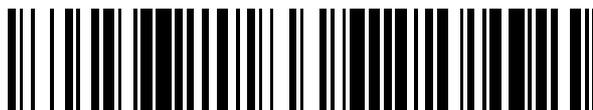


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 666 735**

51 Int. Cl.:

B64G 1/36 (2006.01)

G01S 3/786 (2006.01)

G01C 21/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.05.2014 PCT/US2014/038392**

87 Fecha y número de publicación internacional: **31.12.2014 WO14209510**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.05.2014 E 14817171 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.03.2018 EP 3013691**

54 Título: **Rastreador de estrellas a escala de chip**

30 Prioridad:

28.06.2013 US 201313930032

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

07.05.2018

73 Titular/es:

**THE CHARLES STARK DRAPER LABORATORY,
INC. (100.0%)
555 Technology Square
Cambridge, MA 02139, US**

72 Inventor/es:

**LAINÉ, JUHA-PEKKA;
BLASCHE, GREGORY, P.;
CHAPARALA, MURALI, V.;
DAWSON, ROBIN;
LANE, BENJAMIN;
SMITH, STEPHEN, P. y
WALDRON, ERIK**

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 666 735 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

Rastreador de estrellas a escala de chip

5 **Antecedentes**

Los rastreadores de estrellas tradicionales son instrumentos de imágenes de alto rendimiento que contienen los elementos ópticos y de procesamiento que se encuentran típicamente en los sistemas de cámara, tales como un plano focal de sensor de imágenes y un telescopio. Para imágenes de campo lejano, la ecuación de difracción establece una relación directa entre la resolución angular máxima de objeto (y, de este modo, el rendimiento de la imagen) y el diámetro de la apertura óptica. En consecuencia, el telescopio de un rastreador de estrellas debe tener generalmente un diámetro de apertura bastante grande para recoger una cantidad suficiente de luz estelar para conseguir un rendimiento razonable de imagen. Como resultado, la distancia focal (y la longitud física) del telescopio también debe ser considerable. De este modo, los rastreadores tradicionales de estrellas suelen ser de gran tamaño y voluminosos.

El documento US 2010/0309459 A1 divulga un sensor de ángulo, sistema y método que emplean una resonancia en modo guiado. El sensor de ángulo incluye una rejilla de resonancia en modo guiado (GMR) y un procesador de resonancia. El procesador de resonancia determina un ángulo de incidencia de una señal incidente en la rejilla GMR. El procesador de resonancia usa una respuesta de resonancia en modo guiado de la rejilla GMR a la señal para determinar el ángulo de incidencia. El sistema de detección de ángulo incluye la rejilla GMR, el procesador de resonancia e incluye, adicionalmente, una fuente óptica que produce la señal. El método incluye proporcionar una rejilla GMR, detectar una resonancia en modo guiado producida en la rejilla GMR cuando se somete a una señal incidente y determinar un ángulo de incidencia de la señal incidente de uno o ambos entre un número y una distancia espectral entre resonancias en modo guiado presentes en una respuesta de la rejilla GMR a la señal incidente.

El documento US 5.784.156 describe un sistema y un método para determinar la dirección a una fuente radiante, para su uso por un sistema de guía de vehículo, en el que se utilizan fibras ópticas tanto para recoger como para transmitir señales ópticas, en los que el vehículo está destinado preferentemente a casa como objetivo. Las fibras ópticas descritas en el presente documento no requieren una óptica de recogida separada, sino que, en cambio, recogen directamente la radiación incidente que llega a un extremo de la fibra óptica para su transmisión a un detector de fotodiodo acoplado al extremo distal. Preferiblemente, la radiación es radiación láser que radia desde un objetivo en relación al cual se guía el vehículo, y, preferiblemente, el vehículo es un misil guiado. La eliminación de la óptica de recogida reduce la complejidad y el coste del aparato y proporciona un aumento y una selección inesperados de la precisión de la determinación direccional por el sistema. El sistema incluye una matriz de aperturas dispuestas en lugares no uniformes seleccionados en el vehículo. Cada apertura contiene un conjunto de fibras, incluyendo fibras de de inicio y detención. Las fibras reciben radiación entrante, transmiten la radiación como señales ópticas para iniciar y detener los detectores. Los detectores miden la fuerza de la señal y una propiedad relacionada con la longitud de las fibras de inicio y detención a cuyo través se han transmitido las señales ópticas, y proporcionan una salida indicativa de la fuerza de la señal y la propiedad para un microprocesador. El microprocesador está programado para calcular la dirección de la fuente de radiación con relación al vehículo, y para proporcionar esta información a un sistema de control y guía de vehículo.

45 **Sumario de la invención**

De acuerdo con un aspecto, la presente solicitud proporciona un rastreador de estrellas como se define en la reivindicación 1. De acuerdo con otro aspecto, se proporciona un método de formación de imágenes de un campo de estrellas como se define en la reivindicación 10.

Los aspectos y las realizaciones están dirigidos a un rastreador de estrellas miniaturizado (también denominado cámara de estrellas) en el que las ópticas tradicionales se reemplazan por estructuras basadas en obleas, proporcionando un sistema que tiene una gran apertura de recogida de luz en un substrato de oblea delgada. Esta combinación puede permitir el montaje conforme en una nave espacial u otro vehículo. De acuerdo con ciertas realizaciones, y como se analiza con más detalle a continuación, el "rastreador de estrellas a escala de chip" captura la luz estelar de onda plana en espacio libre con una apertura de filtro de banda ancha sensible a ángulo de oblea delgada y dirige la luz a una estructura de guía de luz para lectura. En algunos ejemplos, el rastreador de estrellas a escala de chip tiene menos de 1 milímetro de grosor, proporcionando de este modo una verdadera solución de proceso de obleas para una tarea óptica de formación de imágenes.

De acuerdo con un ejemplo, un rastreador de estrellas comprende una guía de luz, un sistema de acoplamiento dispuesto sobre una superficie de la guía de luz y configurado para acoplar luz estelar en la guía de luz de modo tal que se determine al menos parcialmente un modo de propagación de la luz estelar en la guía de luz mediante un ángulo de incidencia de la luz estelar en el sistema de acoplamiento, y un sistema de detector acoplado a la guía de luz y configurado para analizar la luz estelar propagada en la guía de luz para determinar al menos uno de entre un ángulo de acimut y un ángulo de altura de una estrella que es la fuente de la luz estelar.

En un ejemplo del rastreador de estrellas, la guía de luz es una guía de ondas con múltiples modos que comprende al menos una capa dieléctrica de un sustrato de oblea. El sustrato de oblea puede ser una oblea de silicio, por ejemplo. Un índice de refracción de la al menos una capa dieléctrica puede estar ahusado para impedir la propagación en la guía de luz de la luz incidente en el sistema de acoplamiento a partir de un rango predeterminado de ángulos respecto a la normal a la superficie de la guía de luz. En un ejemplo, el sistema de acoplamiento comprende un acoplador de rejilla de banda ancha modelado en la superficie de la guía de luz. En otro ejemplo, el sustrato de oblea incluye una pluralidad de aperturas ópticas de salida conectadas a la guía de luz, y el rastreador de estrellas comprende adicionalmente un interferómetro acoplado selectivamente a un par de entre la pluralidad de aperturas ópticas de salida y configurado para determinar una diferencia de fase entre la luz estelar propagada mediante la guía de luz a cada uno de los pares de entre la pluralidad de aperturas ópticas de salida. El rastreador de estrellas puede comprender adicionalmente un conmutador óptico acoplado a la pluralidad de aperturas ópticas de salida y configurado para acoplar selectivamente el par de entre la pluralidad de aperturas ópticas de salida al interferómetro. El rastreador de estrellas puede comprender adicionalmente un procesador acoplado al interferómetro y configurado para reconstruir una imagen a partir de la información de fase determinada por el interferómetro. En un ejemplo, la pluralidad de aperturas ópticas de salida está dispuesta a lo largo de dos ejes que se intersecan entre sí en un ángulo de aproximadamente 90 grados.

De acuerdo con otro ejemplo, un método para formar imágenes de un campo estrella comprende acoplar luz estelar a partir de al menos una estrella a una guía planaria de luz, propagando la luz estelar a través de la guía de luz a un sistema de detector, en el que un modo de propagación de la luz estelar en la guía de luz se basa al menos en parte en un ángulo de incidencia de la luz estelar sobre la superficie de la guía de luz, y determinar al menos uno de entre un ángulo de acimut y un ángulo de altura de al menos una estrella en base a las características detectadas de la luz estelar.

En un ejemplo del método de acoplamiento de la luz estelar en la guía de luz se incluye el acoplamiento de la luz estelar en la guía de luz usando un acoplador de rejilla modelado en la superficie de la guía de luz. En otro ejemplo, la propagación de la luz estelar incluye la propagación de la luz estelar mediante la guía de luz hasta un par de aperturas ópticas. En este ejemplo, el método puede comprender adicionalmente medir interferométricamente la diferencia de fase de luz estelar en cada una de las dos aperturas ópticas.

De acuerdo con otro ejemplo, un rastreador de estrellas comprende un sustrato de oblea que incluye al menos una capa dieléctrica, una estructura de acoplamiento modelada sobre la superficie del sustrato de oblea y configurada para acoplar luz estelar en la al menos una capa dieléctrica del sustrato de oblea, al menos una guía de onda de lectura configurada para propagar la luz estelar acoplada en al menos una capa dieléctrica mediante la estructura de acoplamiento, en el que un modo de propagación de la luz estelar en la guía de onda está determinado al menos parcialmente por un ángulo de incidencia de la luz estelar en la estructura de acoplamiento, y un sistema de detector acoplado a la al menos una guía de onda de lectura y configurado para analizar la luz estelar propagada en la guía de onda con múltiples modos para determinar al menos uno de entre un ángulo acimutal y un ángulo de altura de una estrella que es una fuente de luz estelar.

En un ejemplo, la estructura de acoplamiento es circularmente simétrica sobre la superficie del sustrato de oblea. En otro ejemplo, la al menos una guía de ondas de lectura incluye una pluralidad de guías de ondas de lectura posicionadas alrededor de la estructura de acoplamiento a lo largo de un perímetro del sustrato de oblea. El sustrato de oblea puede ser una oblea de silicio, por ejemplo. La estructura de acoplamiento puede incluir un acoplador de rejilla de guía de ondas de banda ancha, por ejemplo. En un ejemplo, el rastreador de estrellas comprende adicionalmente una pluralidad de aperturas ópticas situadas sobre el sustrato de oblea y acopladas a la al menos una guía de ondas de lectura, un interferómetro acoplado al sistema de detector y un conmutador óptico acoplado a la pluralidad de aperturas ópticas y configurado para acoplar selectivamente un par de entre la pluralidad de aperturas ópticas al interferómetro. El rastreador de estrellas puede comprender adicionalmente una pluralidad correspondiente de elementos ópticos de control de longitud de trayectoria, cada uno asociado con la apertura óptica respectiva.

Aún otros aspectos, realizaciones y ventajas de estos aspectos y realizaciones ejemplares se discuten en detalle a continuación. Las realizaciones descritas en este documento se pueden combinar con otras realizaciones de cualquier manera consistentes con al menos uno de los principios descritos en este documento, y las referencias a "una realización", "algunas realizaciones", "una realización alternativa", "diversas realizaciones", "la realización". "o similar no son necesariamente mutuamente excluyentes y están destinadas a indicar que un rasgo, estructura o característica particular descrito se puede incluir en al menos una realización. Las apariciones de tales términos en el presente documento no se refieren necesariamente a la misma realización.

Breve descripción de los dibujos

Diversos aspectos de al menos una realización se discuten a continuación con referencia a las figuras que se acompañan, que no están destinadas a ser dibujadas a escala. Las figuras se incluyen para proporcionar una ilustración y una comprensión adicional de los diversos aspectos y realizaciones, e incorporan y constituyen una

parte de esta memoria descriptiva, pero no pretenden ser una definición de los límites de la invención. En las figuras, cada componente idéntico o casi idéntico que se ilustra en diversas figuras está representado por un número similar. A efectos de claridad, no todos los componentes pueden etiquetarse en cada figura. En las figuras:

- 5 la figura 1 es un diagrama esquemático de un ejemplo de un rastreador de estrellas a escala de chip de acuerdo con aspectos de la invención;
- la figura 2A es un diagrama esquemático que muestra una vista en perspectiva del acoplamiento de rejilla de guía de ondas;
- 10 la figura 2B es un diagrama esquemático que muestra una vista desde arriba del acoplamiento de rejilla de guía de ondas, que corresponde a la figura 2A;
- la figura 3 es un diagrama esquemático de otro ejemplo de un rastreador de estrellas a escala de chip de acuerdo con aspectos de la invención;
- 15 la figura 4A es un diagrama de un ejemplo de un patrón de salida súper modal nocional correspondiente a la luz acoplada en la guía de ondas desde un primer ángulo de entrada;
- 20 la figura 4B es un diagrama de otro ejemplo de un patrón de salida súper modal nocional correspondiente a la luz acoplada en la guía de ondas desde un segundo ángulo de entrada diferente;
- la figura 5A es un diagrama esquemático que muestra una vista desde arriba de otro ejemplo de un rastreador de estrellas a escala de chip de acuerdo con aspectos de la invención;
- 25 la figura 5B es un diagrama esquemático que muestra una vista desde arriba de otro ejemplo de un rastreador de estrellas a escala de chip que incluye deflectores de luz de acuerdo con aspectos de la invención;
- la figura 6 es un diagrama esquemático de otro ejemplo de un rastreador de estrellas a escala de chip de acuerdo con aspectos de la invención;
- 30 la figura 7 es un diagrama esquemático de otro ejemplo de un rastreador de estrellas a escala de chip de acuerdo con aspectos de la invención; y
- 35 la figura 8 es un diagrama esquemático de otro ejemplo de un rastreador de estrellas a escala de chip que incorpora interferometría de luz blanca de acuerdo con aspectos de la invención.

Descripción detallada

- 40 Como se discutió anteriormente, los rastreadores de estrellas tradicionales son típicamente grandes debido a la necesidad de una gran apertura óptica para conseguir imágenes de resolución suficientemente alta, lo que generalmente da como resultado que el sistema tenga una gran longitud focal (y física). Sin embargo, en muchas aplicaciones puede ser deseable minimizar el tamaño y el peso del sistema de rastreo de estrellas. En un sistema de rastreo de estrellas a escala de chip de acuerdo con aspectos y realizaciones de la presente invención, la distancia
- 45 focal no tiene ningún significado porque la luz no se visualiza como en un sistema tradicional basado en lentes o espejo, sino que se acopla y filtra en una estructura de guía de luz planaria modelada en un sustrato de oblea en capas. La luz capturada se propaga dentro del material de oblea y se detecta en los bordes de la oblea con foto detectores de bajo ruido. La luz detectada se analiza para obtener las características de propagación detalladas que determinan el ángulo de estrella, como se discute adicionalmente más adelante. De este modo, los aspectos y realizaciones están dirigidos a un rastreador de estrellas en el que se usan técnicas de análisis y recogida de luz basadas en guías de ondas para eliminar la necesidad de un telescopio grande, logrando por ello un sistema que retiene una gran apertura óptica para la recogida de luz a la vez que prescinde de los elementos ópticos grandes y a veces pesados asociados con los rastreadores de estrellas tradicionales.
- 50
- 55 Está bien establecido que la luz de espacio libre se puede acoplar en una guía de ondas a través del uso de una rejilla de difracción dispuesta sobre la superficie de una guía de ondas. Este concepto se conoce como "acoplamiento de rejilla". Los aspectos y las realizaciones están dirigidos a un rastreador de estrellas a escala de chip que usa el concepto de acoplamiento de rejilla para recoger la luz estelar con una guía de ondas planaria, eliminando así la necesidad de un telescopio óptico tradicional para recoger y enfocar la luz. A diferencia de los
- 60 rastreadores de estrellas tradicionales, las realizaciones del rastreador de estrellas a escala de chip discutido aquí no "forman la imagen" directamente de las estrellas, sino que acoplan la luz estelar en guías de luz que luego son interrogadas para obtener información del ángulo de estrella, como se explica más adelante. Se pueden usar modalidades particulares de acoplamiento para extraer información recogida de la luz estelar y crear imágenes de estrellas individuales o un campo de estrellas. Adicionalmente, la "deflación", o la eliminación de la luz dispersa de ángulos extremos que de otra manera contribuirían al ruido en las mediciones, se puede lograr dentro de las guías de luz. Además, de acuerdo con ciertas realizaciones, la incorporación de interferometría de luz blanca en una
- 65

plataforma de cámara de estrella a escala de chip puede proporcionar una precisión angular mejorada para la formación de imágenes de estrellas, como también se explica con más detalle a continuación. Estos y otros aspectos pueden proporcionar un rastreador de estrellas a escala de chip en el que el sistema óptico completo puede ser tan fino como una oblea de silicio.

5 Se debe apreciar que las realizaciones de los métodos y aparatos discutidos en este documento no están limitadas en su aplicación a los detalles de construcción y de la disposición de los componentes expuestos en la siguiente descripción o ilustrados en los dibujos adjuntos. Los métodos y aparatos se pueden implantar en otras realizaciones y ser practicados o llevarse a cabo de diversas maneras. Los ejemplos de implantaciones específicas se proporcionan en la presente memoria con fines ilustrativos únicamente y no se pretende que sean limitativos. Además, la fraseología y la terminología utilizadas en este documento son para fines de descripción y no deben considerarse como limitantes. El uso en este documento de "incluir", "comprender", "tener", "contener", "implicar" y variaciones de los mismos términos pretende abarcar los artículos enumerados a continuación y sus equivalentes, así como elementos adicionales. Las referencias a "o" pueden interpretarse como inclusivas, por lo que los términos descritos con "o" pueden indicar uno sólo, más de uno y todos los términos descritos. Cualesquiera referencias al frente y atrás, izquierda y derecha, el superior y el inferior, más arriba y más abajo, y vertical y horizontal están destinadas a la conveniencia de la descripción, no a limitar los sistemas y métodos presentes o sus componentes a ninguna orientación posicional o espacial.

20 Con referencia a la figura 1, se ilustra un diagrama esquemático de un ejemplo del sistema óptico para un rastreador de estrellas a escala de chip de acuerdo con una realización. El sistema óptico 100 del rastreador de estrellas a escala de chip incluye un sustrato 110 de oblea multicapa, al menos una capa que actúa como guía de luz (o guía de ondas) actúa como guía 115 dieléctrica planaria de ondas para propagar la luz estelar 130, 135 en uno o más modos de propagación espacial, como se explica más adelante. En una realización, la guía 115 de ondas es una guía de ondas con múltiples modos capaz de soportar múltiples modos espaciales de propagación de la luz. En un ejemplo, el sustrato 110 de obleas es una oblea delgada de menos de un milímetro. Los materiales de obleas pueden incluir cualquier material que tenga transparencia óptica de banda ancha de tal manera que sea capaz de transmitir la luz estelar 130, 135. En ciertos ejemplos, la guía de ondas incluye una o más capas dieléctricas del sustrato 110 de oblea; sin embargo, en otros ejemplos, la guía de ondas puede ser una guía de ondas hueca, o puede incluir estructuras de rejillas metálicas, estructuras meta materiales u otras formas de guías de ondas.

El sustrato 110 de oblea incluye una estructura 120 de acoplamiento, que puede incluir una matriz de elementos micro ópticos, configurados para acoplar la luz estelar 130, 135 en la guía 115 de ondas. En un ejemplo, la estructura 120 de acoplamiento está modelada en la superficie del sustrato 110 de oblea. En una realización, la estructura 120 de acoplamiento incluye una rejilla de banda ancha de longitud de onda inferior configurada para acoplar la luz estelar 130, 135 de banda ancha en la guía 115 de ondas. Sin embargo, los expertos en la técnica apreciarán, dado el beneficio de esta divulgación, que las realizaciones del rastreador de estrellas a escala de chip no están limitadas al uso de un acoplador de rejilla. Por ejemplo, la estructura 120 de acoplamiento puede incluir cualquiera de las rejillas de guía de ondas, nano antenas ópticas, cristales fotónicos, nano materiales, materiales de índice de refracción negativa y similares.

La luz estelar 130, 135 emana de las estrellas 140 como un frente de onda inicialmente circular de manera aproximada. Sin embargo, dado que las estrellas 140 son muy distantes, y debido a que el sistema óptico 100 es pequeño, la luz estelar 130, 135 es esencialmente una onda plana perfecta cuando llega al sistema óptico. Con referencia a las figuras 2A y 2B, y considerando la luz estelar 135 como ejemplo, la onda plana 135a del espacio libre es perturbada por una estructura 120 de matriz de acoplamiento de banda ancha modelada en la superficie del sustrato 110 de oblea, como se explicó anteriormente, que redirige por ello la luz acoplada 135b a capas de guías de luz situadas debajo de la estructura 120 de acoplamiento y que están orientadas aproximadamente perpendiculares a la normal de la oblea. La luz redirigida 135b se distribuye en combinaciones de trayectorias de propagación basadas en el ángulo original θ de aproximación y la longitud de onda de la luz. Por ejemplo, haciendo referencia a la figura 3, que ilustra un ejemplo de un sistema óptico en el que el sustrato 110 de oblea incluye múltiples capas por debajo de la estructura 120 de acoplamiento, la luz estelar 130, 135 incidente en la estructura 120 de acoplamiento desde diferentes ángulos de entrada se puede acoplar de diferentes modos espaciales en la oblea 110. La luz redirigida 130b, 135b se desplaza en un "patrón súper modal" a lo largo de las guías de luz hasta el borde del sustrato 110 de oblea, como se ilustra esquemáticamente en las figuras 2B y 3. El patrón súper modal puede entonces ser muestreado mediante detectores fotosensibles (no mostrados), para capturar características modales precisas a partir de las cuales se pueden derivar las constantes de propagación y luego los ángulos (θ) de aproximación. Las figuras 4A y 4B ilustran patrones de salida súper modales nacionales a la salida de la(s) guía(s) de luz que representan dos ángulos de entrada diferentes de la luz estelar. En un ejemplo, los detectores fotosensibles son píxeles de sensor de muy bajo ruido, opcionalmente posicionados tanto en el borde como debajo de la oblea. De este modo, los modos discretos de la guía de ondas proporcionan una resolución angular de formación de imágenes, y el ángulo de altura y de acimut de las estrellas se pueden determinar con precisión a partir de la extensión angular de la luz que se propaga en el sustrato 110 de oblea.

65 Una característica de diseño importante en todos los rastreadores o cámaras de estrella es la "sombra solar" y/o los "deflectores", que se usan para eliminar la luz dispersa que llega a ángulos extremos desde el exterior del campo de

visión de la cámara. Para las realizaciones del rastreador de estrellas a escala de chip de oblea delgada discutidas en este documento, una sombra solar externa, como la que se puede usar con rastreadores de estrellas convencionales, puede ser demasiado grande. Sin embargo, la luz solar directa que incide en el plano óptico puede dar lugar a un nivel demasiado alto de ruido de fondo que afectaría negativamente el rendimiento de la imagen del rastreador de estrellas. Por consiguiente, en ciertas realizaciones del rastreador de estrellas a escala de chip, la deflación se lleva a cabo dentro de la estructura 115 de guía de luz de la oblea 110, con micro óptica y modificando el índice efectivo de la oblea mediante ahusamiento. Específicamente, los deflectores dentro del chip se utilizan para maniobrar la luz dispersa fuera de la ruta de detección. De acuerdo con una realización, los deflectores funcionan segregando la luz en base a la constante de propagación, como se explica adicionalmente más adelante. De este modo, la luz fuera de la apertura numérica de la estructura de capas no se acoplará a las capas de detección, mientras que los desplazamientos de trayectorias de propagación vertical retiran cualquier luz esparcida del plano de detección.

Con referencia a las figuras 5A y 5B, se ilustran, esquemáticamente, vistas desde arriba de dos ejemplos de un rastreador de estrellas a escala de chip de acuerdo con ciertas realizaciones. La figura 5A ilustra un ejemplo del concepto básico de rastreador de estrellas a escala de chip como se explicó anteriormente con respecto a las figuras 1 y 3, y la figura 5B ilustra un ejemplo de un rastreador de estrellas a escala de chip que incluye deflectores internos con índice ahusado. Con referencia a la figura 5A, la luz estelar 130 que llega formando un cierto ángulo (ilustrado como un ángulo casi normal de incidencia) con el campo de visión del sistema se acopla en la guía 115 planaria de ondas mediante un acoplador 120 de rejilla (u otro dispositivo de acoplamiento) y se propaga en la guía de onda, como se explicó anteriormente. Sin embargo, la luz dispersa, tal como la luz solar 315 del sol 310, también está acoplada a la guía 115 de ondas a través de la estructura 120 de acoplamiento y se puede propagar a la salida de la guía de ondas junto con la luz estelar 130, como se muestra.

Para abordar esta preocupación, la guía de ondas puede ser ahusada y estar diseñada para favorecer fuertemente la luz en el campo de visión, mientras descarta la mayoría de la luz dispersa que llega desde el exterior del campo de visión, como se muestra en la figura 5B. Específicamente, de acuerdo con una realización, la guía 320 de ondas está formada con un índice de refracción ahusado tal que ciertos modos espaciales no se propagan a la salida de la guía de ondas. El experto en la técnica apreciará, dado el beneficio de esta descripción, que la guía 320 de ondas puede no tener un ahusamiento físico, como se ilustra, sino que en cambio el "ahusamiento" se consigue variando el índice de refracción de la(s) capa(s) utilizada(s) para formar la guía de ondas en la oblea 110. Como se explicó anteriormente, al menos para ciertos ángulos de incidencia de la luz estelar 130, 135, la luz acoplada se propaga a través de la guía de ondas en una manera de "zigzag", como se ilustra en la figura 2B, con las ondas de luz confinadas al dieléctrico por reflexión interna total en su superficie. La luz acoplada en la guía 320 de ondas desde diferentes ángulos se propagará en diferentes modos espaciales, teniendo cada modo una constante de propagación diferente. La constante de propagación define el ángulo o "nitidez" de la trayectoria en zigzag tomada por las ondas de luz a medida que se propagan a través de la guía 320 de ondas. El índice de refracción de los materiales que forman la guía 320 de ondas puede seleccionarse de modo que la luz se acople desde ángulos de incidencia muy altos (con relación a la normal al acoplador), y, teniendo de este modo una constante de propagación que define un zigzag muy "agudo" (uno que tiene una alta tasa de repetición), falla la condición de reflexión interna total necesaria para soportar la propagación a través de la guía de onda. En consecuencia, tal luz 315 es rechazada fuera de la guía 320 de ondas, como se muestra en la figura 5B. En implantaciones prácticas del concepto de diseño ilustrado en la figura 5B, la estructura ahusada puede tener características de supresión de luz dispersa tanto en azimut como en altura.

Los avances en las capacidades de fabricación de obleas permiten modelar las estructuras 120 de acoplamiento de matriz de longitud de onda inferior (en ciertas realizaciones, rejillas efectivamente complejas) que son necesarias para el acoplamiento sensible al ángulo para propagar libremente la luz de banda ancha, como se explicó anteriormente. Mediante el filtrado angular adicional de esta luz, por ejemplo, escaneando el coeficiente de acoplamiento de la matriz, y filtrando en una pila planaria de capas, el ángulo de entrada de la onda plana acoplada se puede detectar con una resolución angular extrema. En particular, de acuerdo con una realización, la direccionalidad del acoplamiento de rejilla se puede manipular mediante ajuste en tiempo real (por ejemplo, mediante ajuste térmico o ajuste de inyección de carga, etc.), de modo que el envolvente de acoplamiento explore la fuente 140 de punto de estrella, proporcionando una mejora en la resolución angular sobre la fuente de punto. La onda plana entrante se distribuye después en capas de guía de luz con una distribución de propagación constante, y el patrón súper modal se muestrea espacialmente en los planos del sensor, proporcionando una buena sensibilidad angular de lectura como se explicó anteriormente. Adicionalmente, en ciertas realizaciones, las técnicas particulares de ajuste y exploración (tales como, pero no limitadas a, ajuste de inyección de carga, etc.) pueden permitir la manipulación de la coherencia para un rendimiento mejorado. De acuerdo con ciertas realizaciones, la explicación anterior proporciona una resolución de ángulo de "altura". En una realización, la selectividad acimutal se consigue a través de un enfoque de diseño de simetría circular, como se explica a continuación.

Con referencia a la figura 6, se ilustra (esquemáticamente) un ejemplo de un sistema de rastreo de estrellas basado en guía de ondas que emplea simetría circular para permitir tanto la resolución angular de altura como la de acimut. En este ejemplo, el sistema 400 incluye un sustrato 410 de oblea que está modelado con un sistema 420 de acoplamiento que está rodeado en el perímetro del sustrato 410 por una pluralidad de guías 430 de onda de

lectura. En el ejemplo ilustrado, el sistema 320 [sic.] de acoplamiento es una rejilla circular de guía de ondas, y las guías 430 de onda de lectura son matrices lineales. En un ejemplo, el sustrato 410 es una oblea de silicio; sin embargo, se pueden usar otros materiales como se explicó anteriormente. Al menos una de las guías 430 de onda de lectura está acoplada a la circuitería 440 de lectura, que incluye un foto detector y una circuitería asociada capaz de analizar la luz 130 propagada por la guía de ondas de lectura para determinar el acimut y la altura de la estrella 140 como se explicó anteriormente. Cada una de las guías 430 de onda de lectura puede ser posicionada y configurarse para aceptar un modo particular de propagación, o estar acoplada a la luz incidente en el sistema 420 de acoplamiento desde un ángulo particular en altura o acimut. De este modo, el sistema circular 420 de acoplamiento se puede configurar para la recogida de luz casi hemisférica, y la matriz de guías 430 de onda de lectura se puede usar para distribuir la luz acoplada en "cubos" de acimut y altura. La luz propagada por cada guía 430 de onda de lectura se puede detectar, y la señal resultante puede ser procesada por el circuito 440 de lectura asociado. Las señales de cada circuito 440 de lectura se pueden procesar para producir una imagen del campo de estrellas, por ejemplo, desde la información del acimut y de la altura extraída de la luz propagada por las guías 430 de onda de lectura.

El sistema 420 de acoplamiento puede incluir ahusamiento, como se explicó anteriormente con referencia a la figura 5B, para rechazar la luz dispersa que llega desde el exterior del campo de visión de la circuitería 440 de lectura asociada con la correspondiente guía 430 de ondas de lectura. Por ejemplo, la luz estelar 130 que puede ser incidente de manera aproximadamente normal (en ángulo de altura) en el sistema 420 de acoplamiento se puede propagar a través de una guía 430 de ondas de lectura a la circuitería 440 de lectura. Sin embargo, la luz solar 315 que puede incidir en un ángulo alto (en altura) respecto a la normal a la superficie del sistema 420 de acoplamiento puede ser rechazada por el ahusamiento. De acuerdo con ciertos ejemplos, el sistema 420 de acoplamiento se puede ajustar para favorecer la luz desde ciertos ángulos de altura, por ejemplo, ajustando el índice de refracción del material de la guía de ondas para cambiar las características de ahusamiento en base a un ajuste térmico o eléctrico. De este modo, el sistema 420 de acoplamiento se puede configurar para aceptar la luz estelar 130 desde ciertos ángulos de altura, y para, por el contrario, rechazar la luz solar 315 desde otros ángulos de altura, incluso siendo el ángulo acimutal el mismo o muy similar.

En el ejemplo ilustrado en la figura 6, el sistema 420 de acoplamiento es circularmente simétrico para permitir la recogida de luz casi hemisférica. En otra realización, el sistema de acoplamiento se puede configurar y ajustar para realizar exploración direccional. Por ejemplo, con referencia a la figura 7, se ilustra otro ejemplo de un sistema de rastreo de estrellas en el que la oblea 410 incluye estructuras 450 de acoplamiento ajustables para exploración direccional. Aunque no se ilustra en la figura 7, las estructuras 450 de acoplamiento también se pueden ahusar como se explicó anteriormente para favorecer la luz desde ciertos ángulos de entrada.

De este modo, los aspectos y las realizaciones pueden proporcionar un rastreador de estrellas de oblea delgada que elimina la necesidad de grandes ópticas y deflectores telescópicos usados típicamente en sistemas de cámaras en estrella convencionales a favor de un sistema de guía de luz en el que la luz del espacio libre está acoplada en una oblea o guía de onda. En particular, los aspectos y las realizaciones proporcionan un rastreador de estrellas en el que la luz estelar se acopla a una guía de luz que confina la luz estelar y la guía hasta detectores que mapean la extensión angular de la propagación confinada. A partir de este mapa angular, se pueden determinar los ángulos de acimut y altura de las estrellas objetivo. No se pueden usar en el sistema ópticas formadoras de imagen/de enfoque, o matrices de sensores; en cambio, la información de altura y acimut de estrella se obtiene de las características de la luz que se propaga en la(s) guía(s). Como se explicó anteriormente, el sistema de acoplamiento puede incluir cualquiera de entre cristales fotónicos, nano materiales, nano antenas, materiales de índice de refracción negativa, antenas ópticas y rejillas de guía de ondas.

Adicionalmente, ciertos aspectos y realizaciones están dirigidos a un sistema interferométrico de formación de imágenes, de banda ancha, de línea base larga, de múltiples aperturas, de escala de oblea y, en particular, al uso de interferometría de luz blanca en chip en un rastreador de estrellas a escala de chip. En una realización, dicho sistema de formación de imágenes incluye un sistema de acoplamiento que puede usarse para acoplar luz estelar en una oblea como se explicó anteriormente. La oblea incluye múltiples aperturas de salida posicionadas a lo largo de la oblea que se conmutan en diversas combinaciones de línea base, y que conducen a interferómetros de luz blanca a escala de chip. Cada interferómetro puede estar configurado para determinar la diferencia de fase entre dos aperturas a la vez (un solo punto en el dominio de Fourier). Una imagen se puede luego reconstruir a partir de muchos pares diferentes de líneas base de aperturas. En una realización, se puede implantar el ajuste de fase en chip para la coincidencia de longitud de trayectoria, así como el muestreo espectral para procesar la luz en bandas espectrales estrechas. Tal capacidad de formación de imágenes interferométrica a escala de oblea puede proporcionar una resolución angular muy alta en la formación de imágenes de la(s) estrella(s) 140.

Por ejemplo, con referencia a la figura 8, se ilustra (esquemáticamente) un rastreador 500 de estrellas a escala de chip configurado para interferometría de luz blanca de acuerdo con una realización. El sustrato 510 de oblea incluye una pluralidad de aperturas ópticas 520 de acoplamiento que están conectadas a un conmutador óptico 530. En un ejemplo, las aperturas ópticas 520 de acoplamiento están dispuestas a lo largo de ejes 540, 545 que se cruzan en un ángulo de aproximadamente 90 grados, como se muestra en la figura 8. El ajuste de fase basado en guía de ondas mediante elementos ópticos 550 de control de longitud de trayectoria puede proporcionar una

coincidencia precisa de longitud de trayectoria óptica y gestión de la dispersión. Cada apertura óptica de acoplamiento puede emparejarse ópticamente con cualquier otra apertura, y alimentarse en un interferómetro 560. El conmutador óptico 530 selecciona qué par de aperturas se alimenta para el interferómetro 560 en cualquier momento dado. En un ejemplo, el interferómetro caracteriza franjas espectrales ampliamente distribuidas. Las imágenes correspondientes se pueden reconstruir usando un procesador 570. Las realizaciones del rastreador 500 de estrellas a escala de chip pueden usarse para cubrir un rango completo de frecuencias espaciales, donde "rango completo de frecuencias espaciales" se define como el rango comprendido entre y que incluye el máximo y el mínimo de la distancia posible entre las aperturas 520 de acoplamiento que puede ser soportada por la geometría de la oblea. Adicionalmente, todos los ejes angulares posibles pueden estar cubiertos por la disposición de ~90 grados ilustrada en la figura 8.

De este modo, los aspectos y las realizaciones pueden proporcionar una solución para la creación de una óptica altamente sensible al ángulo para leer el ángulo de llegada de una onda óptica plana entrante, mientras se empaqueta simultáneamente toda la trayectoria óptica en una estructura de oblea delgada. Como se explicó anteriormente, el sistema óptico de oblea delgada interactúa con el frente de onda, y acopla la luz en un ancho de banda amplio para permitir la formación de imágenes de estrellas. Adicionalmente, el sistema óptico puede realizar filtrado y ajuste de fase, y puede permitir el desconchado basado en la constante de propagación como se explicó anteriormente. El sistema de acoplamiento puede incluir estructuras de longitud de onda inferior modeladas en la oblea que incluye las guías de luz, como también se explicó anteriormente. Este patrón se puede llevar a cabo usando procesos modernos de fabricación y diseño ópticos a escala de oblea, que incluyen fotónica de silicio y nano antenas metálicas ópticas.

Después de haber descrito anteriormente varios aspectos de al menos una realización, se apreciará que al experto en la técnica enseguida se le ocurrirán diversas alteraciones, modificaciones y mejoras. Tales alteraciones, modificaciones y mejoras pretenden ser parte de esta descripción y están destinadas a estar dentro del alcance de la invención. Por consiguiente, la descripción y los dibujos anteriores son sólo a modo de ejemplo, y el alcance de la invención debe determinarse a partir de la construcción apropiada de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un rastreador de estrellas que comprende:

5 una guía (115; 320; 430) de luz;

un sistema (120; 420) de acoplamiento dispuesto sobre una superficie de la guía (115; 320; 430) de luz y configurado para acoplar luz estelar (130, 135) en la guía (115; 320; 430) de luz de tal manera que un modo de propagación de la luz estelar (130, 135) en la guía (115; 320; 430) de luz está al menos parcialmente determinado por un ángulo de incidencia de la luz estelar (130, 135) en el sistema (120; 420) de acoplamiento;

una pluralidad de aperturas ópticas (520) de salida conectadas a la guía (115; 320; 430) de luz;

15 un sistema de detector acoplado a la guía (115; 320; 430) de luz y configurado para analizar la luz estelar (130, 135) propagada en la guía (115; 320; 430) de luz para determinar al menos uno de entre un ángulo de acimut y un ángulo de altura de una estrella (140) que es una fuente de luz estelar (130, 135); y

20 un interferómetro (560) acoplado selectivamente a un par de entre la pluralidad de aperturas ópticas (520) de salida y configurado para determinar una diferencia de fase entre la luz estelar (130, 135) propagada mediante la guía (115; 320; 430) de luz a cada par de la pluralidad de aperturas ópticas (520) de salida.

2. El rastreador de estrellas de la reivindicación 1, en el que el sistema (120; 420) de acoplamiento comprende un acoplador de rejilla de banda ancha modelado en la superficie de la guía (115; 320; 430) de luz.

25 3. El rastreador de estrellas de la reivindicación 1, en el que la guía (115; 320; 430) de luz es una guía de ondas con múltiples modos compuesta de al menos una capa dieléctrica de un sustrato (110; 410; 510) de oblea.

30 4. El rastreador de estrellas de la reivindicación 3, en el que el sustrato (110; 410; 510) de oblea es una oblea de silicio.

35 5. El rastreador de estrellas de la reivindicación 3, en el que un índice de refracción de al menos una capa dieléctrica está ahusado para impedir la propagación en la guía (115; 320; 430) de luz de la luz incidente en el sistema (120; 420) de acoplamiento, a partir de un rango predeterminado de ángulos respecto a la normal a la superficie de la guía (115; 320; 430) de luz.

6. El rastreador de estrellas de la reivindicación 1, en el que la guía de luz comprende un sustrato de oblea y el sustrato (110; 410; 510) de oblea incluye la pluralidad de aperturas ópticas (520) de salida.

40 7. El rastreador de estrellas de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un conmutador óptico (530) acoplado a la pluralidad de aperturas ópticas (520) de salida y configurado para acoplar selectivamente el par de la pluralidad de aperturas ópticas (520) de salida al interferómetro (560).

45 8. El rastreador de estrellas de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un procesador (570) acoplado al interferómetro (560) y configurado para reconstruir una imagen a partir de la información de fase determinada por el interferómetro (560).

9. El rastreador de estrellas de la reivindicación 1, en el que la pluralidad de aperturas ópticas (520) de salida están dispuestas a lo largo de dos ejes (540, 545) que intersecan entre sí en un ángulo de aproximadamente 90 grados.

50 10. Un método de formación de imágenes de un campo estelar que comprende:

acoplar la luz estelar (130, 135), desde al menos una estrella, a una guía planaria (115; 320; 430) de luz,

55 propagar la luz estelar (130, 135) a través de la guía (115; 320; 430) de luz a un sistema de detector, en el que un modo de propagación de la luz estelar (130, 135) en la guía (115; 320; 430) de luz se basa al menos en parte en un ángulo de incidencia de la luz estelar (130, 135) sobre una superficie de la guía (115; 320; 430) de luz, y

60 determinar al menos uno de entre un ángulo de azimut y un ángulo de altura de al menos una estrella (140) en base a las características detectadas de la luz estelar (130, 135) propagada en la guía de luz y detectada en el sistema de detector;

en el que la propagación de la luz estelar (130, 135) incluye la propagación de la luz estelar (130, 135) mediante la guía (115; 320; 430) de luz hasta un par de aperturas ópticas (520), y el método comprende adicionalmente:

65 medir interferométricamente una diferencia de fase entre la luz estelar (130, 135) en cada una del par de aperturas ópticas (520).

11. El método de la reivindicación 10, en el que acoplar la luz estelar (130, 135) en la guía (115; 320; 430) de luz incluye acoplar la luz estelar (130, 135) en la guía (115; 320; 430) de luz usando un acoplador de rejilla modelado en la superficie de la guía (115; 320; 430) de luz.
- 5
12. El método de la reivindicación 10, que comprende adicionalmente reconstruir una imagen a partir de información de diferencia de fase.
13. El método de la reivindicación 10, en el que propagar la luz estelar (130, 135) hasta un par de aperturas ópticas (520) incluye conmutar de manera ópticamente selectiva la luz estelar (130, 135) al par de aperturas ópticas (520).
- 10
14. El método de la reivindicación 10, que comprende adicionalmente impedir la propagación en la guía (115; 320; 430) de luz de la luz incidente en el sistema de acoplamiento a partir de un rango predeterminado de ángulos de incidencia respecto a la guía (115; 320; 430) de luz.

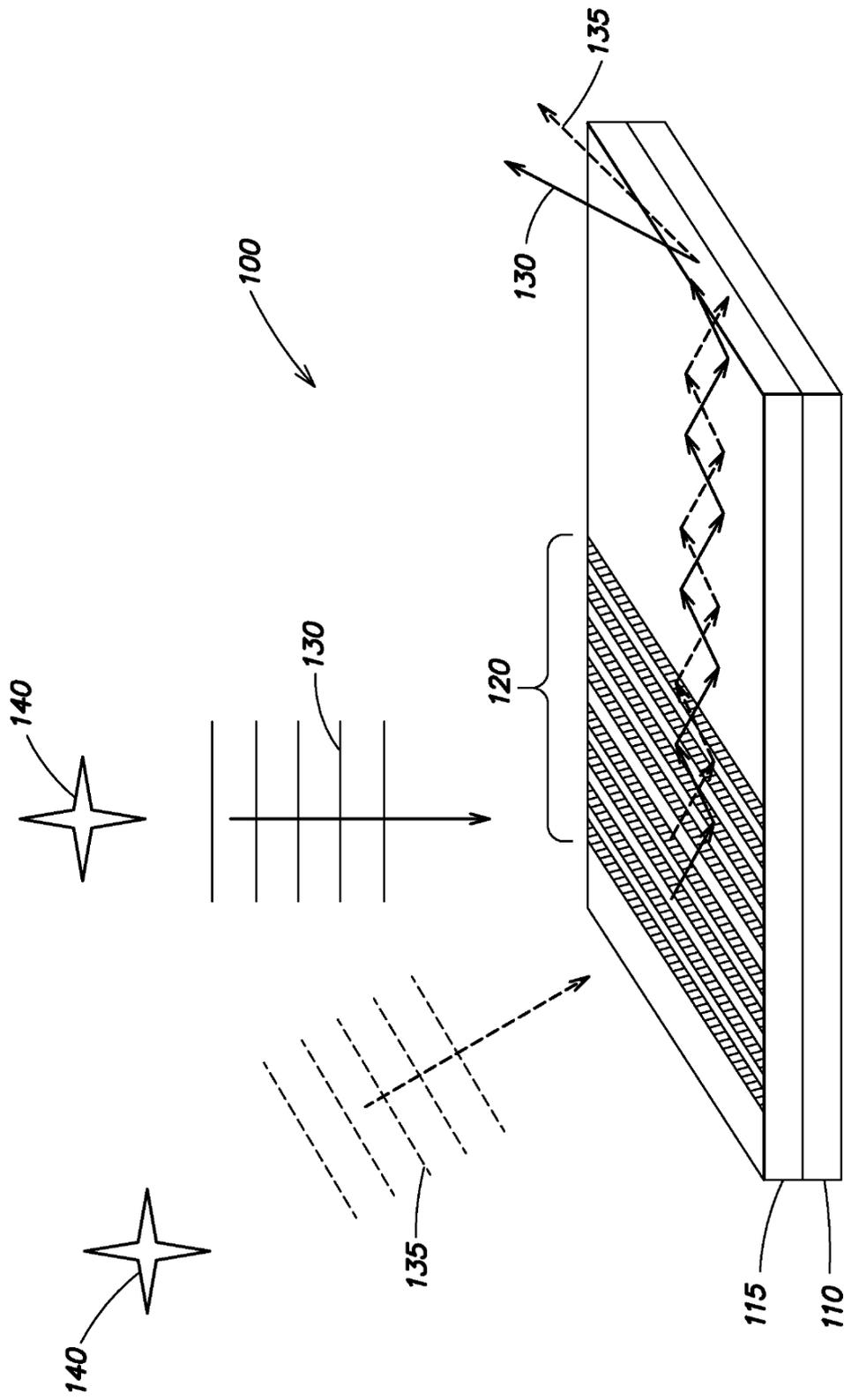


FIG. 1

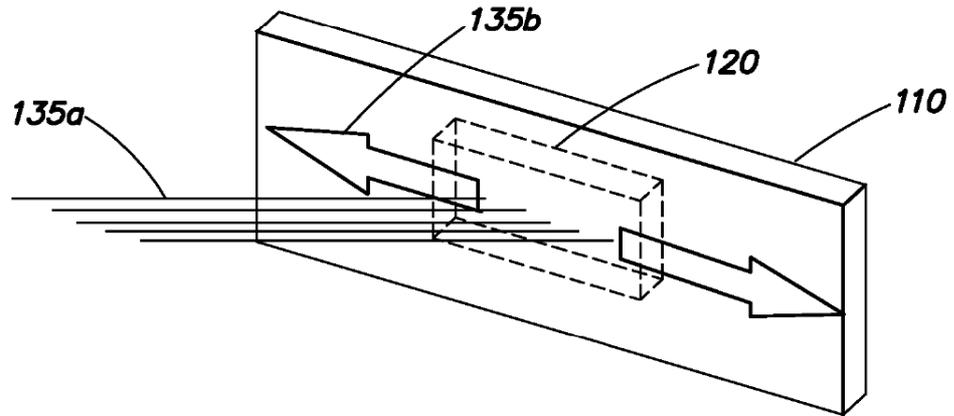


FIG. 2A

(Técnica relacionada)

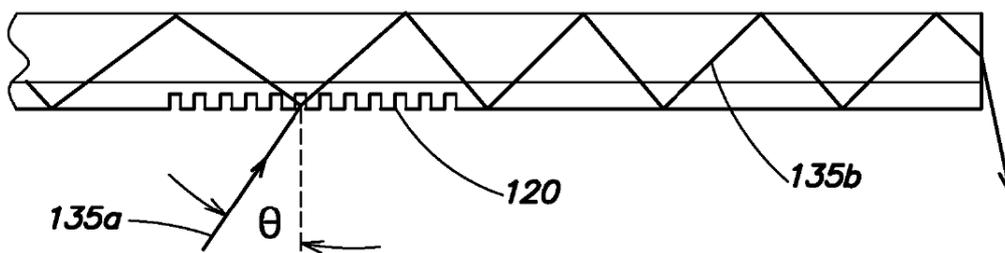


FIG. 2B

(Técnica relacionada)

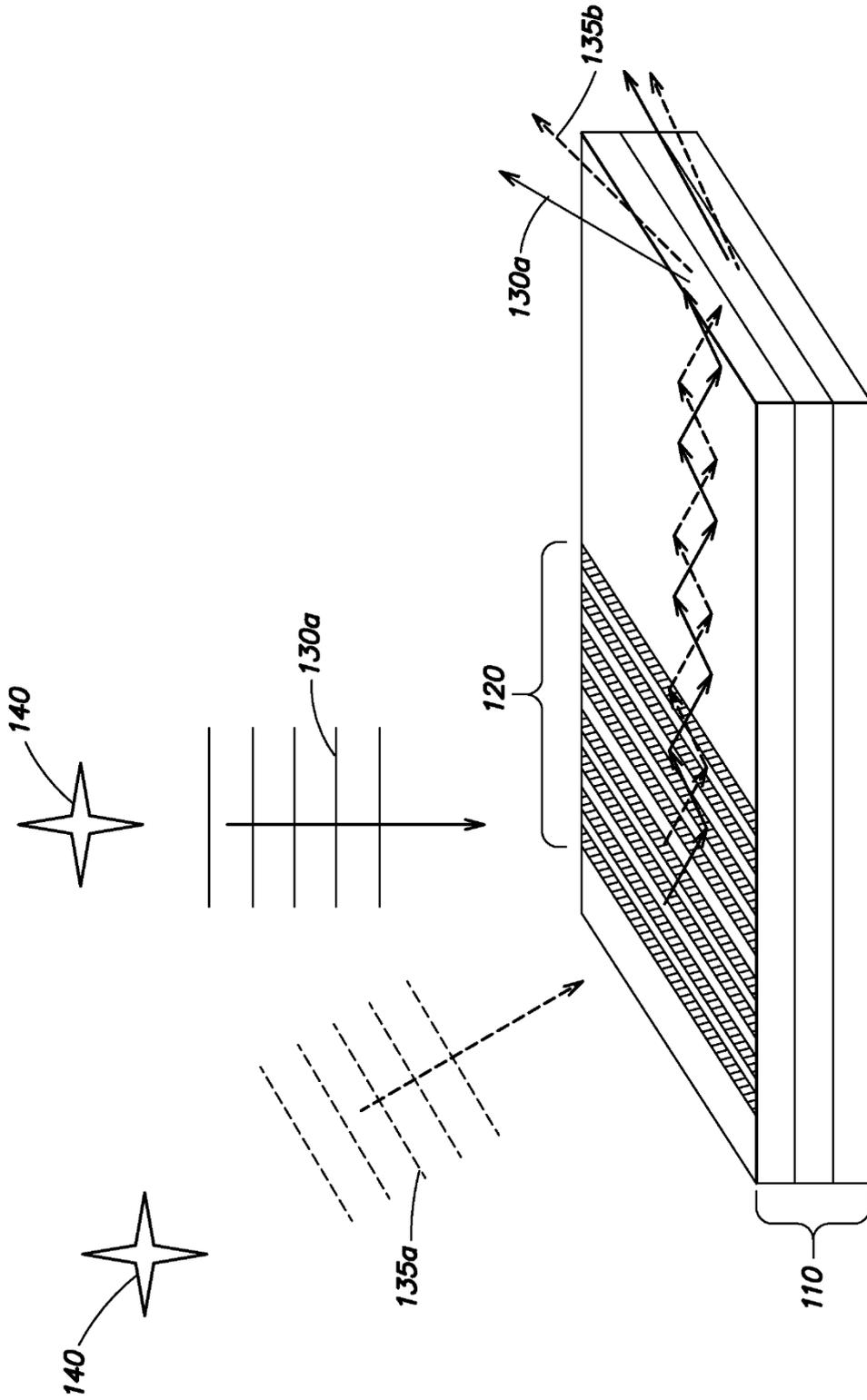


FIG. 3

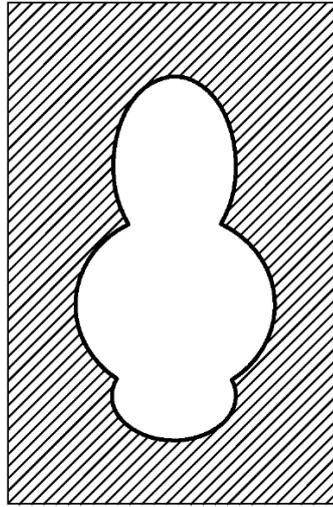


FIG. 4A

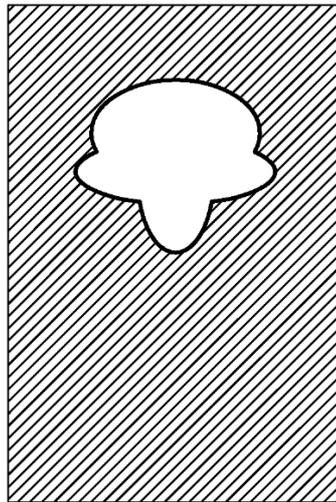


FIG. 4B

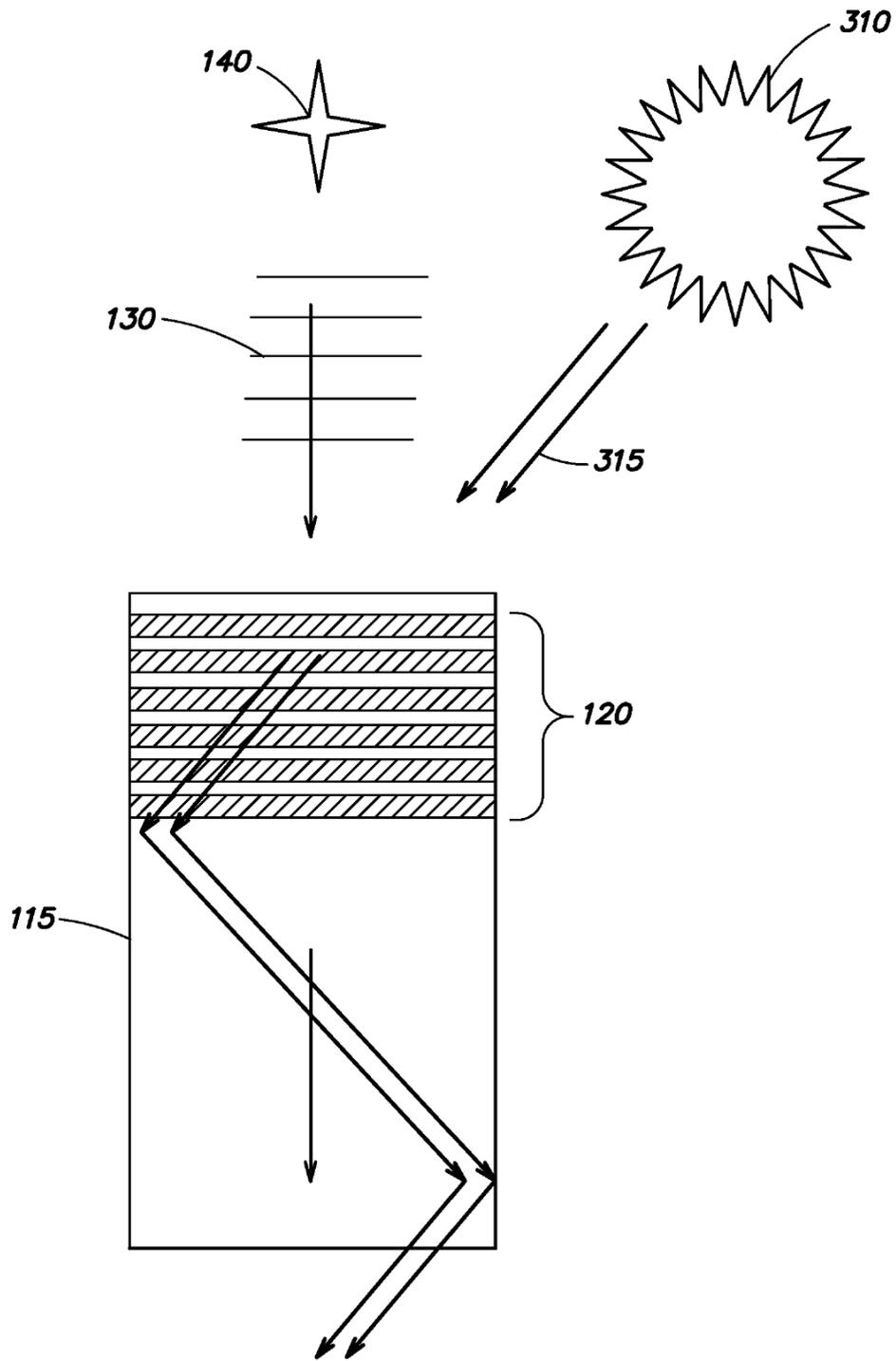


FIG. 5A

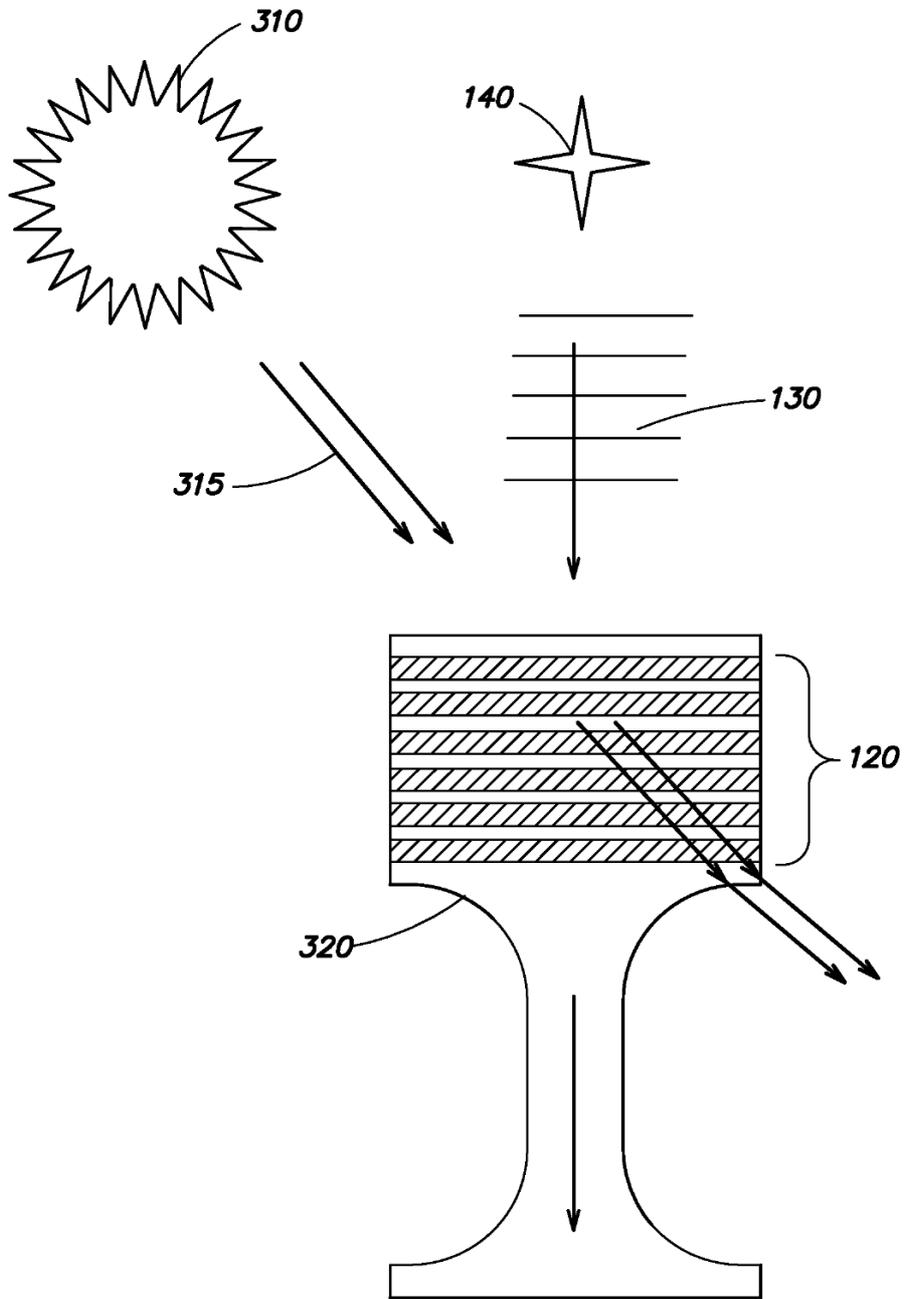


FIG. 5B

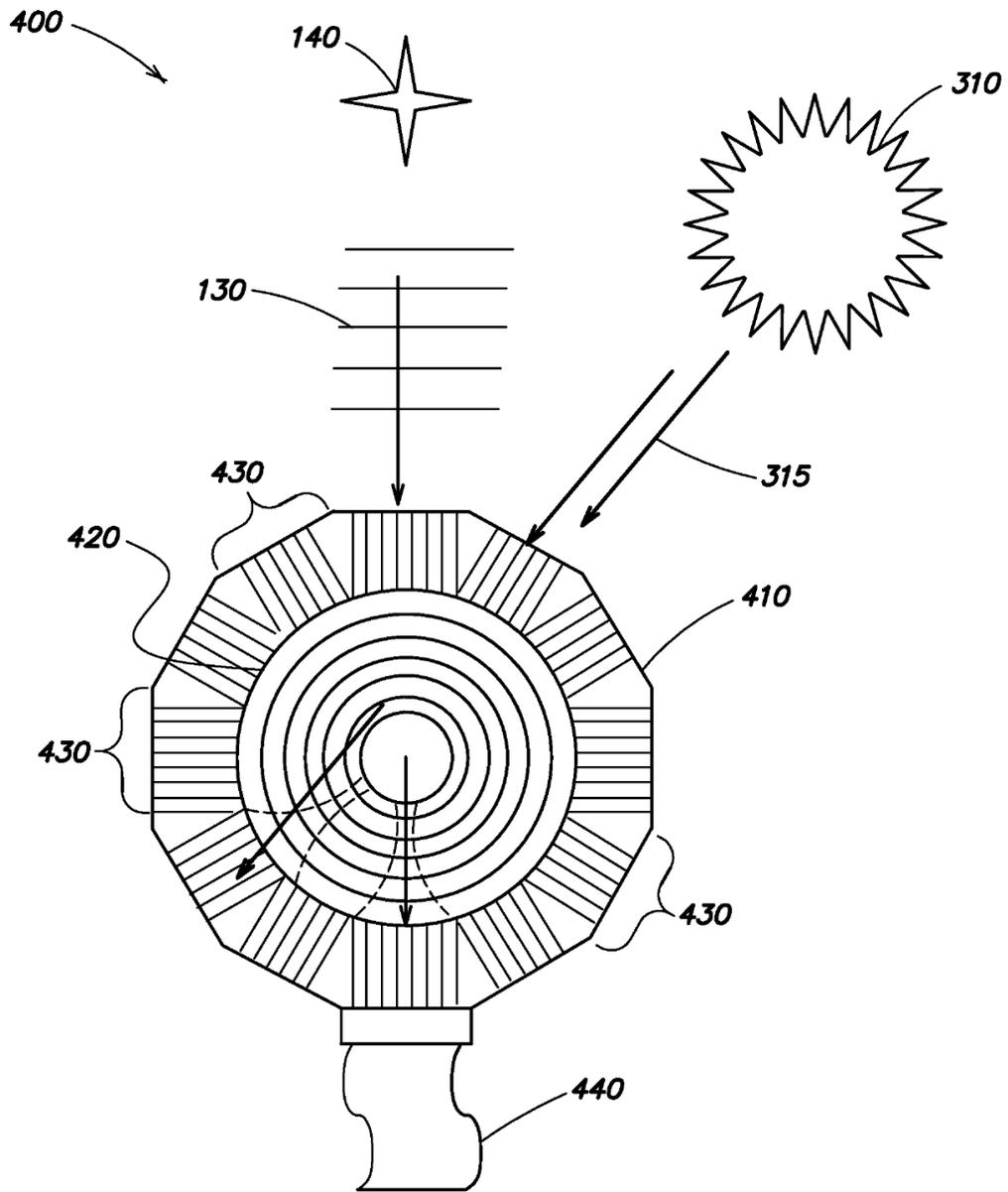


FIG. 6

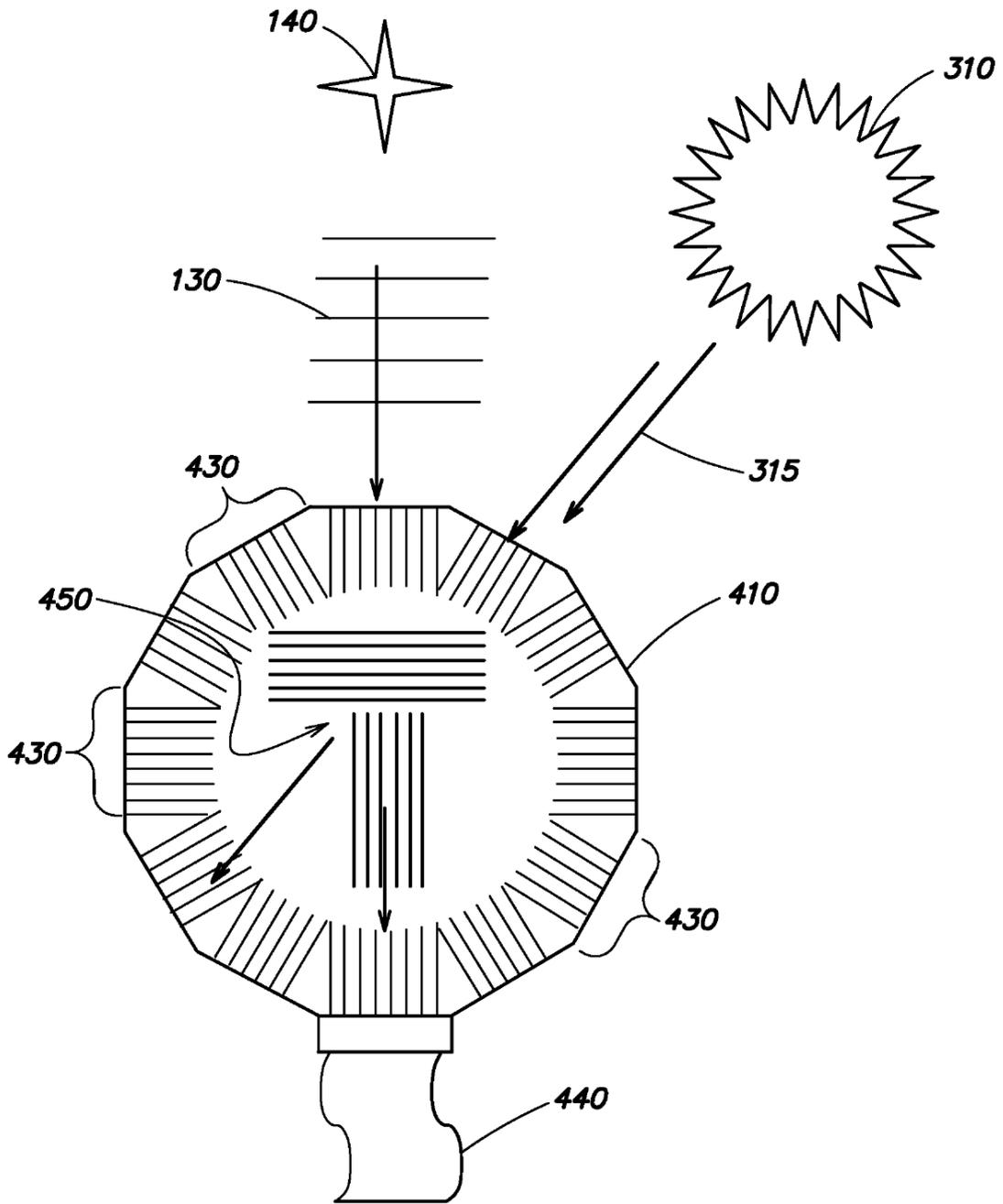


FIG. 7

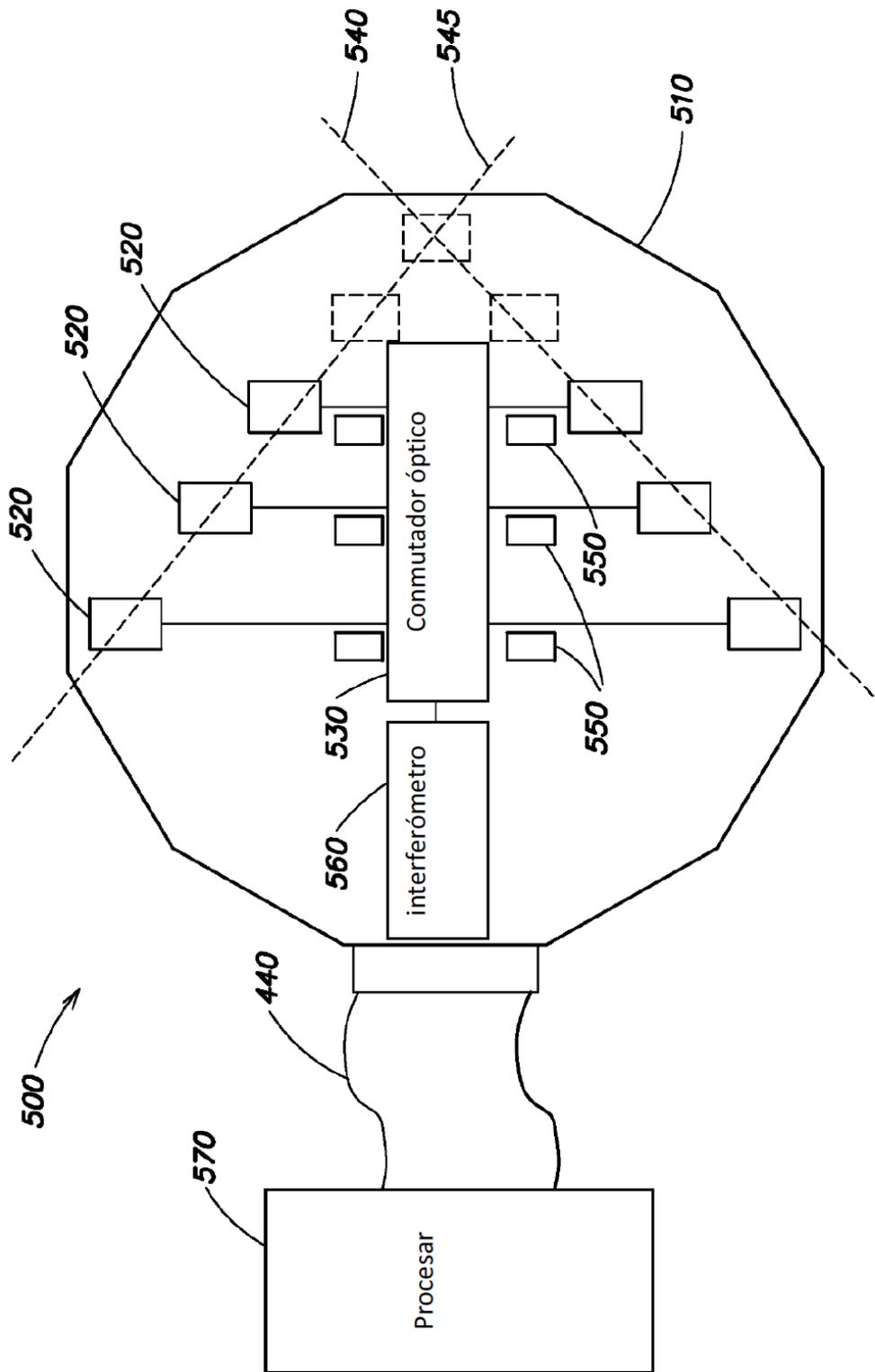


FIG. 8