

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 822 583**

51 Int. Cl.:

**G01J 9/00**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.08.2013** **E 13182218 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.08.2020** **EP 2708862**

54 Título: **Analizador del frente de onda óptico**

30 Prioridad:

**14.09.2012 FR 1202452**

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

**04.05.2021**

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)**

**Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade Nord**

**92400 Courbevoie , FR**

72 Inventor/es:

**LIOTARD, ARNAUD;**

**BERNOT, MARC;**

**FALZON, FRÉDÉRIC y**

**PERRIN, GUILLAUME**

74 Agente/Representante:

**GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo**

ES 2 822 583 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

Analizador del frente de onda óptico

- 5 El campo general de la invención es el de los instrumentos ópticos que comprenden medios para analizar el frente de onda. Uno de los principales campos de aplicación es la realización de telescopios espaciales.

10 Un instrumento de óptica espacial o un telescopio espacial comprende un sistema óptico de enfoque que comprende generalmente varios espejos y un dispositivo de análisis de imágenes que comprende medios fotorreceptores y medios informáticos para procesar las imágenes recibidas. Los medios fotorreceptores pueden ser una matriz de fotorreceptores o una matriz que tiene una o más líneas de matrices de fotorreceptores. En este caso, el instrumento comprende medios opto-mecánicos que aseguran el barrido de la imagen.

15 Sea cual sea la configuración elegida, está claro que estamos intentando obtener las imágenes más precisas posibles. Sin embargo, los instrumentos ópticos solo pueden medir la intensidad de la luz y se pierde la información de fase de la imagen. Por ejemplo, en un sistema óptico de barrido, los datos adquiridos en la dirección  $x$  de las líneas de barra y denotados  $\{d(x)\}$  son mediciones ruidosas de la convolución del objeto observado, con  $o(x, \lambda)$  en una longitud de onda  $\lambda$ , con la respuesta percusional del sistema óptico o "PSF", acrónimo de "Point Spread Function", y denotado  $h(x, \lambda)$ , integrado en la banda espectral de intensidad  $f(\lambda)$  de la vía de adquisición.

20 Así tenemos la relación 1:

$$\text{Relación 1: } d(x) = N[h * o(x)] = N \left[ \int_{\lambda} (h(x, \lambda) * o(x, \lambda)) f(\lambda) d\lambda \right]$$

- 25 La calidad óptica del instrumento se caracteriza por un error de fase del frente de onda, también denominado en la terminología inglesa "WFE", acrónimo que significa "Error del frente de onda". Este WFE tiene en cuenta las aberraciones de los espejos del telescopio, pero también las diferentes desalineaciones de los espejos que constituyen el telescopio o el detector con respecto al telescopio. La información del WFE está "contenida" en la PSF óptica del sistema denotada  $h^{OPT}(x, \lambda)$ , siendo la PSF global igual a la convolución de esta última con otros componentes relacionados con la calidad del detector, con los movimientos,... Se tiene así la relación 2:

$$\text{Relación 2: } h^{OPT}(x, \lambda) = \left| TF^{-1} \left[ A(p) e^{i\varphi(p, \lambda)} \right] \left( \frac{x}{\lambda F} \right) \right|^2$$

- 35 donde  $A(p)$  y  $\varphi(p, \lambda)$  son respectivamente la amplitud y la fase del campo al nivel de la pupila del instrumento, donde  $F$  es la distancia focal del instrumento.

40 Una estimación del WFE es fundamental en la medida en que su conocimiento permite corregir todos o parte de los defectos del instrumento para encontrar una imagen lo más limpia posible del objeto. Requiere el establecimiento de un dispositivo dedicado. Este conocimiento es fundamental cuando el instrumento está activo, es decir, dispone de medios para corregir la forma o alineación de los espejos para mantener constantemente una imagen lo más nítida posible.

45 Existen diferentes soluciones de análisis del frente de onda para encontrar el WFE. Generalmente, los analizadores se clasifican en dos familias, que son los denominados analizadores de "plano pupilar" y los denominados analizadores de "plano focal".

50 Entre los analizadores del plano pupilar, se destacará principalmente el método Shack-Hartmann, que consiste en muestrear la pupila de entrada y obtener imágenes en un canal dedicado de todas las escenas observadas, con el fin de medir localmente el WFE. La desventaja de dicho enfoque es el uso de parte del flujo de entrada para un canal de análisis "anexo", así como la complejidad del dispositivo óptico que se va a instalar.

55 Los analizadores de plano focal no presentan dichos inconvenientes ya que consisten en utilizar adquisiciones realizadas en el plano focal del instrumento para estimar el frente de onda. Una forma de abordar este problema es, por ejemplo, adquirir dos imágenes de la misma escena  $o(x)$ , una desenfocada con respecto a la otra y utilizar un algoritmo de diversidad de fases. La diversidad de fase se puede utilizar para fines de restauración de imágenes, por lo que el objetivo es encontrar  $o(x)$ , o para el análisis del frente de onda, el objetivo es encontrar el WFE  $\varphi(p)$ , el WFE se parametriza generalmente como una combinación lineal de vectores de Zernike representativos del defecto de enfoque o aberraciones geométricas como el astigmatismo.

Por tanto, los análisis de diversidad de fase permiten determinar el WFE del telescopio a partir de adquisiciones de imágenes. Esta información de fase se puede utilizar en un sistema óptico activo para corregirla en bucle cerrado, o a posteriori para restaurar los datos adquiridos y así mejorar la calidad de la imagen.

5 Se han publicado numerosos artículos durante casi 30 años sobre el análisis del frente de onda por diversidad de fases y aplicaciones espaciales de este análisis. La gran mayoría ofrece varios enfoques algorítmicos para resolver este problema, otros describen su aplicación a misiones particulares cuando el objeto es conocido y puntual. A esto se le llama restitución de fase.

10 Mencionaremos en particular el artículo de Gonsalves titulado "Phase retrieval and diversity in adaptive optics", Optical Engineering, 21, 1982 que se considera el artículo fundacional sobre diversidad de fases.

También está el artículo de Paxman titulado "Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity", Journal of the Optical Society of America A, 9 (7), 1992 que hace referencia y que presenta el enfoque algorítmico más utilizado.

El artículo de Fienup titulado "Hubble space telescope characterized by using phase retrieval algorithms" Applied Optics, 32 (10): 1747-1767, 1993; el de Löfdahl titulado "Wavefront sensing and image restoration of focused and defocused solar images", Astronomy and Astrophysics, 107: 243-264, 1994 y finalmente el de Dean titulado "Phase retrieval algorithm for JWST flight testbed telescope, Space telescopes and Instrumentation", SPIE 6265, 2006 que presentan aplicaciones de la diversidad de fases a casos concretos como el estudio de las manchas solares, el montaje del telescopio Hubble o "HST" para el "Telescopio Espacial Hubble" o el del telescopio "JWST" que significa "Telescopio Espacial James Webb".

25 El artículo de Kendrick titulado "Closed-loop wavefront correction using phase diversity", SPIE 3356 Space Telescopes and Instruments, 1998 describe un enfoque de bucle cerrado, con algunos diseños arquitectónicos de sensores de diversidad de fase.

Finalmente, el artículo de Luke titulado "Optical wavefront reconstruction: theory and numerical methods", SIAM review 44 (2): 169-224, 2002 presenta un estado de la técnica de los diferentes enfoques algorítmicos.

También se han presentado patentes sobre el análisis del frente de onda, ya sea sobre el algoritmo de diversidad de fase o sobre los medios para crear simplemente el desenfoque necesario para este algoritmo de diversidad de fase.

35 Por ejemplo, la patente US 4.309.602 titulada "Detección del frente de onda por recuperación de fase", que describe el enfoque algorítmico y el marco para el uso de un análisis de bucle de sensor del frente de onda óptico adaptativo.

También mencionaremos la patente US 5.598.261 titulada "Sensor del frente de onda para un generador de imágenes de barrido" que presenta un concepto en "TDI" para "Integración de retardo de tiempo" que comprende dos detectores en paralelo, estando el segundo desenfocado con respecto al primero por la aportación de un sustrato transparente. Estas pueden ser desfocalizaciones agregadas sobre todo o una parte de la longitud del detector o en las áreas entre barras.

45 También mencionaremos la patente US 5.610.707 titulada "Sensor del frente de onda para un captador de imágenes fijo" que presenta un concepto similar al anterior pero adaptado a un sensor matricial con uso de un divisor de haz para obtener las imágenes enfocadas y desenfocadas.

Citaremos la solicitud US 2004 / 0099787A1 titulada "Sistema y método para determinar aberraciones ópticas en sistemas de imágenes de barrido por diversidad de fase", que presenta un concepto en TDI que comprende dos filas paralelas de detectores, una de las cuales, potencialmente compuesta por varios elementos, se desplaza a lo largo del eje óptico con respecto a la otra para desenfocar la imagen.

Las patentes US 2004/0056174 titulada "Corrección del frente de onda de diversidad de fase rápida utilizando una red neuronal" y FR 2919052 titulada "Método para estimar al menos una deformación del frente de onda de un sistema óptico o de un objeto observado por el sistema óptico y dispositivo asociado" muestran una adaptación de la parte algorítmica a las necesidades de cálculo rápido.

Finalmente, la patente US 7.274.442 titulada "Sensor del frente de onda de bucle cerrado que utiliza una matriz de puerta programable" presenta un enfoque de procesamiento algorítmico arquitectónico a bordo, que combina el uso de sensores de diversidad de fase y FPGA. Los documentos CN102564612 A y CN102636271 A también describen instrumentos ópticos que comprenden medios para analizar el frente de onda.

El objeto del dispositivo según la invención, que se describe en la reivindicación 1, es proporcionar adaptaciones opto-mecánicas de un sistema óptico, en particular un telescopio, que permitan crear simplemente el desenfoque necesario para un algoritmo de diversidad de fases.

Más concretamente, el objeto de la invención es un instrumento óptico que comprende al menos:

una arquitectura óptica que comprende un conjunto óptico para convertir un objeto luminoso en una imagen, un conjunto de fotorreceptores y medios para adquirir y analizar dicha imagen, dichos medios de adquisición y análisis que comprenden un algoritmo de tipo de diversidad de fase,

**caracterizado por que** la arquitectura óptica comprende una placa óptica de potencia óptica baja o nula dispuesta en las proximidades del conjunto fotorreceptor y dispuesta para formar sobre todo o parte de dicho conjunto una primera imagen enfocada y una segunda imagen desenfocada de un primer valor predeterminado y desplazada por un segundo valor predeterminado con respecto a la primera imagen.

Ventajosamente, con el instrumento que tiene un eje óptico, la placa óptica es una placa de caras planas, paralelas entre sí y perpendiculares al eje óptico, la primera imagen que se obtiene por transmisión simple a través de dicha placa óptica, y la segunda imagen que se obtiene por transmisión después de una doble reflexión sobre las dos caras de la placa, con la placa óptica que se ubica preferentemente en el borde del conjunto fotorreceptor.

Ventajosamente, con el instrumento que tiene un eje óptico, la placa óptica es una placa de caras planas y paralelas inclinadas sobre el eje óptico, la primera imagen que se obtiene por transmisión simple a través de dicha placa óptica, y la segunda imagen que se obtiene por transmisión después de una doble reflexión sobre las dos caras de la placa

Ventajosamente, la placa óptica es un prisma de cara plana, la primera imagen que se obtiene por transmisión simple a través de dicho prisma, y la segunda imagen que se obtiene por transmisión después de una doble reflexión sobre las dos caras de dicho prisma.

Ventajosamente, la placa óptica es una placa de aire cuyas caras son por un lado la cara de entrada del conjunto fotorreceptor y por otro lado una de las caras de una ventana de protección dispuesta delante de dicho conjunto fotorreceptor, la primera imagen que se obtiene por transmisión simple a través de dicha ventana de protección, y la segunda imagen que se obtiene por transmisión después de una doble reflexión en la cara de entrada del conjunto fotorreceptor y sobre la cara de la ventana de protección.

Ventajosamente, la placa óptica es un espejo Mangin, es decir una placa óptica que tiene una primera cara semirreflectante y una segunda cara reflectante, la primera imagen que se obtiene por reflexión sobre la primera cara semirreflectante, y la segunda imagen que se obtiene por reflexión sobre la segunda cara reflectante.

De manera ventajosa, la placa óptica comprende uno o dos tratamientos reflectantes de modo que la amplitud de la primera imagen enfocada sea del mismo orden de magnitud que la amplitud de la segunda imagen desenfocada.

Ventajosamente, el instrumento óptico es un telescopio espacial.

La invención se comprenderá mejor y otras ventajas resultarán evidentes al leer la descripción que sigue a modo de ejemplo no limitante y en virtud de las figuras adjuntas entre las que se encuentran:

la Figura 1 representa una primera realización de la placa óptica según la invención;

la Figura 2 representa una variante de esta primera realización de la placa óptica según la invención;

la Figura 3 representa una segunda realización de la placa óptica según la invención;

la Figura 4 representa las respectivas intensidades de la primera imagen y la segunda imagen obtenida al pasar a través de la placa óptica de la primera y segunda realizaciones;

la Figura 5 representa una tercera realización de la placa óptica según la invención;

la Figura 6 representa las respectivas intensidades de la primera imagen y la segunda imagen obtenida al pasar a través de la placa óptica de la tercera realización.

El objetivo de la invención es introducir, en la arquitectura óptica de un sistema óptico, una placa óptica que permita crear simplemente el desenfoque necesario para un algoritmo de diversidad de fases. La invención es particularmente aplicable al campo de los telescopios y más específicamente al campo de los telescopios espaciales.

Existen diferentes disposiciones posibles para obtener el resultado deseado.

A modo de ejemplos no limitantes, las Figuras 1 a 6 proponen cuatro realizaciones diferentes. En cada una de estas realizaciones diferentes, la placa óptica cubre todo el campo del sensor. Por supuesto, dependiendo de la aplicación, puede cubrir solo una parte dedicada al análisis de imágenes.

En estas figuras, la arquitectura óptica se reduce a una lente de enfoque 1. En el caso general, esta arquitectura es sustancialmente más compleja y generalmente comprende varios espejos. Del mismo modo, en estas figuras, la placa óptica 2 es el último elemento óptico situado justo antes del conjunto fotorreceptor 3. Es posible contemplar otras configuraciones. En las distintas figuras, los elementos 1, 2 y 3 están representados con líneas gruesas y los

rayos de luz con líneas finas. El eje óptico X-X de la lente 1 se muestra con líneas discontinuas. En estas diferentes figuras, no se muestra el objeto luminoso inicial cuya lente de enfoque 1 da una imagen. En el caso general, el objeto se encuentra a gran distancia y consideramos que ópticamente está en el "infinito".

- 5 En una primera configuración representada en la Figura 1, la placa óptica 2 es una placa de placa plana paralela inclinada sobre el eje óptico X-X. Esta placa da dos imágenes 10 y 20 en el sensor 3. La primera imagen 10 se obtiene por transmisión a través de la placa óptica 2, y la segunda imagen se obtiene después de una doble reflexión sobre las dos caras 4 y 5 de la placa óptica. Esta segunda imagen 20 está desplazada y desenfocada con respecto a la primera imagen 10. En la Figura 1, la imagen 10 está enfocada y la imagen 20 está desenfocada. Por supuesto, podemos adoptar la configuración inversa, es decir, enfocar la imagen 20 y desenfocar la imagen 10. Basta con mover el plano de recepción del fotorreceptor.

- 15 Los valores de desplazamiento y desenfoque dependen del espesor de la placa, su índice óptico, su inclinación y la geometría de los haces de luz y se pueden calcular fácilmente. Por lo tanto, en el borde del campo, los haces de luz se pueden inclinar lo suficiente para que la placa óptica pueda ser perpendicular al eje óptico X-X como se ve en la Figura 2. Esta placa introduce aberraciones geométricas y en particular astigmatismo que se pueden compensar, ya sea teniéndolo en cuenta en el cálculo de la arquitectura óptica, o dando una forma particular a la placa óptica.

- 20 En una segunda configuración representada en la Figura 3, la placa óptica 2 es un prisma de cara plana sustancialmente perpendicular al eje óptico X-X. Esta placa también da dos imágenes 10 y 20 en el sensor 3. La primera imagen 10 se obtiene por transmisión a través de la placa óptica 2, y la segunda imagen se obtiene después de una doble reflexión sobre las dos caras 4 y 5 de la placa óptica. Esta segunda imagen 20 está desplazada y desenfocada con respecto a la primera imagen 10. Los valores del desplazamiento y el desenfoque dependen del espesor de la placa, su índice óptico, el ángulo del prisma y la geometría de los haces luminosos. Esta placa introduce aberraciones cromáticas que se pueden compensar ya sea teniéndolos en cuenta en el cálculo de la arquitectura óptica, o bien utilizando un prisma compuesto por dos placas prismáticas dispuestas boca abajo y corregidas de cromatismo.

- 30 En una variante de las dos configuraciones anteriores, se puede utilizar una placa de aire cuyas caras son por un lado la cara de entrada del conjunto fotorreceptor y, por otro, una de las caras de una ventana protectora dispuesta delante de dicho conjunto fotorreceptor, la primera imagen que se obtiene por transmisión única a través de dicha ventana de protección, y la segunda imagen que se obtiene por transmisión después de una doble reflexión sobre la cara de entrada del conjunto fotorreceptor y sobre la cara de la protección de la ventana.

- 35 Ambas imágenes deben tener intensidades similares. Como vemos en el Figura 4, si  $I$  es la intensidad de la imagen sin la placa óptica y si asumimos que las caras de la placa óptica tienen los mismos coeficientes de transmisión  $T$  y reflexión  $R$ , se demuestra fácilmente que la primera imagen tiene una intensidad  $IT^2$  y la segunda imagen tiene una intensidad  $IT^2R^2$ . Sobre las Figuras 4 y 6 solo se representa la trayectoria de un rayo de luz.

- 40 En una variante mostrada en las Figuras 5 y 6 también es posible utilizar la placa óptica 2 según la invención en reflexión. En este caso, la placa óptica 2 es un espejo Mangin, es decir una placa óptica que tiene una primera cara semirreflectante 6 y una segunda cara reflectante 7, la primera imagen que se obtiene 10 por reflexión sobre la primera cara semirreflectante 6, y la segunda imagen que se obtiene 20 por reflexión sobre la segunda cara reflectante 7.

- 45 Ambas imágenes deben tener intensidades similares. Como vemos en la Figura 6 si  $I$  es la intensidad de la imagen sin la placa óptica, si la primera cara 6 de la placa óptica tiene  $T$  como coeficiente de transmisión y  $R$  como coeficiente de reflexión y si la segunda cara 7 es perfectamente reflectante, es fácil demostrar que la primera la imagen tiene una intensidad  $IR$  y la segunda imagen tiene una intensidad  $IT^2$ . Entonces es fácil igualar las intensidades de las dos imágenes.

## REIVINDICACIONES

1. Instrumento óptico que comprende al menos:

- 5 una arquitectura óptica que comprende un conjunto óptico (1) para convertir un objeto luminoso en una imagen, y un conjunto fotorreceptor (3) y medios para adquirir y analizar dicha imagen, comprendiendo dichos medios de adquisición y análisis un algoritmo de tipo de diversidad de fase,
- 10 **caracterizado por que** la arquitectura óptica comprende una placa óptica (2) de potencia óptica baja o nula dispuesta en las proximidades del conjunto fotorreceptor y dispuesta para formar sobre todo o parte de dicho conjunto una primera imagen enfocada y una segunda imagen desenfocada en un primer valor determinado y desplazada en un segundo valor predeterminado con respecto a la primera imagen.
2. Instrumento óptico según la reivindicación 1, **caracterizado por que** el instrumento tiene un eje óptico (X-X), la placa óptica (2) es una placa de caras planas (4, 5) paralelas entre sí y perpendiculares al eje óptico, la primera imagen se obtiene por transmisión simple a través de dicha placa óptica y la segunda imagen se obtiene por transmisión después de doble reflexión sobre las dos caras de la placa.
- 15 3. Instrumento óptico según la reivindicación 2, **caracterizado por que** la placa óptica (2) está situada en el borde del conjunto fotorreceptor (3).
- 20 4. Instrumento óptico según la reivindicación 1, **caracterizado por que**, el instrumento tiene un eje óptico (X-X), la placa óptica (2) es una placa de caras (4, 5) planas y paralelas inclinadas sobre el eje óptico, la primera imagen se obtiene por transmisión simple a través de dicha placa óptica y la segunda imagen se obtiene por transmisión después de una doble reflexión sobre las dos caras de la placa.
- 25 5. Instrumento óptico según la reivindicación 1, **caracterizado por que** la placa óptica (2) es un prisma de caras planas (4, 5), la primera imagen se obtiene por transmisión simple a través de dicho prisma, y la segunda imagen se obtiene por transmisión después de doble reflexión sobre las dos caras de dicho prisma.
- 30 6. Instrumento óptico según la reivindicación 1, **caracterizado por que** la placa óptica (2) es una placa de aire cuyas caras son por un lado la cara de entrada del conjunto fotorreceptor y por otro lado las caras de una ventana de protección dispuesta delante de dicho conjunto fotorreceptor, la primera imagen se obtiene por transmisión simple a través de dicha ventana de protección y la segunda imagen se obtiene por transmisión después de una doble reflexión sobre la cara de entrada del conjunto fotorreceptor y sobre la cara de la ventana de protección.
- 35 7. Instrumento óptico según la reivindicación 1, **caracterizado por que** la placa óptica (2) es un espejo Mangin, es decir una placa óptica que tiene una primera cara semirreflectante (6) y una segunda cara reflectante (7), la primera imagen se obtiene por reflexión sobre la primera cara semirreflectante y la segunda imagen se obtiene por reflexión sobre la segunda cara reflectante.
- 40 8. Instrumento óptico según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** la placa óptica (2) comprende uno o dos tratamientos reflectantes de manera que la amplitud de la primera imagen enfocada sea del mismo orden de magnitud que la amplitud de la segunda imagen desenfocada.
- 45 9. Instrumento óptico según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** el instrumento óptico es un telescopio espacial.

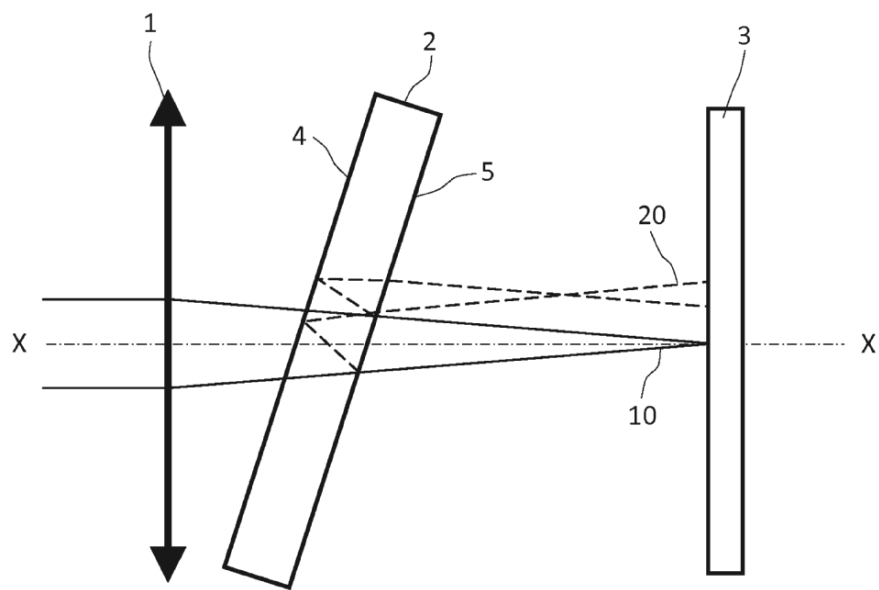


FIG. 1

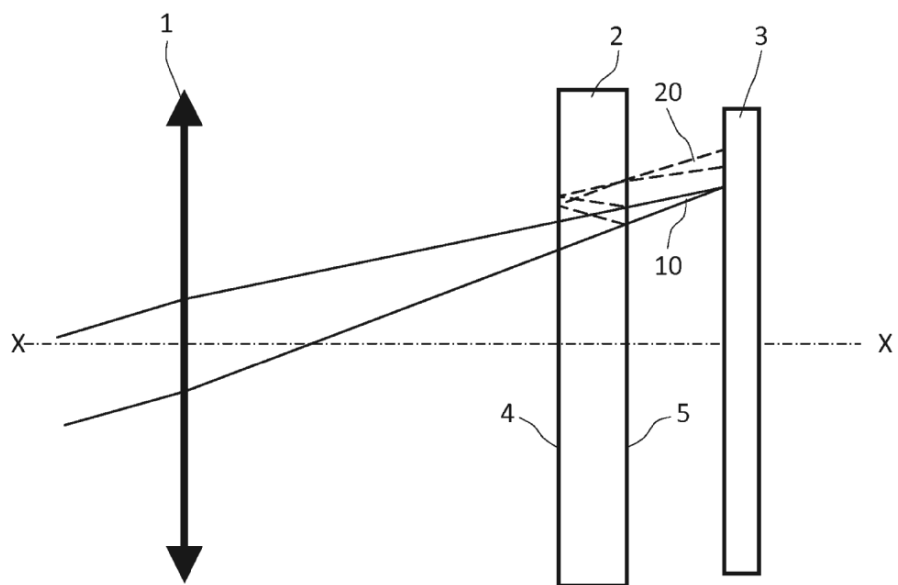


FIG. 2

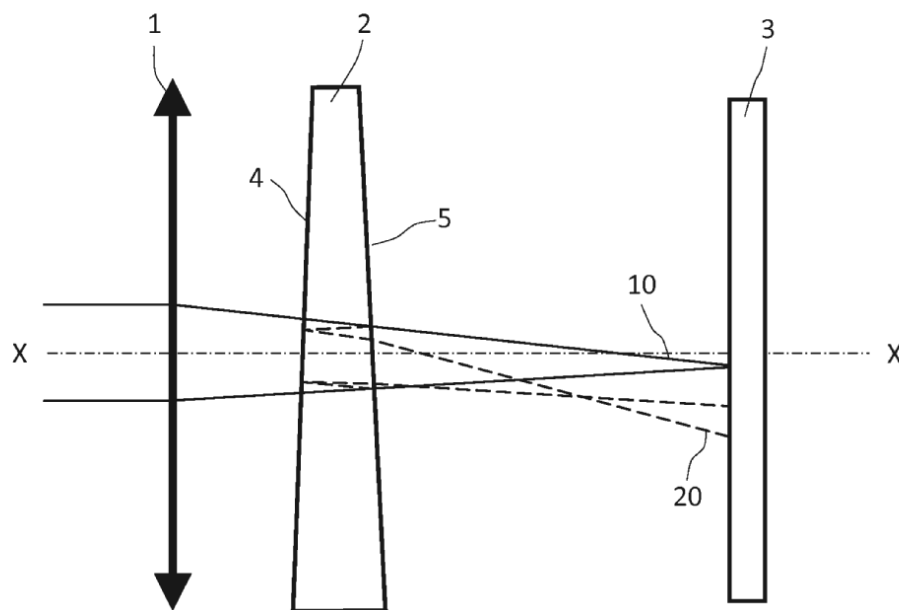


FIG. 3

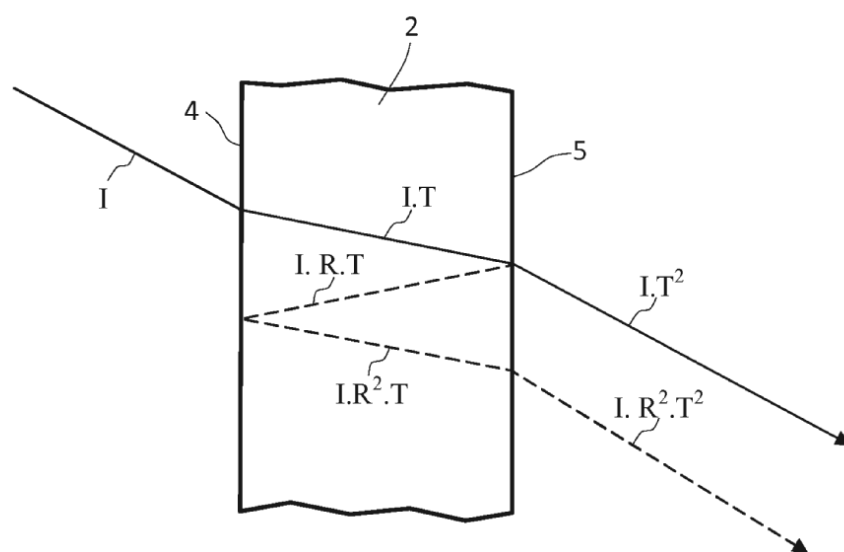


FIG. 4



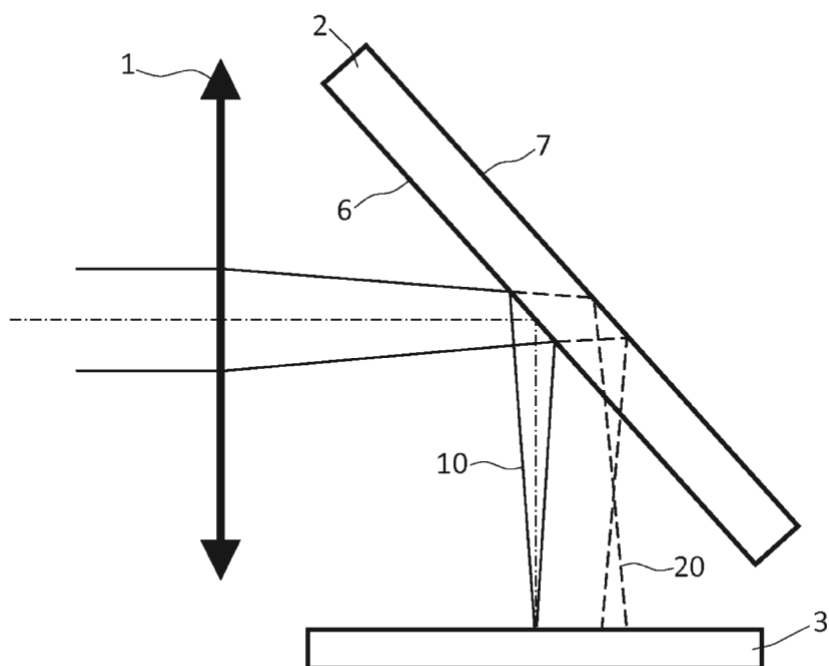


FIG. 5

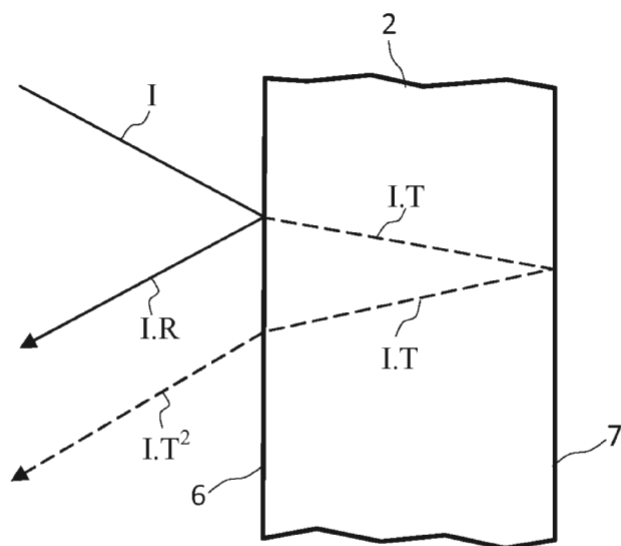


FIG. 6