.
- 30 6. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la lente fría (4) es un menisco.
- 35 7. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que la lente fría (4) tiene una forma en planoconvexa.
- 40 8. Sistema según la reivindicación 7, en el que la lente fría (4) planoconvexa tiene un espesor inferior a la décima parte de su diámetro.
- 45 9. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que la lente fría (4) es una lente de Fresnel.
- 50 10. Sistema según la reivindicación 9, en el que la lente de Fresnel tiene un orden de difracción superior a 5.
- 55 11. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que un filtro espectral (7) está colocado en el recinto de vacío (13).
- 60 12. Sistema según la reivindicación 11, en el que el filtro espectral (7) está colocado en la cámara oscura enfriada (3).
13. Sistema según la reivindicación 12, en el que el filtro espectral (7) está colocado sobre la lente fría (4).
14. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que una lámina (9) está colocada al nivel del diafragma frío (5), dependiendo la apertura de la lámina (9) de la banda espectral utilizada en el sistema de formación de imagen de gran campo (1).
15. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el detector (2) es un detector biespectral que es sensible a dos bandas espectrales diferentes.
16. Sistema según la reivindicación 1, en el que la ventanilla (14) también desempeña el papel de dicha lente caliente (8).
17. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la forma de la lente caliente (8) es tal que el valor absoluto de la diferencia entre los radios de curvatura ( $R_g$ ) y ( $R_d$ ) de los dos dioptrios de la lente caliente (8) es no nulo.

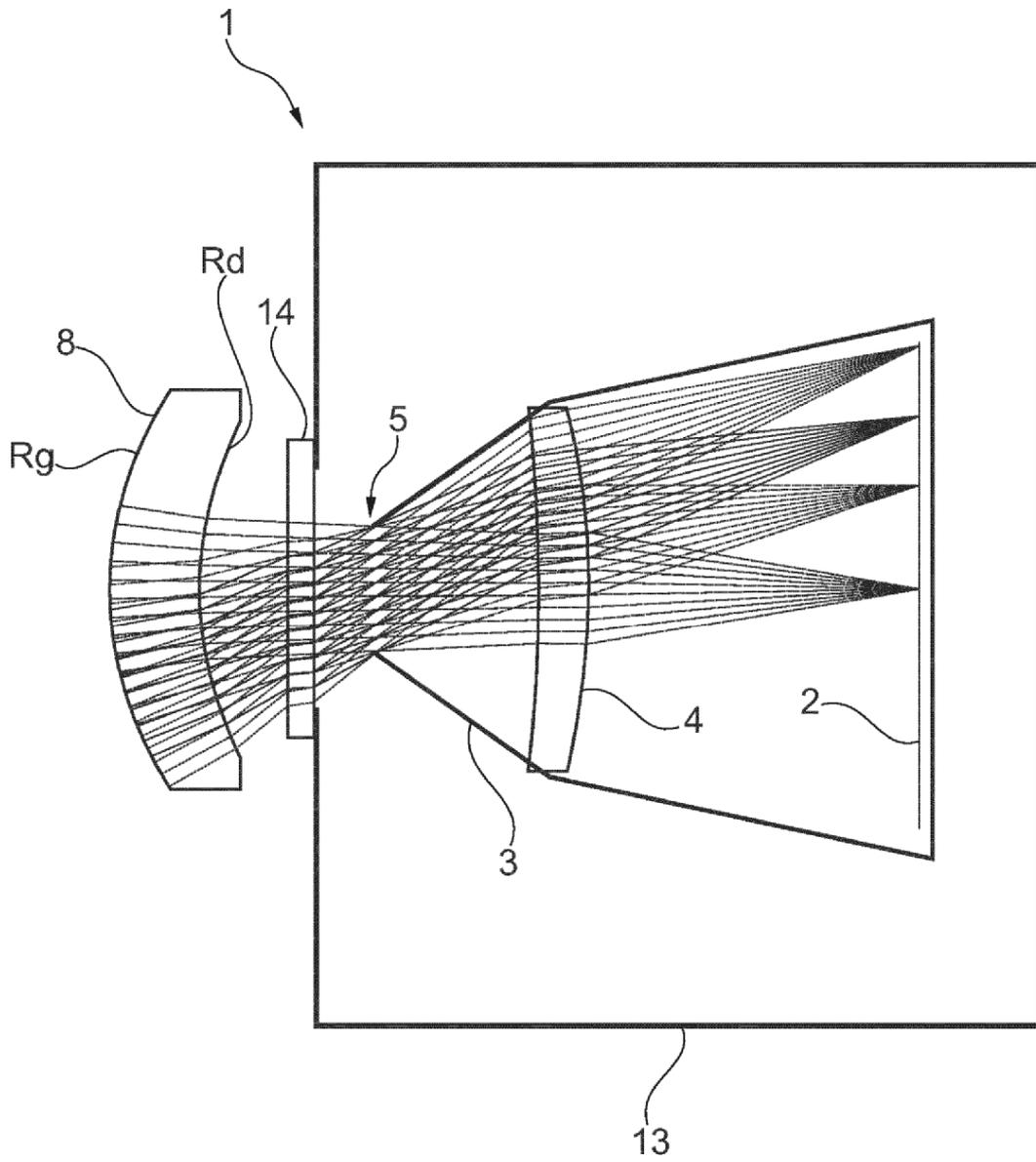


Fig. 1

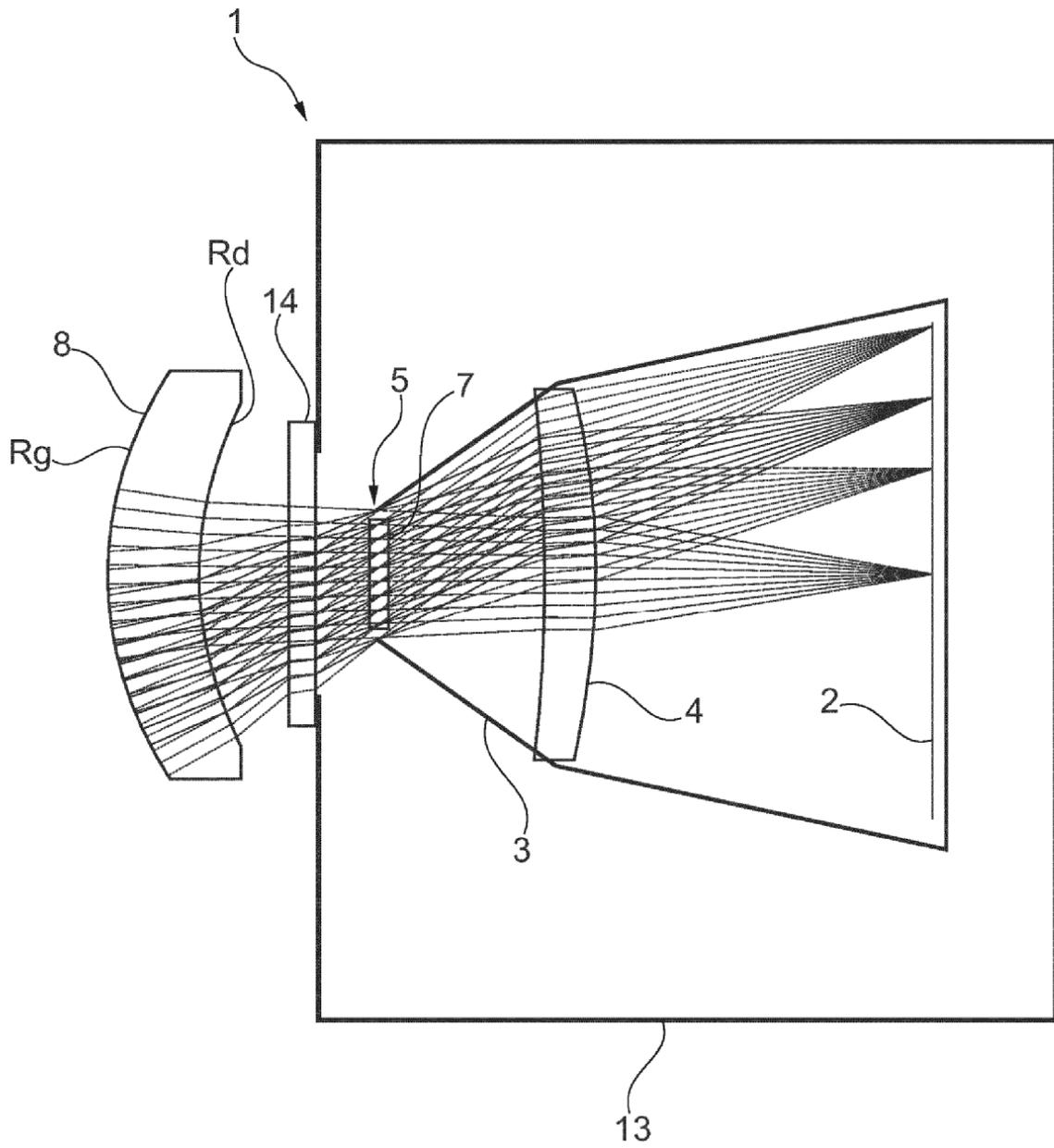


Fig. 2

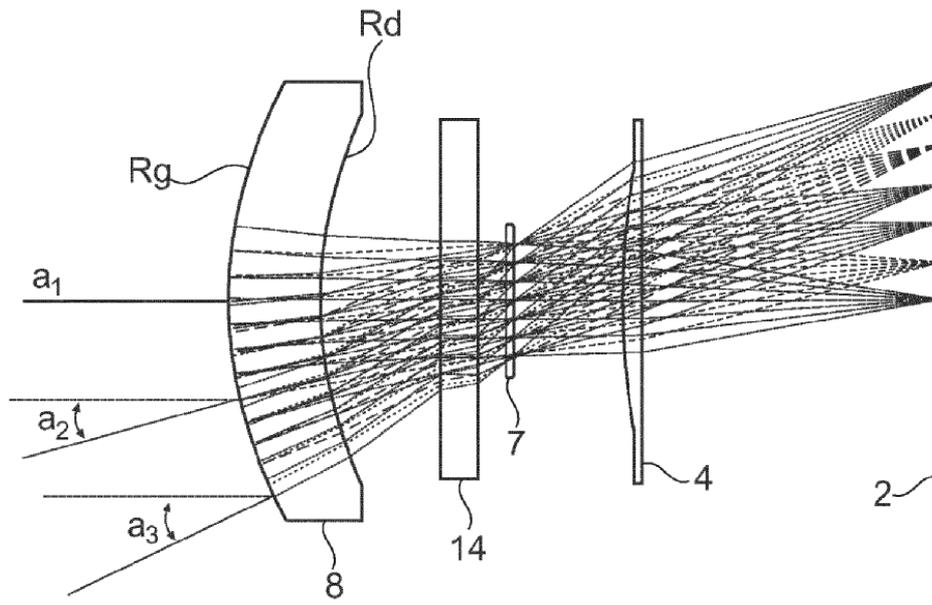


Fig. 3a

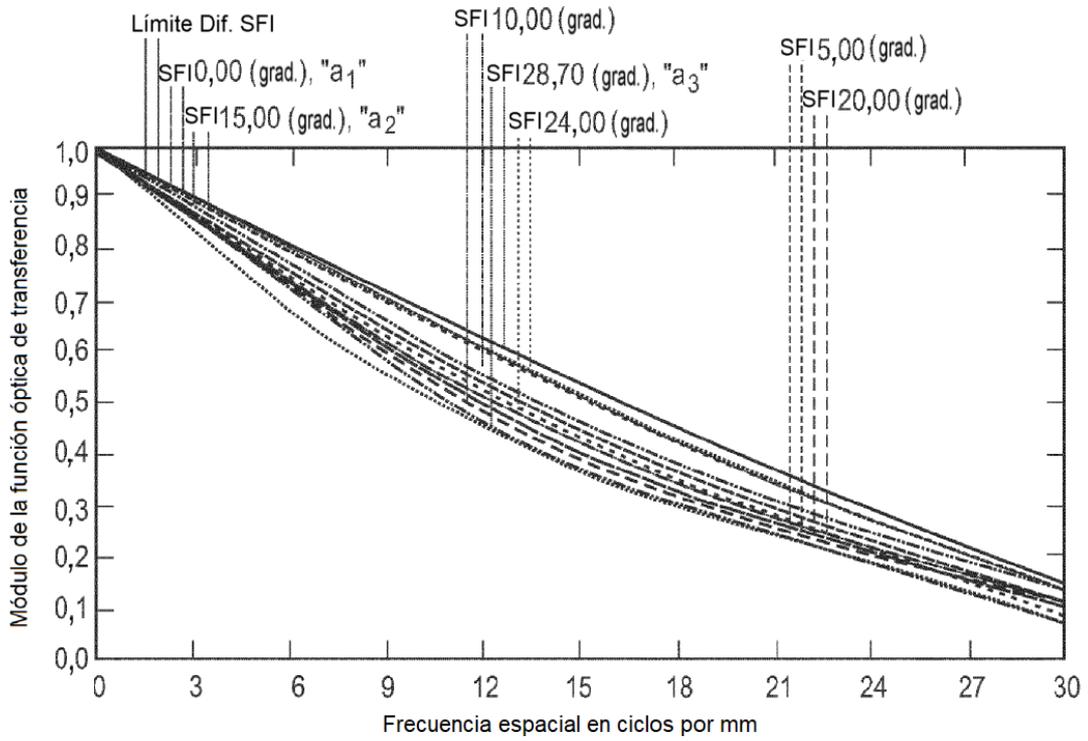


Fig. 3b

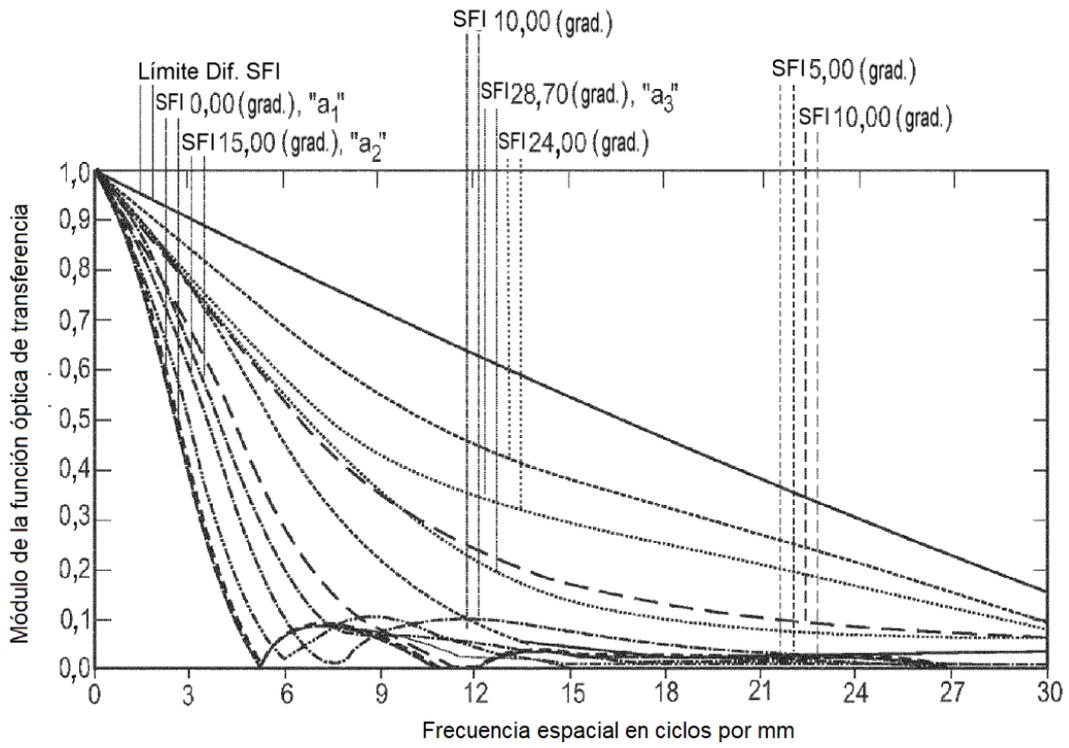


Fig. 4a

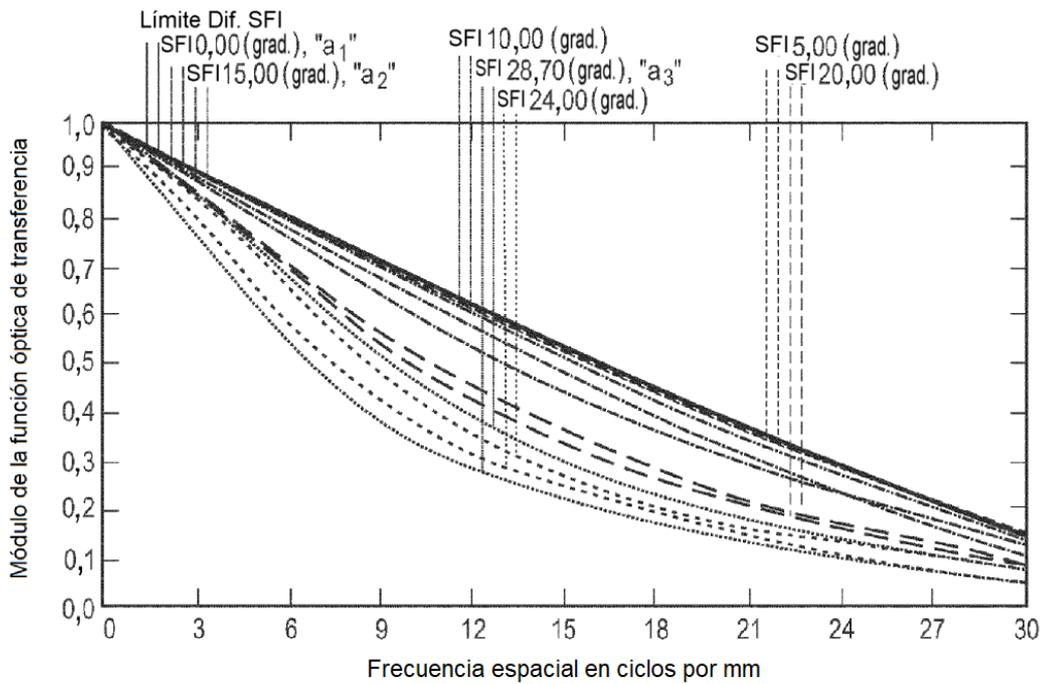


Fig. 4b

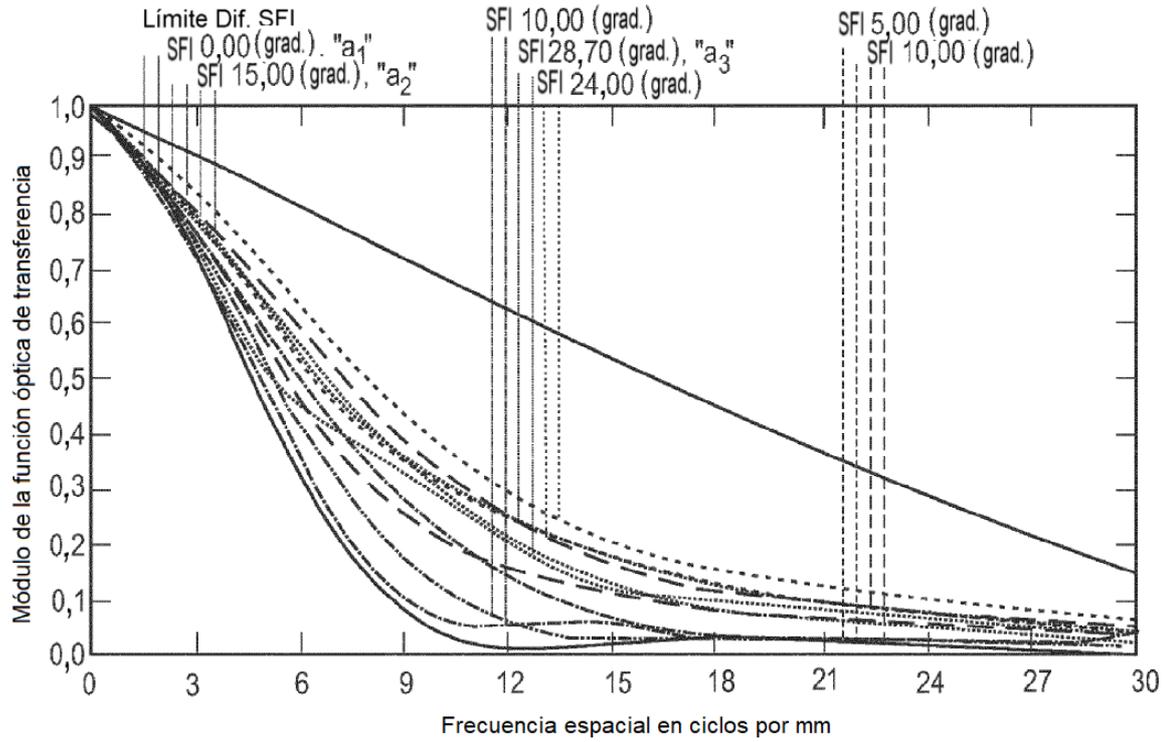


Fig. 5a

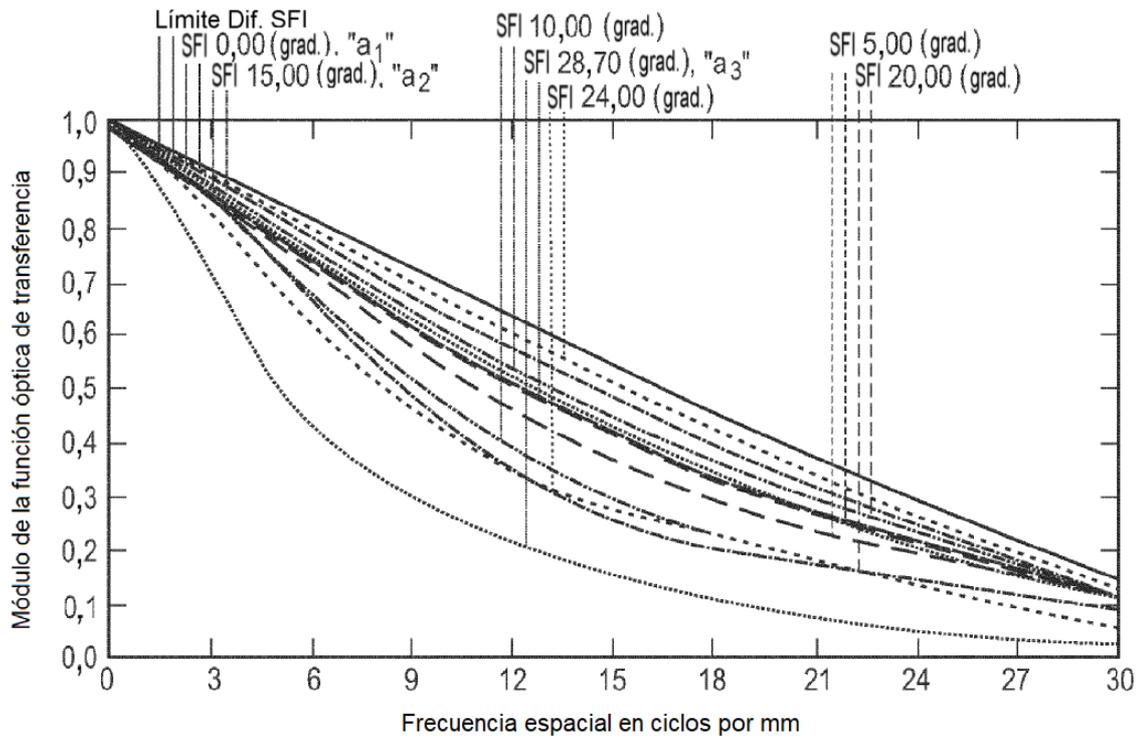


Fig. 5b