

DISPOSITIVO DISPERSOR DE LUZ VISIBLE DE ALTA RESOLUCIÓN ESPECTRAL

Campo de la invención

5

La presente invención se relaciona con espectrógrafos de alta resolución, particularmente se relaciona con espectrógrafos que usan redes de difracción Echelle y prismas en equipos de mediana y pequeña escala.

10 Descripción del estado de la técnica

El estado de la técnica divulga espectrómetros con redes Echelle y prismas en los documentos US 5,719,672 y US 6,628,383.

15 El documento US 5,719,672 divulga un espectrómetro de Echelle que comprende una rendija de entrada una red de difracción tipo Echelle, una rendija de salida y un arreglo de detectores. La rendija de salida tiene una forma que corrige la distorsión óptica causada por la geometría de la red de difracción Echelle. El documento indica que los detectores pueden ser arreglos lineales de fotodiodos, dispositivos ICCD (Dispositivo de carga acoplada
20 intensificada, por sus siglas en inglés), sensores de píxeles activos, sensores CMOS (semiconductor complementario de óxido metálico, por sus siglas en inglés) o CCD (Dispositivo de carga acoplada, por sus siglas en inglés).

También, dicho documento divulga una fuente de luz, cuya radiación incide sobre la rendija
25 de entrada seleccionando una porción de radiación adecuada al tamaño o área útil del primer espejo colimador. La luz colimada incide sobre el prisma (sin separación espectral) y luego sobre la red Echelle quien redirige el espectro hacia el prisma nuevamente, aclarando que el prisma y la red están dispuestos en forma cruzada.

30 Además, dicho documento indica que la radiación doblemente separada espectralmente incide sobre un segundo espejo colimador, el cual corrige los efectos de divergencia de la luz, y define con ayuda de la rendija de salida, una región adecuada según el área sensible del detector. El detector convierte las intensidades luminosas en señales eléctricas en proporción directa.

35

Por otro lado, dicho documento indica que la disposición cruzada prisma-red permite formar un espectro con varios órdenes de difracción con la virtud de desplegar un espectro dos-dimensional.

40 Sin embargo, el documento US 5,719,672 divulga que la red de difracción Echelle se ubica después del prisma, y que la luz que pasa a través del prisma y se refleja en dicha red de

difracción vuelve a atravesar el prisma para dirigirse al reflector, el cual envía la luz hacia los detectores. Por lo tanto, esta configuración permite controlar la divergencia de los rayos luminosos y evitar la superposición de los órdenes de difracción.

5 Por su parte, el documento US 6,628,383 divulga un montaje tipo Ebert modificado para usarse como espectrógrafo. El montaje utiliza una red de difracción de reflexión plana con un pequeño ángulo de incidencia de la luz (low-blaze-angle plane reflection grating, en inglés), y un detector dos-dimensional, por ejemplo, un sensor CCD. También, dicho documento divulga el uso de red de difracción Echelle en espectrógrafos debido a que tienen
10 una alta resolución lograda por altos ángulos de incidencia de luz.

Dicho documento divulga una modalidad preferida que incluye una abertura por donde ingresa radiación al espectrógrafo, e incluye un espejo parabólico con una primera área fuera de eje (off-axis área, en inglés). Dicha primera área fuera de eje refleja y colima la radiación
15 en rayos paralelos que se direccionan hacia una red de difracción de reflexión plana con un pequeño ángulo de incidencia de luz.

También, dicho documento divulga un prisma de dispersión cruzada dispuesto enfrente de, o en la cercanía de la red de difracción de reflexión. El prisma se ubica de manera que la radiación proveniente de la primera área fuera de eje lo atraviesa antes y después de ser reflejada por la red de difracción de reflexión. Adicionalmente, dicho documento divulga una segunda área fuera de eje del espejo parabólico que recibe la luz que sale del prisma, y la direccionan hacia un detector. Además, dicho documento menciona un lente ubicado entre la segunda área fuera de eje y el detector.
20

25 Sin embargo, este tipo de montajes son usualmente utilizados en aplicaciones de astronomía, pues requieren de largas distancias de recorrido de la luz para evitar fenómenos de aberración y distorsión de la imagen, por lo cual, no sería utilizable en equipos de mediana y pequeña escala.

30 Con base en lo anterior, no se encuentra en el estado de la técnica un espectrógrafo de alta resolución, que evite fenómenos de traslape, aberración y distorsión óptica en los detectores.

Breve descripción de la invención

35 La presente invención corresponde a un dispositivo monocromador de radiación visible de alta resolución espectral que comprende una fuente de radiación visible que emite un haz de radiación visible; un primer dispositivo de colimación en el cual incide el haz de radiación visible; y una abertura de entrada ubicada entre la fuente de radiación visible y el primer
40 dispositivo de colimación. También, el dispositivo monocromador incluye un segundo dispositivo de colimación; un dispositivo de dispersión cruzada ubicado entre el primer

dispositivo de colimación y el segundo dispositivo de colimación. El dispositivo de dispersión cruzada se conforma de un prisma ubicado después del primer dispositivo de colimación; y una red de difracción Echelle ubicado entre el prisma y el segundo dispositivo de colimación. Además, el dispositivo monocromador tiene un detector de radiación localizado después del segundo dispositivo de colimación; y una abertura de salida ubicada entre el segundo dispositivo de colimación y el detector de radiación.

En la presente invención, el prisma recibe una porción de radiación colimada por el primer dispositivo colimador, y realiza una primera separación espectral, la cual es recibida por la red de difracción Echelle, que la separa espectralmente por segunda vez, generando una separación de los órdenes de difracción, lo que es conocido como separación espectral de alta resolución.

Breve descripción de las figuras

La FIG. 1 corresponde a una vista superior de una modalidad del dispositivo monocromador de la presente invención.

La FIG. 2 corresponde a una variación del dispositivo monocromador de la FIG. 1 que incluye un dispositivo colimador acoplado a una fuente de radiación visible.

La FIG. 3 corresponde a una vista en isométrico simplificada de una modalidad del dispositivo monocromador de la presente invención.

Descripción detallada

Los espectrómetros y dispositivos de dispersión de radiación son utilizados para aplicaciones en astronomía, y para la caracterización de materiales y componentes químicos. Particularmente, de usan para la caracterización y análisis espectral de radiación electromagnética.

Haciendo referencia a la FIG. 1, la presente invención corresponde a un dispositivo monocromador de radiación visible de alta resolución espectral que comprende una fuente de radiación visible (F) que emite un haz de radiación visible; un primer dispositivo de colimación (1) en el cual incide el haz de radiación visible; y un segundo dispositivo de colimación (4). También, el dispositivo monocromador incluye un dispositivo de dispersión cruzada ubicado entre el primer dispositivo de colimación (1) y el segundo dispositivo de colimación (4). El dispositivo de dispersión cruzada se conforma de un prisma (2) ubicado después del primer dispositivo de colimación (1); una red de difracción Echelle (3) ubicado entre el prisma (2) y el segundo dispositivo de colimación (4); y un detector de radiación (5)

localizado después del segundo dispositivo de colimación (4). También, el dispositivo monocromador incluye una abertura de entrada (7) ubicada entre la fuente de radiación visible (F) y el primer dispositivo de colimación (1); y una abertura de salida (8) ubicada entre el segundo dispositivo de colimación (4) y el detector de radiación (5).

5

La presente invención puede utilizarse para el análisis espectral de alta resolución utilizando muestras que tengan alta absorción de radiación electromagnética, preferiblemente en el rango visible.

10 Se entenderá en la presente invención que un sistema de dispersión dado resuelve dos longitudes de onda cuando aparecen como dos líneas perfectamente separadas. Por definición se utiliza la siguiente relación:

15 $R = \lambda / \Delta\lambda$, donde λ es la longitud de onda media del par de líneas con menos $\Delta\lambda$ que puede resolverse. Un ejemplo claro es las líneas del doblete del sodio a 589 y 589,6 nm que se resuelven con un $R=980$, lo cual se interpreta como alta resolución.

Normalmente, un espectrógrafo Echelle puede sustentar un $R=100000$, lo cual es susceptible de denominarse como ultra alta resolución.

20

El monocromador de la presente invención puede tener una resolución de hasta $R=100000$, y $\lambda=532$ nm, el $\Delta\lambda$ sería de 0.00532 nm, lo que significa que la resolución sería de medio ångström.

25 En la presente invención, la red de difracción Echelle (3) dispersa la radiación visible emitida por la fuente de radiación visible (F) y optimiza el cubrimiento de una zona sensible a la radiación presente en el detector de radiación (5). La red de difracción Echelle (3) produce una mayor separación de los órdenes de difracción, en comparación con otros elementos de dispersión, como prismas y red de difracción. Lo anterior permite tener espectros de alta
30 dispersión en un corto rango de longitudes de onda en cada orden. Sin embargo, si se usara solo la red de difracción Echelle (3) pasaría que los altos órdenes se superponen entre sí; para evitar lo anterior, usa el prisma (2) como un segundo elemento de dispersión orientado transversalmente respecto a la red de difracción Echelle (3), donde el prisma (2) produce una separación de órdenes de difracción.

35

Haciendo referencia a la FIG. 4, con el fin de explicar el concepto de altos ordenes de difracción y la separación de los mismos, se consideran dos rendijas iguales de anchura b . La intensidad que medimos en la dirección correspondiente al ángulo θ , es proporcional al cuadrado de la amplitud:

40

$$I = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi b \sin\theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi b \sin\theta}{\lambda}} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi a \sin\theta}{\lambda}$$

El siguiente paso, es considerar el diagrama de difracción producido por varias rendijas paralelas de igual ancho b , (Red de Difracción (R)), espaciadas regularmente una distancia a .

Haciendo referencia a la FIG. 5 y FIG. 6, la intensidad de una fuente de radiación visible (F) que medimos en la dirección correspondiente al ángulo θ es el producto de dos términos:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi b \sin\theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi b \sin\theta}{\lambda}} \right)^2 \left(\frac{\sin\left(\frac{N \pi a \sin\theta}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda}\right)} \right)^2$$

Por otro lado, un diagrama consiste en una serie de franjas brillantes, correspondientes a los máximos principales de la interferencia de N rendijas dada por: $\frac{a \sin\theta}{\lambda} = n$ con $n = 0, \pm 1, \pm 2$, donde n indica los órdenes de difracción.

Así las cosas, haciendo referencia a la FIG. 5 los valores de estos máximos estarán moduladas por el diagrama de difracción.

Por otra parte, haciendo referencia a la FIG. 6, se muestran los órdenes de difracción n , donde n_0 es el orden 0, el cual se ubica en el centro de la rendija, y los órdenes superiores $n_{-n} \dots, n_{-2}, n_{-1}, n_1, n_2 \dots n_n$ se alejan verticalmente del centro de la rendija.

Uno de los objetivos de la presente invención es obtener un espectro de alta resolución mediante el uso del prisma (2) y la red de difracción Echelle (3). El prisma (2) permite dispersar la radiación visible que emite la fuente de radiación visible (F) en una pluralidad de haces que inciden sobre la red de difracción Echelle (3). Lo anterior, genera que dicha pluralidad de haces se descomponga en una pluralidad de líneas, las cuales son detectadas por detector de radiación (5).

En la presente invención, el prisma (2) recibe una porción de radiación colimada por el primer dispositivo colimador (1), y realiza una primera separación espectral, la cual es recibida por la red de difracción Echelle (3), que la separa espectralmente por segunda vez, generando una separación de los órdenes de difracción, lo que es conocido como separación espectral de alta resolución.

Preferiblemente, el prisma (2) es amorfo de fluoruro de calcio y tiene una configuración equilátera de 60° y la red de difracción Echelle (3) es de aluminio con un sustrato de silicio, que tiene un ángulo de Blaze entre 50° y 62°, y tiene entre 13 y 1412 líneas por milímetro.

- 5 Por ejemplo, el prisma (2) puede ser de tipo dispersor equilátero de 10mm x 10mm por cara, se caracteriza por tener un %T homogéneo en una amplia región espectral (180nm-8um).

Aún más preferiblemente, la red de difracción Echelle (3) es de aluminio con un sustrato de silicio, y tiene entre 100 y 400 líneas por milímetro.

10

Por ejemplo, la red de difracción Echelle (3) es un dispositivo dispersor en altos órdenes, empleado para espectroscopia de ultra alta resolución, que al igual que el prisma (2) posee una amplia región espectral de trabajo que va desde el UV, hasta los 5,7μm.

- 15 Preferiblemente, la red de difracción Echelle (3) posee un rayado de 316 líneas/mm, un ángulo de Blaze de 63° y una dispersión de 1,44nm/mrad. Sus dimensiones son 25,0 mm x 50,0 mm x 9,5mm.

- 20 Preferiblemente, la red de difracción Echelle (3) tiene un elemento de ajuste angular (9) que permite cambiar el ángulo de la red de difracción Echelle (3), por lo tanto, permite alterar manualmente la separación espectral de alta resolución.

- 25 Por su parte, la fuente de radiación visible (F) es un elemento emisor de luz, que puede ser natural o artificial. Por ejemplo, la fuente de radiación visible (F) puede ser una lámpara (v.g. de filamento, de gas, de arco), un láser, diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés), una estrella, o combinaciones de las mismas.

- 30 Por otro, si la fuente de radiación visible (F) es un láser, puede ser un láser de Helio-Neón, ión de argón, dióxido de carbono, excímero, químico, colorante, rubí, Neodimio:YAG (Itrio-Aluminio Granate, por sus siglas en inglés), Titanio-Zafiro, semiconductor, fibra, electrones libres, o combinaciones de los mismos.

- 35 Preferiblemente, si la fuente de radiación visible (F) es un láser, se selecciona entre Helio-Neón, ión de argón, colorante, rubí, Neodimio:YAG (Itrio-Aluminio Granate por sus siglas en inglés), o Titanio-Zafiro,

Preferiblemente, la fuente de radiación visible (F) es una lámpara de filamento, en otra modalidad es diodo emisor de luz o un láser.

- 40 Por ejemplo, si la fuente de radiación visible (F) es una lámpara de filamento, esta puede usarse para determinar composición básica de sustancias químicas. Este tipo de lámparas

emiten luz sobre la sustancia química que se quiere analizar, y a su vez, dicha sustancia refleja radiación visible, la cual ingresa a través de la abertura de entrada (7). Cada sustancia refleja una radiación característica, la cual se procesa mediante el prisma (2) y la red de difracción Echelle (3) y se detecta en el dispositivo de detección (5).

5

Por otro lado, si la fuente de radiación visible (F), es una estrella, aún más particularmente el sol, permite al dispositivo analizar la atmósfera, para determinar su composición, lo cual permite detectar, por ejemplo, contaminantes, concentración de sólidos suspendidos, concentración de oxígeno, o combinaciones de los mismos. De acuerdo con lo anterior, el

10

También, el dispositivo monocromador de la presente invención puede utilizarse para procesar radiación complementaria que emite una muestra orgánica, por ejemplo, un tejido vivo, el cual se ilumina con la fuente de radiación visible (F). Lo anterior permite utilizar el

15

dispositivo dentro de la técnica de espectroscopia por ejemplo espectroscopia Raman. En este caso la fuente de radiación visible (F) emite una luz visible, coherente y monocromática, por ejemplo, un láser.

La espectroscopia Raman es una técnica de baja intensidad luminosa, por lo cual es necesario

20

evaluar todos los fotones en una sola escena del espectro molecular formado. Así, dispositivo monocromador de la presente invención permite crear un patrón de difracción 2-dimensional, formado simultáneamente por todas las longitudes de onda, lo cual permite captar señales débiles como las usualmente presentadas en la técnica de espectroscopia Raman. Además, se evita tener tiempo de espera debido a movimientos de los componentes ópticos.

25

En general, el dispositivo puede utilizarse en procedimientos de análisis de fluorescencia, para sustancias orgánicas o inorgánicas, tales como, fluorescencia inducida y ruptura inducida por láser.

30

Particularmente si se utiliza una lámpara de filamento, puede adicionarse un tercer elemento colimador (6) que puede ser una lente, o un espejo colimador, el cual se acopla a la fuente de radiación visible, y permite recoger la mayor cantidad de luz proveniente de la fuente de radiación visible (F). Además, el tercer elemento colimador (6) transforma frentes de onda esféricos en frentes de onda planos. Lo anterior permite al tercer elemento colimador (6)

35

propiciar que la energía de la radiación visible llegue con la misma contundencia al primer dispositivo de colimación (1).

El tercer elemento colimador (6) se selecciona del grupo que comprende lentes, espejos planos, espejos cóncavos esféricos, espejos parabólicos, o combinaciones de los mismos.

40

Haciendo referencia a la FIG. 2, preferiblemente el tercer elemento colimador (6) es un lente que se acopla a la fuente de radiación visible (F).

5 Durante el funcionamiento del dispositivo monocromador de la presente invención, la radiación proveniente de la fuente de radiación visible (F) pasa a través de una abertura de entrada (7). La abertura de entrada (7) define la cantidad de radiación que entra al dispositivo monocromador, y define la resolución del mismo. Entre más grande sea la abertura de entrada (7), más radiación deja pasar, y se tendrá espectros de menor resolución registrados en el detector de radiación (5). Por el contrario, entre más pequeña sea la abertura de entrada
10 (7), mayor será la resolución que se puede lograr.

La abertura de entrada (7) puede tener una forma circular, elipsoidal, oblonga, rectangular, triangular, pentagonal, trapezoidal, hexagonal, octagonal, o cualquier otra forma conocida por una persona versada en la materia.

15 Asimismo, la abertura de entrada (7) puede tener un diámetro o ancho característico de entre 1,0mm y 10mm, entre 1,0mm y 2,0mm, entre 2,0mm y 3,0mm, entre 2,5mm y 3,5mm, entre 3,5mm y 4,0mm, entre 4,0mm y 4,5mm, entre 4,5mm y 5,0mm, entre 5,0mm y 7,0mm, o de más de 8mm.

20 Por su parte, el primer dispositivo de colimación (1) permite direccionar la luz colimada proveniente de la fuente de radiación visible (F) hacia el prisma (2) del dispositivo de dispersión cruzada. Lo anterior permite reducir las dimensiones del aparato, pues se genera un efecto de flexión del rayo de luz. En caso de no tener el primer dispositivo de colimación (1), la distancia entre la fuente de radiación visible (F) y el prisma (2) sería de un metro o más. Asimismo, el segundo dispositivo de colimación (4) direcciona la luz que emite la red de difracción Echelle (3) hacia el dispositivo de detección (5).

El primer dispositivo de colimación (1) y el segundo dispositivo de colimación (4) se
30 seleccionan entre el grupo que comprende espejos cóncavos esféricos, parabólicos, lentes o combinaciones de los mismos. Preferiblemente el primer dispositivo de colimación (1) y el segundo dispositivo de colimación (4) son espejos cóncavos esférico o parabólicos. Aún más preferiblemente, el primer dispositivo de colimación (1) y el segundo dispositivo de colimación (4) son espejos esféricos con distancia focal entre 6cm y 20cm y entre 6cm de
35 diámetro.

También, el primer dispositivo de colimación (1) y el segundo dispositivo de colimación (4) pueden ser espejos de superficie reflectora metálica, o de composición dieléctrica. El tipo de espejo seleccionado dependerá de la intensidad y el tipo de luz a analizar (láseres de alta
40 potencia, radiación UV o convencional).

Se entenderá en la presente invención que un espejo de composición dieléctrica es un espejo hecho de sustratos de cristal, en los cuales se depositan capas de materiales dieléctricos, los cuales permiten tener una reflexión igual o mayor al 99,99% de la radiación visible que incide en dicho espejo.

5

Por otro lado, haciendo referencia a la FIG. 2, entre el dispositivo de detección (5) y el segundo dispositivo de colimación (4) se ubica una abertura de salida (8). Dicha abertura de salida (8) restringe el tamaño de la imagen que sale del monocromador e incide en el dispositivo de detección (5). De esta manera, la abertura de salida (8) permite configurar físicamente cuales espectros y órdenes detecta el dispositivo de detección (5).

10

La abertura de salida (8) puede tener una forma circular, elipsoidal, oblonga, rectangular, triangular, pentagonal, trapezoidal, hexagonal, octagonal, o cualquier otra forma conocida por una persona versada en la materia.

15

Asimismo, la abertura de salida (8) puede tener un diámetro o ancho característico de entre 1,0mm y 10mm, entre 1,0mm y 2,0mm, entre 2,0mm y 3,0mm, entre 2,5mm y 3,5mm, entre 3,5mm y 4,0mm, entre 4,0mm y 4,5mm, entre 4,5mm y 5,0mm, entre 5,0mm y 7,0mm, o de más de 8mm.

20

Por su parte, el dispositivo de detección (5) se selecciona entre detectores fotomultiplicadores, CCD (Dispositivo de carga acoplada, por sus siglas en inglés), sensores de píxeles activos, sensores CMOS (semiconductor complementario de óxido metálico, por sus siglas en inglés), ICCD, (Dispositivo de carga acoplada intensificada, por sus siglas en inglés), ECCD (Dispositivo de carga acoplada mejorada, por sus siglas en inglés, arreglos de fotodiodos, fotodiodos en avalancha, o combinaciones de los mismos.

25

El dispositivo de detección (5) permite registrar y/o visualizar los espectros y ordenes descompuestos por el prisma (2) y la red de difracción Echelle (3). El dispositivo de detección (5) puede conectarse a una unidad de procesamiento, por ejemplo, un computador, microcontrolador, teléfono celular inteligente, tablet, o cualquier otro dispositivo apto para esta labor conocido por una persona versada en la materia. La unidad de procesamiento puede tomar los espectros y órdenes para compararlos con bases de datos.

30

35 *Ejemplo 1: Dispositivo monocromador con detector CCD para espectroscopia Raman*

Haciendo referencia a la FIG. 1, y FIG. 3 en una modalidad de la invención, el dispositivo monocromador comprende una fuente de radiación visible (F) que emite un haz de radiación visible; un primer dispositivo de colimación (1) en el cual incide el haz de radiación visible; y un segundo dispositivo de colimación (4). También, el dispositivo monocromador incluye un dispositivo de dispersión cruzada ubicado entre el primer dispositivo de colimación (1) y

40

el segundo dispositivo de colimación (4). El dispositivo de dispersión cruzada se conforma de un prisma (2) ubicado después del primer dispositivo de colimación (1); una red de difracción Echelle (3) ubicado entre el prisma (2) y el segundo dispositivo de colimación (4); y un detector de radiación (5) localizado después del segundo dispositivo de colimación (4).

5

La fuente de radiación visible (F) es una lámpara de tungsteno como fuente de luz, con la cual se realizó una serie de imágenes espectrales.

En esta modalidad, el primer dispositivo de colimación (1) y el segundo dispositivo de colimación (4) son espejos colimadores esféricos cóncavos de aluminio de 30 mm de diámetro, con una distancia focal de 120 mm. Igualmente, dichos espejos son los encargados de mantener los rayos paralelos antes del prisma y el detector respectivamente

Por su parte, el prisma (2) es un prisma de tipo dispersor equilátero de 10mm x 10mm por cara, se caracteriza por tener un porcentaje de temperatura (%T) homogéneo en una amplia región espectral (180nm-8 μ m). Por su lado, la red de dispersión Echelle (3) es un dispositivo dispersor en altos órdenes, empleado para espectroscopia de ultra alta resolución, al igual que el prisma posee una amplia región espectral de trabajo que va desde el UV, hasta los 5,7 μ m, posee un rayado de 316 líneas/mm, un ángulo de Blaze de 63° y una dispersión de 1,44nm/mrad. Sus dimensiones son 25,0mm x 50,0mm x 9,5mm.

Asimismo, el dispositivo de detección (5) es un detector CCD (Dispositivo de carga acoplada, por sus siglas en inglés de una cámara de video de 5,0 MP, la cual cuenta con una eficiencia cuántica del 50%, para la región espectral del verde, y tiene un sensor con dimensiones de 20x20mm, un tamaño de pixel 3,45 μ m y un ruido en oscuridad temporal de 7,6 e-. Por su parte las aberturas (7 y 8) son rendijas de 0,5mm.

Todo lo anterior va montado sobre ejes ópticos mecánicos que están sujetos a una mesa óptica mediante tornillería.

30

Se debe entender que la presente invención no se halla limitada a las modalidades descritas e ilustradas, pues como será evidente para una persona versada en el arte, existen variaciones y modificaciones posibles que no se apartan del espíritu de la invención, el cual solo se encuentra definido por las siguientes reivindicaciones.

35