

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 574 608**

51 Int. Cl.:

**G01J 3/28** (2006.01)

**G01J 3/453** (2006.01)

**G01J 3/02** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.01.2014 E 14701529 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.05.2016 EP 2948745**

54 Título: **Mejoras en o relacionadas con la formación de imágenes hiperspectrales**

30 Prioridad:

**24.01.2013 EP 13152532**

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

**21.06.2016**

73 Titular/es:

**LAMBDA-X (100.0%)  
Avenue Robert Schuman 102  
1400 Nivelles, BE**

72 Inventor/es:

**BEGHUIN, DIDIER**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 574 608 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

Mejoras en o relacionadas con la formación de imágenes hiperespectrales

### Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a mejoras en o relacionadas con la formación de imágenes hiperespectrales y se refiere más particularmente, aunque no exclusivamente, a sistemas de formación de imágenes hiperespectrales por transformadas de Fourier.

### Antecedentes de la invención

10 La formación de imágenes espectrales proporciona información tridimensional sobre un sujeto, dedicándose dos dimensiones a las dos dimensiones espaciales de la imagen y comprendiendo la tercera dimensión la información espectral. La formación de imágenes hiperespectrales es un término dedicada a la formación de imágenes espectrales en donde la dimensión espectral se resuelve mejor que con las técnicas basadas en filtro habituales, con típicamente un alto número de bandas espectrales (100 bandas o más en el dominio visible) y una resolución fina (10 nm o menos en el dominio visible).

15 La formación de imágenes espectrales se puede realizar de diferentes maneras, incluyendo la utilización de tecnología basada en transformadas de Fourier. La formación de imágenes espectrales por transformadas de Fourier requiere la adquisición interferogramas. Una pluralidad de configuraciones interferométricas físicas es adecuada para el propósito de la adquisición de interferogramas incluyendo la interferometría de Michelson que tiende a utilizarse principalmente para longitudes de onda en la región infrarroja. Además, también se pueden utilizar interferómetros de Mach Zender, de Sagnac y de polarización.

20 El documento US-A-5781293 describe un espectrómetro de transformadas de Fourier en el que se utilizan prismas birrefringentes para introducir la diferencia de trayectoria entre dos polarizaciones de luz y una transformada de Fourier del interferograma resultante en un detector proporciona la distribución espectral de la luz incidente.

25 En un artículo de A. R. Harvey y D. W. Fletcher-Holmes, titulado "Espectrómetro birrefringente de formación de imágenes por transformadas de Fourier", Optics Express, volumen 12(22), página 5368, 2004, se revela un espectrómetro de formación de imágenes por transformadas de Fourier que comprende un interferómetro birrefringente que utiliza un par adaptado de prismas de Wollaston, produciéndose el interferograma por el movimiento de un elemento en el interferómetro. Se conocen por los documentos DE 10 2008 009 044 A1 y EP 1 598 647 A1 otros dispositivos adicionales que usan prismas de Wollaston.

30 Un prisma de Wollaston es una de las posibles configuraciones de un conjunto de elementos birrefringentes para separar la radiación polarizada en dos componentes polarizadas ortogonalmente.

35 Aunque estas configuraciones pueden ser extremadamente compactas, dado que proporcionan interferómetros de tipo de trayectoria común sin tener que utilizar elementos adicionales de división de haz, éstos tienden a tener desventajas. Una desventaja es económica debido a la complejidad de fabricación de prismas de Wollaston pareados. El primer prisma de Wollaston divide la radiación incidente en dos componentes de polarización en diferentes direcciones y el segundo prisma de Wollaston redirige las dos componentes de polarización de manera que sean paralelos. Para que esta configuración funcione adecuadamente, los dos prismas de Wollaston deben estar pareados y bien alineados. El pareado de los prismas de Wollaston se lleva a cabo durante la producción garantizando que el ángulo de cuña o división del primer prisma de Wollaston es igual al ángulo de cuña o división del segundo prisma de Wollaston.

40 Otra desventaja se refiere a la dependencia frente al campo de la diferencia de longitud de trayectoria óptica y, en particular, a la dependencia frente al campo de la relación entre la diferencia de longitud de trayectoria óptica y la traslación del segundo prisma de Wollaston. Para sistemas de formación de imágenes en los que el campo de visión no se limita a un único punto, los rayos principales de varios puntos de campo aparecen con diferentes ángulos de incidencia sobre el prisma de Wollaston, y la diferencia de longitud de trayectoria óptica depende también así del ángulo de incidencia. La recuperación del espectro para los diferentes puntos de campo debe entonces tenerse en cuenta esta dependencia frente al campo de la relación entre la diferencia de longitud de trayectoria óptica y la traslación del prisma. Para mediciones espectrales precisas, no se puede aplicar el mismo procesamiento de señal a todos los puntos del campo y, por lo tanto, el procesamiento de señal es más complejo.

50 Además, la formación de imágenes hiperespectrales por transformadas de Fourier puede llevar mucho tiempo si se necesita realizar y procesar muchas mediciones. Estas mediciones también pueden resultar perturbadas por el movimiento del aire.

### Sumario de la invención

Por tanto, es un objeto de la presente invención proporcionar un sistema de formación de imágenes hiperespectrales que al menos reduzca las desventajas descritas anteriormente.

Es otro objeto de la presente invención proporcionar un sistema de formación de imágenes hiperespectrales con un tiempo de adquisición sustancialmente reducido que tenga menos componentes y que no requiera el pareado y la adaptación de prismas birrefringentes.

5 Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método para realizar una formación de imágenes hiperespectrales, comprendiendo el método las etapas de:

- a) recibir una radiación polarizada en un primer prisma de Wollaston situado en una primera posición;
- b) separar la radiación polarizada en dos componentes polarizadas ortogonalmente utilizando el primer prisma de Wollaston;
- 10 c) dirigir las dos componentes polarizadas ortogonalmente hacia una segunda posición usando una óptica de relé, formándose la imagen del primer prisma de Wollaston situado en la primera posición en la segunda posición;
- d) recombinar las dos componentes polarizadas ortogonalmente en una radiación polarizada recombinada en la segunda posición;
- e) proyectar la radiación polarizada recombinada en un solo estado de polarización utilizando al menos un polarizador; y
- 15 f) modular la radiación polarizada recombinada para que interfiera en el plano de formación de imágenes;

caracterizado por que la etapa f) comprende la traslación del primer prisma de Wollaston en una dirección paralela a su plano de división virtual para modular la radiación polarizada recombinada.

20 Formando en la segunda posición la imagen del primer prisma de Wollaston situado en la primera posición, es posible reducir el coste de fabricación de prismas de Wollaston, dado que, si se utilizan dos de tales prismas en una realización, estos prismas ya no necesitan parearse. En este caso, un sistema óptico utilizado para formar en la segunda posición la imagen del prisma birrefringente situado en la primera posición compensa las diferencias entre los prismas ajustando el aumento de la imagen.

25 En una realización preferida, sólo se requiere un prisma de Wollaston que se reproduce como imagen sobre sí mismo, eliminando de este modo la necesidad de dos prismas de Wollaston. Esto reduce los costes de fabricación aún más, dado que sólo se requiere un prisma de Wollaston.

El término "plano de división virtual", tal como se utiliza aquí, se refiere a un plano dentro del prisma de Wollaston (o cualquier prisma birrefringente) en el cual parecen originarse las dos componentes polarizadas ortogonalmente o en el que parecen recombinarse las dos componentes polarizadas ortogonalmente.

30 En una realización, la etapa c) comprende formar la imagen del plano de división virtual del primer prisma de Wollaston sobre sí mismo. Esto garantiza que la imagen del plano de división virtual del primer prisma de Wollaston coincida consigo misma utilizando la óptica de relé. Además, la etapa d) comprende la utilización del primer prisma de Wollaston para recombinar las dos componentes polarizadas ortogonalmente.

35 En otra realización, la etapa c) comprende la formación de la imagen del primer prisma de Wollaston sobre un segundo prisma de Wollaston situado en la segunda posición, invirtiéndose el plano de división virtual en el segundo prisma de Wollaston. En esta realización, el segundo prisma de Wollaston está orientado y colocado de tal manera que su plano de división virtual coincida con la imagen del plano de división virtual del primer prisma de Wollaston. Además, la etapa d) comprende usar el segundo prisma de Wollaston situado en la segunda posición para recombinar las dos componentes polarizadas ortogonalmente. En esta realización, la etapa f) puede comprender la traslación de uno de los prismas de Wollaston primero y segundo en una dirección paralela a su respectivo plano de división virtual para modular la radiación polarizada.

40 Según otro aspecto de la presente invención, se proporciona un sistema de formación de imágenes hiperespectrales para la realización de una formación de imágenes hiperespectrales, comprendiendo el sistema:

un primer prisma de Wollaston situado en una primera posición para separar una radiación polarizada en dos componentes polarizadas ortogonalmente;

45 un sistema óptico para dirigir las dos componentes polarizadas ortogonalmente hacia una segunda posición y para formar la imagen del primer prisma de Wollaston en la segunda posición;

medios de recombinación para recombinar las dos componentes polarizadas ortogonalmente en una radiación polarizada recombinada en la segunda posición, incluyendo los medios de recombinación al menos un polarizador;

un detector de formación de imágenes que tiene un plano de formación de imágenes; y

50 una lente de formación de imágenes para enfocar la radiación polarizada recombinada sobre el plano de formación

de imágenes del detector de formación de imágenes;

caracterizado por que el sistema de formación de imágenes hiperespectrales comprende además unos medios de traslación para trasladar al menos el primer prisma de Wollaston en una dirección paralela a su plano de división virtual.

- 5 Al trasladar el primer prisma de Wollaston en una dirección paralela a su plano de división virtual, se reduce al menos sustancialmente la cizalladura lateral producido en las dos componentes polarizadas ortogonalmente por el primer prisma de Wollaston y, para al menos algunos ángulos de incidencia, la diferencia de longitud de trayectoria óptica es sustancialmente la misma para todos los puntos en el campo del objeto y se elimina sustancialmente la cizalladura lateral. Esto da como resultado un sistema de formación de imágenes hiperespectrales que es sustancialmente independiente del ángulo de incidencia y, por lo tanto, se simplifica mucho el procesamiento.

10 En una realización, la distancia entre las posiciones primera y segunda es cero y el sistema óptico incluye al menos una lente y un elemento de reflexión para reflejar la radiación de vuelta a través del sistema óptico de modo que el primer prisma de Wollaston reproduzca como imagen sobre sí mismo. El elemento de reflexión puede ser un espejo plano.

- 15 Usando al menos una lente y un espejo plano, se garantiza la colimación de los dos haces polarizados ortogonalmente. Además, se proporciona un plano de división virtual dentro del prisma de Wollaston, que puede ser reproducido como imagen sobre sí mismo, eliminando así la necesidad de más de un prisma de Wollaston.

- 20 Adicionalmente, se proporciona un divisor de haz para transmitir la radiación incidente al primer prisma de Wollaston y para reflejar la radiación hacia el detector de formación de imágenes. En una realización, el divisor de haz es un divisor de haz polarizante. En una realización alternativa, al menos un polarizador puede estar asociado con el divisor de haz para polarizar la radiación incidente.

En otra realización, un segundo prisma de Wollaston se encuentra situado en la segunda posición entre el sistema óptico y el detector de formación de imágenes, formando el sistema óptico la imagen del primer prisma de Wollaston sobre el segundo prisma de Wollaston.

- 25 Esto tiene la ventaja de que los dos prismas de Wollaston no necesitan adaptarse debido a la formación de imagen de un prisma de Wollaston sobre el otro.

- 30 Se apreciará que cuando se forma la imagen del primer prisma de Wollaston sobre el segundo prisma de Wollaston, uno u otro de los prismas de Wollaston se puede trasladar en una dirección paralela a su plano de división virtual. En una realización preferida, los medios de traslación están asociados con el segundo prisma de Wollaston. Sin embargo, esto dependerá de la disposición particular del sistema de formación imágenes hiperespectrales.

En esta realización, se proporcionan unos polarizadores primero y segundo que están asociados con los respectivos de los prismas de Wollaston primero y segundo.

#### **Breve descripción de los dibujos**

- 35 Para una mejor comprensión de la presente invención, se hará ahora referencia, a modo de ejemplo solamente, a los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 ilustra un interferómetro de polarización birrefringente convencional utilizado en sistemas de formación de imágenes por transformadas de Fourier;

La figura 2 ilustra la diferencia dependiente frente al campo en la longitud de trayectoria óptica de dos componentes de un rayo incidente producido por una disposición pareada de prismas de Wollaston;

- 40 La figura 3 ilustra una primera realización de un sistema de formación de imágenes según la presente invención;

La figura 4 es similar a la figura 3 e ilustra la ausencia de cizalladura en esta configuración;

La figura 5 ilustra una segunda realización de un sistema de formación de imágenes según la presente invención;

La figura 6 es similar a la figura 5, pero ilustra la situación para rayos principales o rayos incidentes coincidentes con el eje óptico;

- 45 La figura 7 es similar a la figura 5, pero ilustra la situación para rayos marginales o rayos incidentes que son paralelos al eje óptico, pero no coincidentes con éste;

La figura 8 es similar a la figura 5, pero ilustra la situación para rayos incidentes que están en ángulo con el eje óptico;

La figura 9 ilustra un prisma de Wollaston y un plano de división virtual; y

La figura 10 es similar a la figura 9, pero muestra el cálculo del ángulo del plano de división virtual.

**Descripción de la invención**

5 La presente invención se describirá con respecto a realizaciones particulares y con referencia a ciertos dibujos, pero la invención no se limita a ellos. Los dibujos descritos son solamente esquemáticos y no limitativos. En los dibujos, el tamaño de algunos de los elementos puede estar exagerado y no dibujado a escala con fines ilustrativos.

Se entenderá que los términos "vertical" y "horizontal" se utilizan en el presente documento para referirse a orientaciones particulares de las figuras y estos términos no son limitaciones a las realizaciones específicas descritas en el presente documento.

10 Además, para algunas de las figuras (en particular las figuras 5 a 8), en algunos de los ejes, aunque aparecen en el plano de la figura, existe, en realidad, un ángulo de 45° entre el plano de la figura y el eje óptico ilustrado.

15 La figura 1 ilustra un interferómetro de polarización birrefringente convencional 100 que puede formar parte de un formador de imágenes hiperespectrales por transformadas de Fourier como el que se describe en el artículo de Harvey y otros discutido anteriormente. El interferómetro 100 tiene un eje óptico 110 en el que un primer polarizador 120, unos prismas de Wollaston primero y segundo 130, 140, un segundo polarizador 150, una lente 160 de formación de imágenes y un detector 170 de formación de imágenes están dispuestos como se muestra. Los dos prismas de Wollaston 130, 140 tienen unos ángulos  $\theta$  de plano de división iguales y opuestos con ejes de polarización indicados por flechas y círculos, como se muestra.

20 La luz o radiación incidente procedente de una escena, indicada por el rayo de entrada 180, se polariza por el primer polarizador 120 en una luz polarizada linealmente a 45° con los ejes ópticos de los prismas de Wollaston 130, 140. La luz polarizada linealmente se resuelve por el primer prisma de Wollaston 130 en dos componentes iguales polarizadas ortogonalmente 185, 190 que tienen igual amplitud y que divergen ligeramente al salir del primer prisma de Wollaston 130. La transmisión a través del segundo prisma de Wollaston 140 refracta los dos componentes de manera que éstas se propagan colonialmente a través del segundo polarizador 150, como se indica por los rayos 185', 190', y se recombinan por la lente 160 de formación de imágenes en una ubicación común 195 en el detector 25 170 de formación de imágenes, dichas componentes en donde se interfieren. Estos rayos soportan una diferencia de trayectoria óptica se introdujo entre las componentes polarizadas ortogonalmente. Esta diferencia de trayectoria es uniforme a través de la anchura de la abertura y es modulada por la traslación del segundo prisma de Wollaston 140 con respecto al eje óptico 110 en las direcciones indicadas por la flecha "A", es decir, en una dirección perpendicular a la normal de la cara de entrada del prisma de Wollaston.

30 Como se muestra, el primer prisma de Wollaston 130 divide la radiación incidente en las componentes de polarización 185, 190 que divergen en dos direcciones diferentes. El segundo prisma de Wollaston 140 hace paralelas de nuevo a las dos componentes de polarización 185', 190'. Como se describió anteriormente, los dos prismas de Wollaston 130, 140 deben estar pareados y bien alineados.

35 Como los polarizadores primero y segundo 120, 150 dejan pasar la radiación de un tipo de polarización específica, éstos pueden ser utilizados para la transmisión o rechazo selectivo en una longitud de onda particular. Por simplicidad, comúnmente se considera solamente la luz incidente normalmente a la superficie de entrada del primer prisma de Wollaston 130.

40 La traslación del segundo prisma de Wollaston 140 en las direcciones indicadas por la flecha "A" introduce una diferencia de trayectoria variable en el tiempo entre las dos componentes 185', 190', lo que permite que se registre un interferograma en función del desplazamiento lateral del segundo prisma de Wollaston 140 con respecto al primer prisma de Wollaston 130.

La diferencia de longitud de trayectoria óptica producida por los dos prismas de Wollaston con ángulos de división iguales se puede aproximar como

$$\Delta_{OPL} = 2bh \tan\theta$$

45 en donde  $\Delta_{OPL}$  es la diferencia de longitud de trayectoria óptica para las dos polarizaciones ortogonales, b es la birrefringencia del material, h es el desplazamiento lateral del segundo prisma de Wollaston con respecto al primero y  $\theta$  es el ángulo de cuña del prisma.

50 La figura 2 ilustra un rayo de entrada 280 a los prismas de Wollaston 130, 140 de la figura 1. Después de pasar a través del primer prisma de Wollaston 130, el rayo 280 se divide en dos rayos polarizados ortogonalmente 285, 290. Después de pasar a través del segundo prisma de Wollaston 140, los rayos 285', 290' se hacen paralelos, pero están separados por una distancia de cizalladura, d. Para rayos que se propagan fuera del eje, esta cizalladura produce una diferencia de longitud de trayectoria óptica,  $\Delta_{OPL}$ , como se muestra. La distancia de cizalladura, d, se puede calcular a partir de las propiedades de los prismas de Wollaston, es decir, el espesor de cada prisma, los índices de refracción de los materiales de los que están hechos, sus ángulos de cuña y la separación de los dos 55 prismas de Wollaston a lo largo del eje óptico (no mostrado en la figura 2) del sistema de formación de imágenes.

Se apreciará que a medida que aumenta la distancia entre los dos prismas de Wollaston 130, 140 a lo largo del eje óptico, la cizalladura lateral entre los dos rayos polarizados 285', 290' también aumenta, y esta cizalladura lateral induce la diferencia de longitud de trayectoria óptica, que depende del campo y es nula para los rayos que se propagan sobre el eje. Para sistemas en los que está presente una cizalladura significativa y que tienen un campo significativo de visión de las emisiones de espectro similares, la escena tomada como imagen está llena de franjas.

Si se posiciona el segundo prisma de Wollaston 140 de tal manera que  $\Delta_{OPL}$  sea 0 para el punto de campo central, entonces los puntos de campo extremos en la dirección de la cizalladura tienen una diferencia de longitud de trayectoria óptica residual,  $\Delta_{OPLRESIDUAL}$ , que es de signo opuesto. La adquisición de interferogramas para el campo completo utilizando una interferometría simétrica respecto de un  $\Delta_{OPL}$  igual a cero, necesita que se adquieran varias imágenes adicionales para compensar el doble de la  $\Delta_{OPLRESIDUAL}$ . Esto conduce a un tiempo de adquisición adicional innecesario.

Como se describió anteriormente, la relación  $\Delta_{OPL} = 2bh \tan\theta$  sólo es válida en el caso de incidencia normal, y, para otros puntos de campo, debe considerarse la diferencia de longitud de trayectoria óptica adicional relacionada con la cizalladura. Para sistemas de formación de imágenes en los que el campo de visión no está restringido a un único punto, los rayos principales de los varios puntos de campo serán incidentes sobre el primer prisma de Wollaston 130 con diferentes ángulos de incidencia y, por lo tanto, la diferencia de longitud de trayectoria óptica también cambiará según el ángulo de incidencia. Esto significa que la diferencia de longitud de trayectoria óptica es también dependiente del ángulo de incidencia. Cuando el segundo prisma de Wollaston 140 se traslada en las direcciones indicadas por la flecha "A" en la figura 1, la diferencia de longitud de trayectoria óptica también se verá afectada. La recuperación del espectro para los diferentes puntos de campo debe entonces tener en cuenta la dependencia frente al campo de la diferencia de longitud de trayectoria óptica con traslación del segundo prisma de Wollaston 140. Para mediciones espectrales precisas, no es, por tanto, posible aplicar el mismo procesamiento de señal a todos los puntos de campo, lo que da como resultado un procesamiento más complejo.

Según la presente invención, se utilizan componentes birrefringentes para la formación de imágenes hiperespectrales en un nuevo sistema interferométrico de formación de imágenes que resuelve las limitaciones del sistema de formación de imágenes descrito en el artículo de Harvey y otros. En el nuevo sistema interferométrico de formación de imágenes, se supone que el objeto está en el infinito, y si el objeto no está en el infinito, se utiliza una óptica para ponerlo en el infinito. En este caso, son paralelos todos los rayos procedentes de un único punto del objeto que entran en el sistema interferométrico de formación de imágenes.

La presente invención se describe a continuación con referencia a la utilización de prismas de Wollaston. Se comprenderá fácilmente que pueden usarse otros prismas birrefringentes cuando sea apropiado.

Las figuras 3 y 4 ilustran una primera realización de la presente invención en la que un prisma de Wollaston es reproducido como imagen sobre un segundo prisma de Wollaston. En esta realización específica, no se muestran polarizadores, pero éstos son necesarios para el funcionamiento del sistema óptico. Haciendo referencia inicialmente a la figura 3, se muestra un sistema 300 de formación de imágenes que comprende un primer prisma de Wollaston 310, un sistema óptico 320 que comprende unas lentes primera y segunda 330, 340, un segundo prisma de Wollaston 350, una lente 360 de formación de imágenes y un sistema detector 370 dispuesto en un eje óptico 380. Unos polarizadores primero y segundo (no mostrados por motivos de claridad) también se disponen delante del primer prisma de Wollaston 310 y después del segundo prisma de Wollaston 350 de una manera similar a la descrita anteriormente con referencia a la figura 1. En este caso, el segundo prisma de Wollaston 350 es una imagen especular del primer prisma de Wollaston 310, ya que el plano de división está efectivamente invertido.

La figura 4 ilustra el comportamiento de dos rayos 400, 450 de ejemplo procedentes de un punto del objeto sobre el eje. El primer rayo 400 es el rayo principal procedente de un punto del objeto sobre el eje y está alineado con el eje óptico 380 del sistema 300 de formación de imágenes. El rayo 400 es incidente sobre el primer prisma de Wollaston 310 y se divide en dos rayos componentes 410, 420 que tienen polarizaciones ortogonales. Los rayos componentes 410, 420 atraviesan el sistema óptico 320 y se reproducen como imagen sobre el segundo prisma de Wollaston 350. El segundo prisma de Wollaston 350 recombina los dos rayos componentes 410, 420 para formar un rayo de salida 430 que es detectado por el sistema detector 370. Como se muestra, los rayos componentes 410, 420 son paralelos entre ellos a medida que atraviesan el sistema óptico 320.

El segundo rayo 450 es paralelo al primer rayo 400, pero está separado del eje óptico 380 como se muestra. De una manera similar al primer rayo 400, el primer prisma de Wollaston 310 divide el segundo rayo 450 en dos rayos componentes 460, 470 que tienen polarizaciones ortogonales. Los rayos componentes 460, 470 atraviesan el sistema óptico 320 y se reproducen como imagen sobre el segundo prisma de Wollaston 350. El segundo prisma de Wollaston 350 recombina los dos rayos componentes 460, 470 para formar un rayo de salida 480 que es detectado por el sistema detector 370. Como se muestra, los rayos componentes 460, 470 son paralelos entre ellos a medida que atraviesan el sistema óptico 320, aunque están en ángulo con respecto al eje óptico 380 del sistema 300 de formación de imágenes. Ambos rayos ilustrativos 400, 450 se superponen en el plano de imagen del sistema detector 370.

En esta realización, el sistema óptico 320 (que incluye las lentes 330, 340) se utiliza para formar la imagen del

prisma de Wollaston 310 sobre un segundo prisma de Wollaston 350. En este caso, la cizalladura puede cancelarse para este punto de campo sobre el eje. Esto se realiza en la práctica ajustando la posición longitudinal de los prismas de Wollaston 310, 350. Para otros puntos de campo en los que los rayos incidentes no son paralelos al eje óptico 380 del sistema 300 de formación de imágenes, la cizalladura es también mínima, aunque en la práctica aparece alguna cizalladura residual debido a una desviación en el material birrefringente.

Por tanto, las ventajas de esta configuración son dobles, es decir, la cizalladura lateral se cancela efectivamente y la diferencia de longitud de la trayectoria óptica relacionada dependiente del campo también se cancela y no hay necesidad de producir prismas de Wollaston que estén pareados con exactitud. Si los dos prismas de Wollaston tienen diferencias en los ángulos de división, interviniendo el aumento del sistema óptico 320 que forma la imagen de un prisma de Wollaston sobre otro prisma de Wollaston, es posible compensar esta inexactitud en la fabricación de los prismas de Wollaston. Esto se realiza fácilmente en la práctica ajustando la posición longitudinal de los dos prismas de Wollaston, es decir, la distancia entre los dos prismas de Wollaston a largo del eje óptico 380 del sistema 300 de formación de imágenes.

En esta realización, la traslación lateral de uno cualquiera de los dos prismas de Wollaston 310, 350 cambiará la diferencia de longitud de trayectoria óptica,  $\Delta_{OPL}$ , como se describió anteriormente con referencia a la figura 1. Esto es debido a la formación de la imagen de un prisma de Wollaston sobre el otro, y el prisma de Wollaston que se traslada lateralmente se considera que es el "segundo" prisma de Wollaston cuando se le compara con los sistemas de formación de imágenes de la técnica anterior. Sin embargo, si esta traslación del "segundo" prisma de Wollaston elegido se produce perpendicularmente al eje óptico 380 del sistema 300 de formación de imágenes, la traslación creará a continuación un poco de cizalladura y, por lo tanto, inevitablemente, cierta diferencia asociada de longitud de trayectoria óptica dependiente del campo. La reintroducción de cierta cizalladura es así perjudicial para la calibración, dado que la relación entre la  $\Delta_{OPL}$  efectiva y la traslación es diferente para cada punto del campo. Si el prisma de Wollaston se traslada en paralelo a su plano de división virtual, este problema se reduce significativamente, ya que, en este caso, la traslación del "segundo" prisma de Wollaston no crea ninguna cizalladura después de la recombinación de rayos en una primera aproximación. Como se muestra en la figura 4, las direcciones de movimiento del "segundo" prisma de Wollaston se indican por la flecha "B" para el prisma de Wollaston 310 y por la flecha "C" para el prisma de Wollaston 350, es decir, en una dirección paralela a los respectivos planos de división virtuales. El plano de división virtual se describe con más detalle a continuación con referencia a la figura 9.

Se ilustra en la figura 5 otra realización de un sistema 500 de formación de imágenes según la presente invención. El sistema 500 de formación de imágenes comprende un divisor de haz polarizante 510, un único prisma de Wollaston 520, un sistema óptico 530 y un espejo plano 540 dispuesto sobre un eje óptico 550 del sistema 500 de formación de imágenes. Además, se proporciona un detector 560 de formación de imágenes que puede ser una cámara u otro dispositivo de formación de imágenes adecuado. Una lente 570 de formación de imágenes está situada entre el divisor de haz polarizante 510 y el detector 560 de formación de imágenes para enfocar el haz de salida (no mostrado) sobre el detector 560 de formación de imágenes, como se describirá con más detalle a continuación con referencia a las figuras 6 a 8.

Aquí, la disposición es preferiblemente tal que, si z es el eje óptico, y si su dirección ortogonal en el plano del papel es x, la tercera dirección ortogonal y es perpendicular al plano del papel, entonces el divisor de haz 510 está orientado preferiblemente de tal manera que el eje óptico 580 después de la reflexión sea perpendicular al eje óptico 550 y esté orientado en 45° respecto de ambos ejes x e y.

Como se muestra, el espejo plano 540 permite que el prisma de Wollaston 520 se reproduzca como imagen sobre sí mismo. La posición longitudinal del espejo plano 540 a lo largo del eje óptico 550 se puede ajustar en profundidad para asegurar que un haz de entrada colimado salga también del sistema 500 de formación de imágenes como un haz de salida colimado.

Será fácil de apreciar que el espejo plano 540 puede comprender cualquier elemento de reflexión adecuado que, en combinación con un sistema óptico adecuado (una o más lentes, por ejemplo), permita que el prisma de Wollaston se reproduzca como imagen de sí mismo. Por ejemplo, el elemento de reflexión puede comprender un espejo cóncavo y el sistema óptico comprende una combinación adecuada de lentes.

El divisor de haz polarizante 510 está orientado con un ángulo de 45° con respecto al eje óptico 550 de tal manera que los rayos transmitidos desde una fuente de radiación puntual entran en el prisma de Wollaston 520 con una polarización lineal predeterminada. A este respecto, el divisor de haz polarizante 510 reemplaza al polarizador 120 en la figura 1 y al polarizador (no mostrado) de la figura 3. La polarización lineal predeterminada es de 45° con respecto al eje óptico del prisma de Wollaston 520, es decir, a 45° respecto de ambos ejes x e y.

En esta realización, el prisma de Wollaston 520 se traslada en las direcciones indicadas por la flecha "D" con respecto al eje óptico 550 del sistema 500 de formación de imágenes, es decir, en una dirección paralela a su plano de división virtual.

El divisor de haz polarizante 510 también sirve para reflejar la radiación que vuelve a través del sistema 500 de

formación de imágenes hacia el detector 560 de formación de imágenes como se describirá con más detalle a continuación con referencia a las figuras 6 a 8.

5 Como alternativa a un divisor de haz polarizante 510, puede usarse un divisor de haz no polarizante en combinación con un polarizador del tipo descrito anteriormente con referencia a la figura 1. Cuando el sistema 500 de formación de imágenes efectivamente forma la imagen del prisma de Wollaston 520 sobre sí mismo, sólo se requiere un polarizador. Como antes, el objeto se supone que está en el infinito.

La posición longitudinal del espejo a lo largo del eje óptico 550 del sistema 500 de formación de imágenes se puede ajustar para asegurar que el haz de entrada colimado salga también del sistema de formación de imágenes como un haz de salida colimado.

10 Las figuras 6 a 8 ilustran los comportamientos de tres rayos de ejemplo a través del sistema 500 de formación de imágenes. En la figura 6 se muestra un rayo 600 procedente de un punto del objeto sobre el eje. El rayo 600 se transmite por el divisor de haz polarizante 510 hacia el prisma de Wollaston 520 en donde se divide en dos rayos componentes polarizados ortogonalmente 610, 620 que son ligeramente divergentes. El sistema óptico 530 se coloca de modo que el prisma de Wollaston 520 esté en su punto focal para que los rayos componentes 610, 620 sean normalmente incidentes sobre el espejo plano 540 y se reflejen de vuelta a lo largo de la misma trayectoria, indicándose los rayos reflejados como 610' y 620', respectivamente. En el prisma de Wollaston 520, los dos rayos componentes reflejados 610', 620' son recombinados como un rayo de salida 600' que luego se refleja en el divisor de haz polarizante 510 hacia la lente 570 de formación de imágenes para formar su imagen sobre un plano focal del detector 560 de formación de imágenes. En este caso, como el rayo 600 está alineado con el eje óptico 550 del sistema 500 de formación de imágenes, dicho rayo pasa sin ser desviado a través de la lente 570 de formación de imágenes.

25 Aquí, la distancia entre el prisma de Wollaston 520 y su imagen (el "segundo" prisma de Wollaston) se reduce a 0 y, por lo tanto, existe una muy pequeña dependencia con respecto al campo. En la práctica, la desviación inducida por la birrefringencia que crea cizalladura no se compensa completamente y se mantiene una diferencia residual de longitud de trayectoria óptica inducida por cizalladura, dependiente del campo. Sin embargo, esta diferencia de longitud de trayectoria óptica es considerablemente menor que la inducida por la separación longitudinal entre los dos prismas de Wollaston 130, 140 mostrados en la figura 1.

30 Al tener una configuración de formación de imágenes con un aumento uno a uno, el ángulo de división producido por el prisma de Wollaston en una dirección se compensa perfectamente por la segunda pasada en la otra dirección. La ventaja económica de esto es doble ya que se requiere sólo un prisma de Wollaston en lugar de dos y no hay necesidad de tener un control muy preciso de los ángulos de Wollaston durante la fabricación, dado que no es necesario formar un pareado.

35 En la figura 7 se muestra un rayo 700 procedente del mismo objeto que el mostrado en la figura 6, pero que es paralelo al eje óptico 550 del sistema 500 de formación de imágenes. El rayo 700 es transmitido por el divisor de haz polarizante 510 hacia el prisma de Wollaston 520, en el que se divide en dos rayos componentes polarizados ortogonalmente 710, 720 que son ligeramente divergentes. En este caso, el sistema óptico 530 refracta los rayos componentes 710, 720 y los dirige hacia el espejo plano 540. De nuevo, los rayos componentes reflejados 710', 720' son dirigidos por el sistema óptico 530 de vuelta al prisma de Wollaston 520, en el que se recombinan como un rayo de salida 700'. Como antes, el rayo de salida 700' se refleja entonces en el divisor de haz polarizante 510 hacia la lente 570 de formación de imágenes para formar su imagen sobre un plano focal del detector 560 de formación de imágenes.

45 En la figura 8 se muestra un rayo 800 procedente de un objeto fuera del eje. El rayo 800 es transmitido por el divisor de haz polarizante 510 hacia el prisma de Wollaston 520, en el que se divide en dos rayos componentes polarizados ortogonalmente 810, 820 que son ligeramente divergentes. En este caso, el sistema óptico 530 refracta los rayos componentes 810, 820 y los dirige hacia el espejo plano 540. Una vez más, los rayos componentes reflejados 810', 820' son dirigidos por el sistema óptico 530 de vuelta al prisma de Wollaston 520, en el que se recombinan como un rayo de salida 800'. Como antes, el rayo de salida 800' se refleja entonces en el divisor de haz polarizante 510 hacia la lente 570 de formación de imágenes para formar su imagen sobre un plano focal del detector 560 de formación de imágenes. Para ángulos de campo pequeños, la cizalladura lateral es muy pequeña y la diferencia de longitud de trayectoria óptica dependiente del campo también es muy limitada.

50 El aumento de uno a uno proporcionada por el sistema de formación de imágenes mostrado en la figura 5 proporciona una ventaja adicional que no se pueden obtener con los sistemas de formación de imágenes convencionales, como se describe con referencia a la figura 1. En los sistemas de formación de imágenes convencionales, la traslación del "segundo" prisma de Wollaston es en una dirección perpendicular a la normal de la cara de entrada del prisma de Wollaston y el único desplazamiento lateral,  $h$ , se determina para un ángulo incidente que es normal a la cara de entrada, como se describió anteriormente.

Se apreciará fácilmente que la recombinación de las dos componentes polarizadas ortogonalmente es efectivamente una operación inversa a la de la división de la radiación polarizada en las dos componentes polarizadas

ortogonalmente. Durante la división, un haz polarizado que tiene intensidades de componente de polarización iguales en las direcciones ordinaria y extraordinaria del prisma de Wollaston se divide en dos componentes, como es bien sabido. Cada componente emerge del prisma de Wollaston en una dirección diferente y con una polarización lineal que es ortogonal a la polarización lineal de la otra componente, teniendo las dos componentes unas intensidades iguales. Durante la recombinación, las dos componentes lineales polarizadas ortogonalmente se desvían por el mismo prisma de Wollaston (como se describió anteriormente con referencia a las figuras 5 a 8) o por un segundo prisma de Wollaston (como se describió anteriormente con referencia a las figuras 3 y 4) para hacerlos colineales después de salir del prisma de Wollaston relevante. La recombinación en este caso pretende significar que se hace que la radiación polarizada que sale del prisma de Wollaston sea colineal, esté coalineada o sea paralela. Se proporciona al menos un polarizador para proyectar la radiación polarizada recombinada en un solo estado de polarización, dado que la radiación polarizada ortogonalmente recombinada conserva los dos estados de polarización ortogonal de las dos componentes polarizadas ortogonalmente.

Como se describió anteriormente, la traslación del único prisma de Wollaston (figuras 5 a 8) o el segundo prisma de Wollaston (figuras 3 y 4) en una dirección paralela a su plano de división virtual modula la intensidad de la radiación polarizada recombinada. La intensidad modulada es muestreada para que corresponda a la diferencia de longitud de trayectoria óptica,  $\Delta_{OPL}$ , desde  $-\Delta_{OPLMAX}$  hasta  $+\Delta_{OPLMAX}$  o desde 0 hasta  $\pm\Delta_{OPLMAX}$ .

Haciendo referencia ahora a la figura 9, se describirá un plano de división virtual en un prisma de Wollaston. En la figura 9 se muestra un prisma de Wollaston 900 que tiene una cara de entrada 910 y la cara de salida 920 con un ángulo de división  $\theta$ . El prisma 900 comprende dos materiales birrefringentes 930, 940 que están alineados a lo largo de un plano de división 950 relacionado el ángulo de división o de cuña  $\theta$ . El prisma también tiene un eje óptico 960, como se muestra. Los rayos que entran en el prisma 900 a lo largo de la normal a la cara de entrada 910 experimentan una doble refracción. Se muestra en la figura 9 un rayo 970 a modo de ejemplo. La primera refracción es se deriva de la diferencia de índice de refracción debida a la orientación ortogonal de los ejes ópticos de los materiales birrefringentes 930, 940 que constituyen el prisma de Wollaston 900, y la segunda refracción se produce en la cara de salida 920 del prisma de Wollaston 900 debido a una incidencia fuera de la normal como resultado de la primera refracción.

Como se muestra en la figura 9, la primera refracción del rayo 970 produce dos rayos componentes 970a, 970b que tienen polarizaciones ortogonales, divergiendo ligeramente los rayos componentes 970a, 970b, como se muestra. La segunda refracción se produce cuando los dos rayos componentes divergentes 970a, 970b pasan fuera de la cara de salida del prisma 900, como se muestra por los rayos componentes 970a', 970b'. Los rayos componentes refractados 970a', 970b' parecen originarse en un punto 980a sobre un plano de división virtual 980, como se muestra en la figura 9. Como se muestra, el ángulo del plano de división virtual 980 no se corresponde con el ángulo físico de cuña o de división,  $\theta$ , del prisma de Wollaston 900. En un sistema de formación imágenes con aumento lateral de uno a uno, el aumento longitudinal también es uno. Como resultado, el plano de división virtual 980 puede reproducirse como imagen sobre sí mismo sin deformación. La traslación del prisma 900 en la dirección a lo largo de su plano de división virtual asegura que los dos rayos componentes 970a, 970b derivados del rayo original 970 en incidencia normal con respecto a la cara de entrada 910 no tengan cizalladura entre los rayos componentes de polarización cuando el prisma 900 se traslada en la dirección de la flecha "D", como se muestra en las figuras 5 a 8. En este caso, la diferencia de longitud de trayectoria óptica,  $\Delta_{OPL}$ , se puede expresar como:

$$\Delta_{OPL} = 4bh \tan\theta$$

Como no se crea cizalladura durante la traslación, la dependencia de la diferencia de longitud de trayectoria óptica,  $\Delta_{OPL}$ , durante la traslación del prisma de Wollaston es la misma para todos los puntos del campo.

Del mismo modo, para los rayos componentes reflejados 990a', 990b', hay dos refracciones cuando estos rayos entran en la cara de salida 920, es decir, en la cara de salida 920 y en la interfaz 950 entre los dos materiales birrefringentes 930, 940. Como describió anteriormente, los dos rayos componentes 990a, 990b se recombinan en el prisma de Wollaston 900 para formar el rayo de salida reflejado 990. Aquí, los rayos componentes reflejados 990a', 990b' parecen converger en un punto 980b en el plano de división virtual 980 antes de converger en la interfaz 950.

Haciendo referencia ahora a la figura 10, el prisma 1000 se muestra teniendo una cara de entrada 1010 y una cara de salida 1020. El prisma 1000 tiene dos materiales birrefringentes 1030, 1040 con una interfaz 1050 entre los dos materiales birrefringentes 1030, 1040. El prisma 1000 se muestra en el eje óptico 1060 de un sistema de formación de imágenes (no mostrado). Un rayo 1070 de ejemplo incidente sobre la cara de entrada 1010 se divide en unos rayos componente 1070a, 1070b teniendo un ángulo,  $\theta_1$ , entre ellos debido a la refracción en la interfaz 1050. Después la refracción en la cara de salida 1020, los rayos componentes refractados 1070a', 1070b' parecen divergir desde un punto 1080a en un plano de división virtual 1080 bajo un ángulo,  $\theta_2$ , hacia el sistema óptico 1090. La ecuación del ángulo del plano de división virtual se puede definir como:

$$x = \frac{y \tan \theta \tan \theta_1}{\tan \theta_2}$$

5 en donde  $z$  es la coordenada longitudinal a lo largo del óptico eje del sistema de formación de imágenes y  $x$  es la coordenada lateral en el plano de la figura 10, que es perpendicular a  $z$ . También se muestra en la figura 10 el espesor,  $L$ , del prisma 1000 y la distancia focal,  $f$ , del sistema óptico 1090. El sistema óptico 1090 está alineado con el prisma de Wollaston 1000 de modo que el punto focal del mismo esté alineado con el punto 1080a en el plano de división virtual 1080.

Aunque la presente invención se ha descrito con referencia a realizaciones específicas, se apreciará que también son posibles otras realizaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un método de realización de una formación de imágenes hiperespectrales, comprendiendo el método las etapas de:

- 5 a) recibir una radiación polarizada (400, 450; 600; 700; 800) en un primer prisma de Wollaston (310; 520) situado en una primera posición;
- b) separar la radiación polarizada (400, 450; 600; 700; 800) en dos componentes polarizadas ortogonalmente (410, 420; 610, 620; 710, 720; 810, 820) utilizando el primer prisma de Wollaston (310; 520);
- 10 c) dirigir las dos componentes polarizadas ortogonalmente (410, 420; 610, 620; 710, 720; 810, 820) hacia una segunda posición utilizando una óptica de relé, formándose en la segunda posición la imagen del primer prisma de Wollaston (310; 520) situado en la primera posición;
- d) recombinar las dos componentes polarizadas ortogonalmente (410, 420; 610, 620; 710, 720; 810, 820) en una radiación polarizada recombinada (480; 600'; 700'; 800') en la segunda posición;
- e) proyectar la radiación polarizada recombinada (480; 600'; 700'; 800') en un solo estado de polarización usando al menos un polarizador; y
- 15 f) modular la radiación polarizada recombinada (480; 600'; 700'; 800') para que interfiera en el plano (370; 560) de formación de imágenes;

**caracterizado** por que la etapa f) comprende trasladar el primer prisma de Wollaston (310; 520) en una dirección paralela a su plano de división virtual para modular la radiación polarizada recombinada (480; 600'; 700'; 800').

20 2. Un método según la reivindicación 1, en el que la etapa c) comprende formar la imagen del plano de división virtual del primer prisma de Wollaston (520) sobre sí mismo.

3. Un método según la reivindicación 2, en el que la etapa d) comprende la utilización del primer prisma de Wollaston (520) para recombinar las dos componentes polarizadas ortogonalmente (610, 620; 710, 720; 810, 820).

25 4. Un método según la reivindicación 1, en el que la etapa c) comprende formar la imagen del primer prisma de Wollaston (310) sobre un segundo prisma de Wollaston (350) situado en la segunda posición, invirtiéndose el plano de división virtual en el segundo prisma de Wollaston (350).

5. Un método según la reivindicación 4, en el que la etapa d) comprende la utilización del segundo prisma de Wollaston (350) para recombinar las dos componentes polarizadas ortogonalmente (410, 420).

30 6. Un método según la reivindicación 4 o 5, en el que la etapa f) comprende la traslación de uno de los prismas de Wollaston primero y segundo (310, 350) en una dirección paralela a su respectivo plano de división virtual para modular la radiación polarizada.

7. Un sistema (300; 500) de formación de imágenes hiperespectrales para realizar una formación de imágenes hiperespectrales, comprendiendo el sistema:

35 un primer prisma de Wollaston (310, 350; 520) situado en una primera posición para separar una radiación polarizada (400, 450; 600; 700; 800) en dos componentes polarizadas ortogonalmente (410, 420; 610, 620; 710, 720; 810, 820);

un sistema óptico (320, 330, 340; 530, 540) para dirigir las dos componentes polarizadas ortogonalmente (410, 420; 610, 620; 710, 720; 810, 820) hacia una segunda posición y para formar la imagen del primer prisma de Wollaston (310) en la segunda posición;

40 unos medios de recombinación (350; 520) para recombinar las dos componentes polarizadas ortogonalmente (410, 420; 610, 620; 710, 720; 810, 820) en una radiación polarizada recombinada (480; 600'; 700'; 800') en la segunda posición, incluyendo los medios de recombinación al menos un polarizador (510);

un detector (370; 560) de formación de imágenes que tiene un plano de formación de imágenes; y

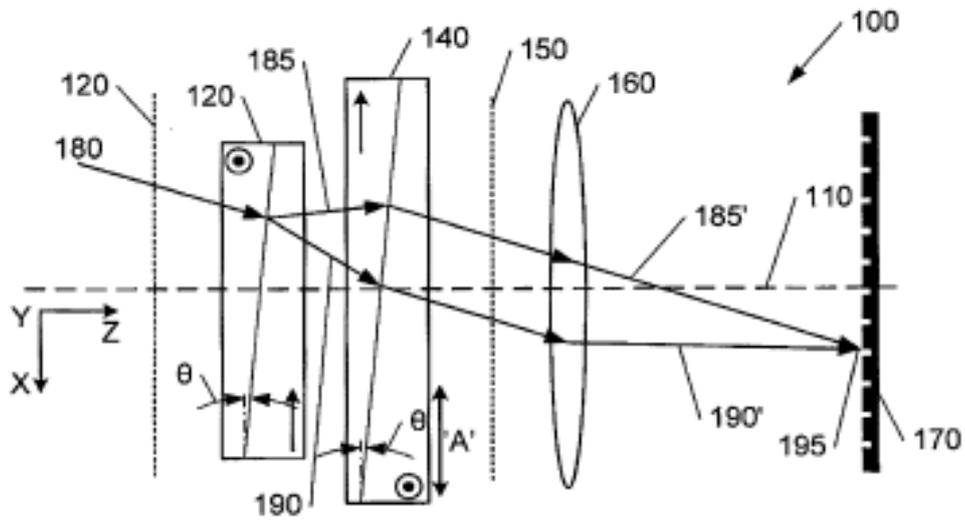
una lente (360; 570) de formación de imágenes para enfocar la radiación polarizada recombinada (480; 600'; 700'; 800') en el plano de formación de imágenes del detector (370; 560) de formación de imágenes;

45 **caracterizado** por que el sistema de formación de imágenes hiperespectrales comprende además unos medios de traslación para trasladar al menos el primer prisma de Wollaston (310; 520) en una dirección paralela a su plano de división virtual.

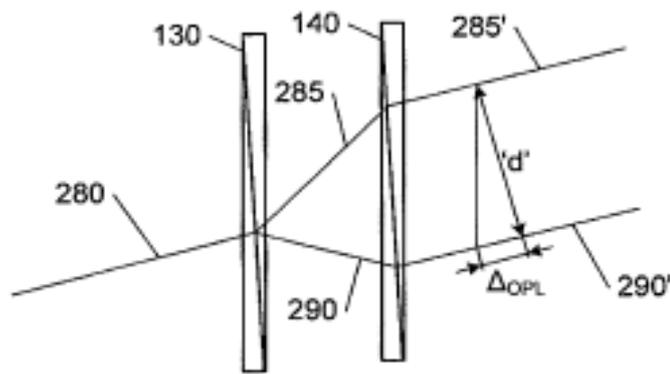
8. Un sistema de formación de imágenes hiperespectrales según la reivindicación 7, en el que la distancia entre las posiciones primera y segunda es cero y el sistema óptico (530) incluye al menos una lente (530) y un elemento de

reflexión (540) para reflejar de vuelta la radiación a través del sistema óptico (530) de modo que el primer prisma de Wollaston (520) sea reproducido como imagen sobre sí mismo.

9. Un sistema de formación de imágenes hiperespectrales según la reivindicación 8, en el que el elemento de reflexión (540) comprende un espejo plano.
- 5 10. Un sistema de formación de imágenes hiperespectrales según la reivindicación 8 o 9, que comprende además un divisor de haz (510) para transmitir la radiación incidente al primer prisma de Wollaston (520) y para reflejar la radiación hacia el detector (560) de formación de imágenes.
11. Un sistema de formación de imágenes hiperespectrales según la reivindicación 10, en el que el divisor de haz (510) es un divisor de haz polarizante.
- 10 12. Un sistema de formación de imágenes hiperespectrales según la reivindicación 10, que comprende además al menos un polarizador asociado con el divisor de haz (510) para polarizar la radiación incidente (600; 700; 800).
13. Un sistema de formación de imágenes hiperespectrales según la reivindicación 7, que comprende además un segundo prisma de Wollaston (350) situado en la segunda posición entre el sistema óptico (320, 330, 340) y el detector (370) de formación de imágenes, formando el sistema óptico (320, 330, 340) la imagen del primer prisma de Wollaston (310) sobre el segundo prisma de Wollaston (350).
- 15 14. Un sistema de formación de imágenes hiperespectrales según la reivindicación 13, en el que los medios de traslación están asociados con uno de los prismas de Wollaston primero y segundo (310, 350).
15. Un sistema de formación de imágenes hiperespectrales según la reivindicación 13 o 14, que además comprende unos polarizadores primero y segundo asociados con unos prismas respectivos de entre los prismas de Wollaston primero y segundo (310, 350).
- 20



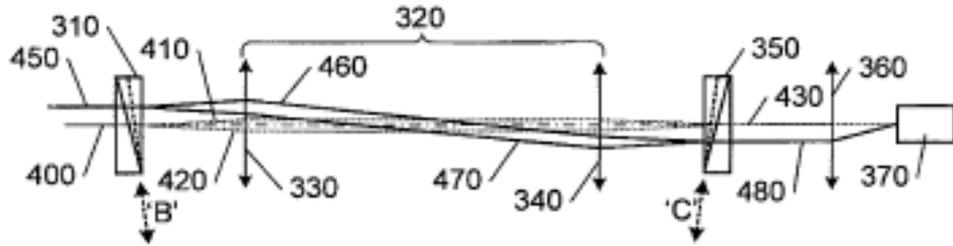
**Fig. 1**



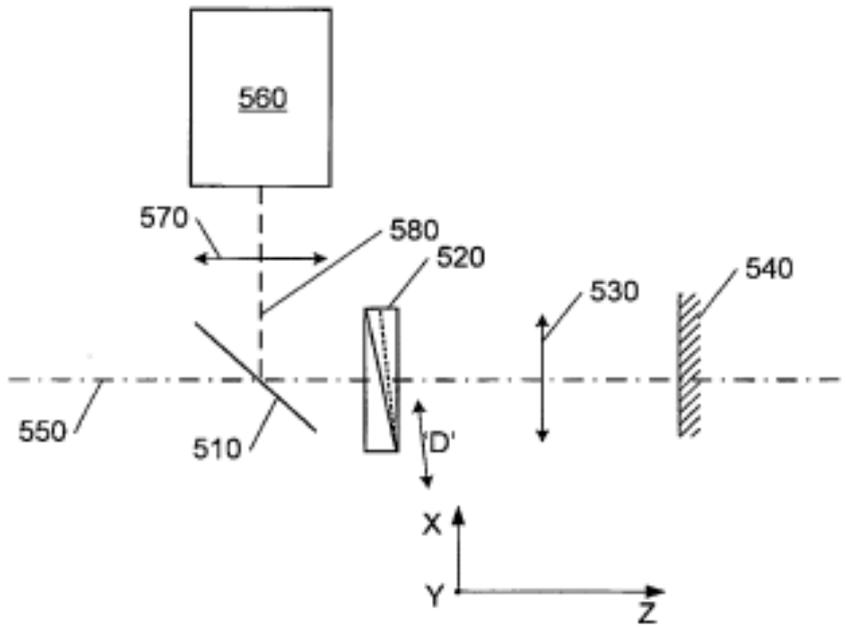
**Fig. 2**



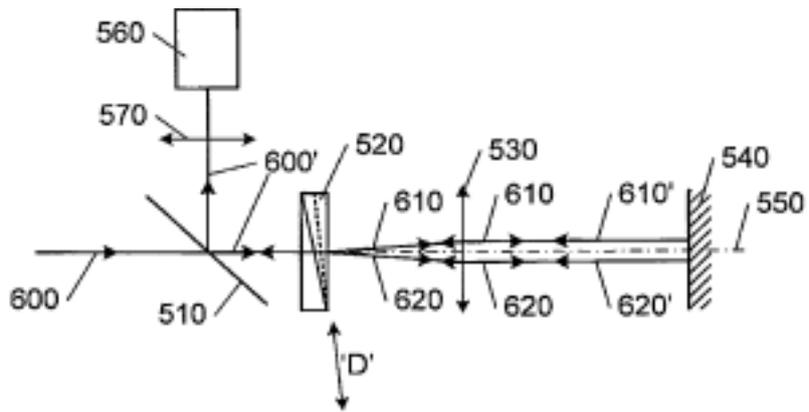
**Fig. 3**



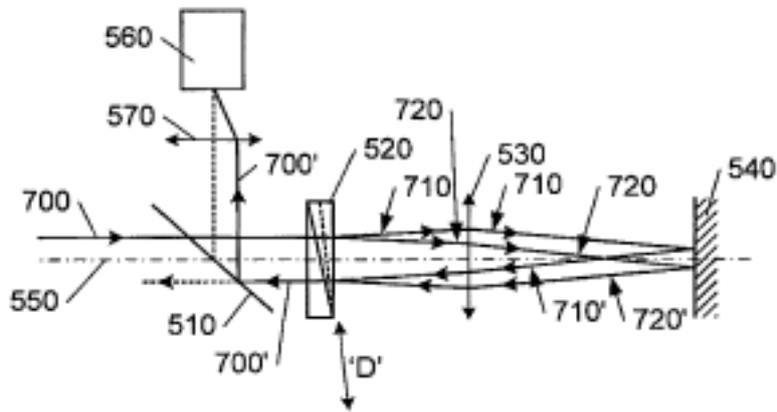
**Fig. 4**



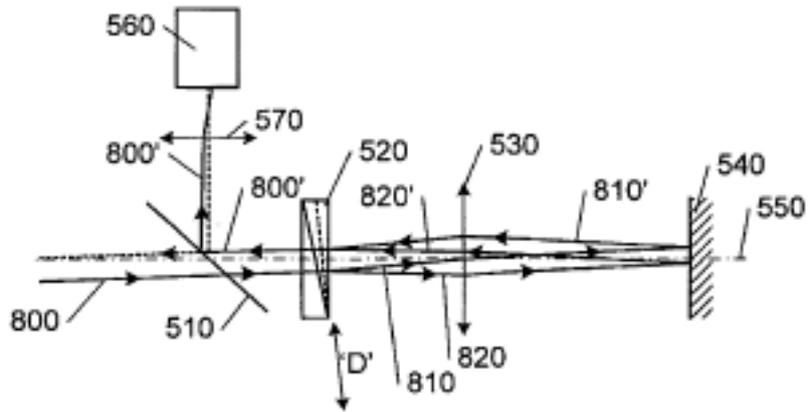
**Fig. 5**



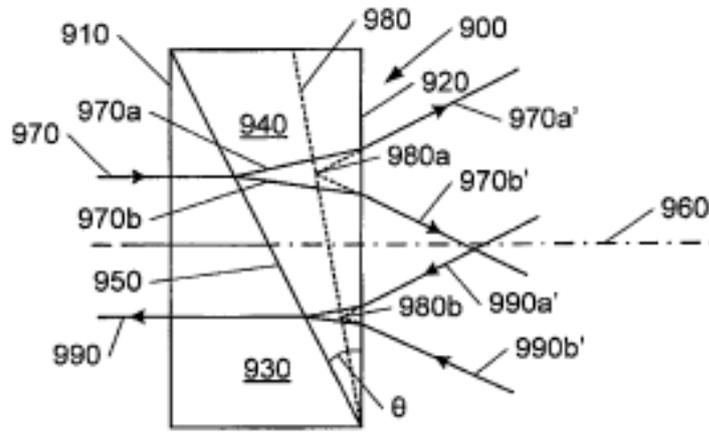
**Fig. 6**



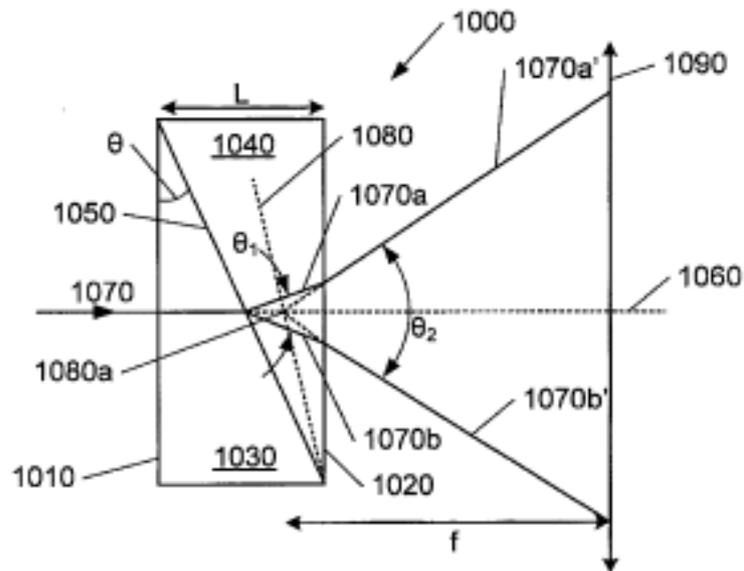
**Fig. 7**



**Fig. 8**



**Fig. 9**



**Fig. 10**