

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 764 753**

51 Int. Cl.:

G01J 3/18 (2006.01)

G02B 5/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.01.2004 PCT/DE2004/000058**

87 Fecha y número de publicación internacional: **10.09.2004 WO04076996**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.01.2004 E 04703091 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.11.2019 EP 1597548**

54 Título: **Procedimiento para la determinación de parámetros de rejilla óptimos para la producción de una rejilla de difracción para un espectrómetro VUV**

30 Prioridad:

25.02.2003 DE 10307884

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

04.06.2020

73 Titular/es:

**THE EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY (EURATOM), REPRESENTED BY THE EUROPEAN COMMISSION (100.0%)
200, rue de la Loi
1049 Brussels , BE**

72 Inventor/es:

BIEL, WOLFGANG

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 764 753 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

Procedimiento para la determinación de parámetros de rejilla óptimos para la producción de una rejilla de difracción para un espectrómetro VUV

5 La invención se refiere a un procedimiento para la determinación de los parámetros de rejilla óptimos para una rejilla de difracción holográfica, en particular para una rejilla de difracción para un espectrómetro VUV con un detector plano.

Estado de la técnica

1. Espectrómetro VUV y tecnología de rejilla

10 Todos los elementos y sus iones (no completamente ionizados) pueden ser identificados y distinguidos claramente con ayuda de su radiación de líneas característica. Para medir esta radiación se utilizan hoy en día habitualmente espectrómetros que descomponen espectralmente la radiación por difracción en una rejilla de difracción y trazan los espectros (intensidad como función de la longitud de onda) formados en un detector.

15 Las líneas de resonancia más intensas de la mayoría de los elementos y prácticamente de todos los iones se sitúan en el rango de longitud de onda ultravioleta en vacío (VUV, desde aproximadamente 1 nm hasta aproximadamente 200 nm). La radiación es absorbida por la materia en este rango de longitudes de onda, además la reflectividad de todos los materiales en este rango disminuye bruscamente con la longitud de onda. Por tanto, los espectrómetros deben ser accionados en el rango VUV bajo vacío y deben bastarse con solo un único componente óptico para garantizar una transmisión/eficiencia suficiente para comprobar la radiación. El desarrollo de la tecnología de detectores (detectores MCP, matrices lineales o chips CCD) predetermina además que el espectro que se va a trazar debe ser representado nítidamente sobre una superficie plana de un tamaño de típicamente 25-40 mm de ancho.

20 Por tanto, hoy en día los espectrómetros VUV generalmente consisten en los tres elementos ópticos: rendija de entrada (una ranura alargada con dos bordes afilados y precisos a una distancia de unos 10 μm), una rejilla de difracción de representación y un detector (plano). Para la doble tarea de la descomposición espectral, así como la exposición óptica sobre el detector, se emplean rejillas de refracción como rejillas de reflexión con superficies cóncavas o toroidales. Para la fabricación de estas rejillas hay dos procedimientos probados:

- 25 A) rayado mecánico de las líneas de rejilla en el sustrato por medio de una punta de diamante.
 B) iluminación holográfica de una capa delgada de una sustancia fotosensible sobre el sustrato mediante luz láser desde dos puntos. Las líneas de rejilla se producen como patrones de interferencia sobre el sustrato y se vuelven químicamente húmedos después de la exposición, así como se retocan aún más por la tecnología de grabado iónico.

30 Cuando se usan rejillas de difracción de representación en el rango VUV, se producen errores de representación, es decir, un punto en la rendija de entrada es representado en el detector a través de la rejilla sobre un área más o menos grande (y no sobre un punto). Con esto se deteriora la capacidad de resolución y la eficiencia del espectrómetro. El estado de la técnica relativo a ello es el siguiente.

35 Hasta aproximadamente el año 1970 las rejillas solo se podían producir según el método A) y con sustratos cóncavos, con líneas de rejilla rectas y paralelas (rejilla clásica de Rowland). Esto conduce por ejemplo a configuraciones de espectrómetros en las que el espectro se produce a lo largo de un círculo (en el "círculo de Rowland"). Por tanto, el uso de detectores planos conduce a una falta de nitidez en la imagen. Además se producen pérdidas de luz considerables (factor típico 2-10) debido al astigmatismo de la representación. Las rejillas rayadas tienen además un alto nivel de luz dispersa debido a las líneas de rejilla realizadas no perfectamente uniformes. Para la descripción de una rejilla de Rowland basta la indicación de dos números: el radio de curvatura del sustrato y la "constante de rejilla" (número de líneas por mm).

40 La técnica B) se ha utilizado cada vez más desde aproximadamente 1970. Un procedimiento para la producción de rejillas de difracción es conocido por ejemplo por el documento DE 19 67 039. En caso de iluminación simétrica desde una gran distancia se pueden producir líneas de rejilla casi paralelas de distancia constante. Esto corresponde a la rejilla clásica de Rowland con sus errores de representación. Sin embargo, las rejillas producidas holográficamente son considerablemente más pobres en luz de dispersión que las rejillas de rayado mecánico porque las líneas de rejilla pueden ser producidas de manera más uniforme que con el rayado mecánico. Por variación de la distancia y el ángulo de incidencia de ambos puntos de exposición holográfica se puede lograr una distancia variable, así como una curvatura de las líneas de rejilla sobre el sustrato, por medio de las cuales se pueden reducir los errores de
 45 representación de la rejilla. En particular con ello se puede conseguir una representación nítida sobre un detector plano y las pérdidas de luz por el astigmatismo pueden ser evitadas en gran medida.

50 Se han desarrollado diferentes conceptos para minimizar los errores de representación desde aproximadamente 1970 y designados como corregidos en aberración por ejemplo como "tipo 1" a "tipo 4" (empresa Jobin-Yvon). El método puede ser empleado en sustratos cóncavos y toroidales. El nivel de luz dispersa es bajo. Sin embargo, tal rejilla

corregida solo puede usarse para una configuración determinada del espectrómetro (distancias, ángulos, rango de longitudes de onda).

5 Una rejilla holográfica se describe generalmente mediante 7 valores numéricos (parámetros de rejilla holográfica): los dos radios de curvatura del sustrato ρ y R , la longitud de onda del láser λ_L utilizado y 2 coordenadas respectivamente para describir la posición de los dos puntos de luz (por ejemplo las distancias r_C , r_D y ángulo de incidencia γ y δ).

En los años 80 se llevaron a cabo intentos con máquinas de rayado controladas por ordenador, con las que se produjeron rejillas rayadas mecánicamente con líneas de rejilla curvas de distancia variable. Sin embargo, debido a los altos costes, así como al problema de la luz dispersa de estas rejillas, esta tecnología no se ha impuesto.

10 Dado que la espectroscopia VUV es técnicamente compleja y solo se emplea en planteamientos especiales, hay por tanto solo un pequeño número de empresas en todo el mundo que trabajan en el ámbito, además solo hay un número muy limitado de rejillas estandarizadas suministrables, así como un mercado igualmente muy limitado de desarrollos especiales.

15 La tecnología para la fabricación de rejillas holográficas está disponible en al menos dos empresas (Jobin-Yvon y Zeiss). Para la detección de la radiación en espectrómetros en el rango VUV se utilizan actualmente la mayoría de las veces detectores MCP abiertos. Estos convierten los fotones VUV en electrones libres para amplificar estos y finalmente convertir los impulsos de electrones en una pantalla de fósforo en luz visible, que luego puede ser grabada con un sistema de cámara adecuado. Los detectores MCP disponen de una resolución espacial finita, es decir, cada incidencia de electrones individuales por el lado primario conduce en la salida de detector a un punto de luz de tamaño finito que tiene aproximadamente una distribución de intensidad espacial en forma de una campana de Gauss del
20 ancho de aproximadamente 50-80 μm .

25 Las mediciones de precisión recientes de las propiedades MCP, que se llevaron a cabo en el marco del desarrollo de instrumentos espectroscópicos para satélites, permiten ahora una mayor optimización de la eficiencia del sistema completo de espectrómetros VUV. Para este propósito, el ángulo de montaje del MCP en el espectrómetro es elegido de modo que el ángulo de incidencia local de la radiación VUV en la superficie MCP se sitúe precisamente en el máximo de la eficiencia probada dependiente del ángulo del detector. La posición y el ángulo de montaje del detector son parte de los parámetros del espectrómetro y deben tenerse en cuenta como variables de entrada en la determinación del diseño de la rejilla.

30 Los espectrógrafos VUV deben presentar una alta eficiencia para posibilitar exámenes con alta resolución temporal, pero al mismo tiempo poseer una buena resolución de longitud de onda, para que puedan ser observadas aisladas muchas líneas espectrales al mismo tiempo. La eficiencia resulta del producto de la extensión efectiva y la eficiencia de la rejilla (esta es la fracción de la luz incidente que se desvía en el primer orden de difracción). La extensión efectiva es el producto de tres magnitudes: superficie iluminada de la rendija de entrada; ángulo sólido iluminado; proporción de los rayos provenientes de la rejilla que inciden sobre el detector dentro de su superficie sensible.

2. Espectroscopia VUV en experimentos de fusión.

35 El uso técnico de la espectroscopia VUV se encuentra en el marco de experimentos de fusión. Con la vista puesta en el uso comercial de la fusión nuclear son realizados experimentos en todo el mundo con plasmas de hidrógeno encerrados magnéticamente, con el objetivo de maximizar el producto de la densidad de partículas, la temperatura y el tiempo de confinamiento. En estos plasmas calientes con densidades por encima de 10^{19}m^{-3} y temperaturas en el
40 rango de algunos keV, además de los isótopos de hidrógeno se producen también otros elementos (impurezas de plasma) con concentraciones en rangos de tanto por mil o tanto por ciento, que son liberados por ejemplo como componentes de pared como resultado del inevitable contacto de la pared de plasma y llegan al plasma. Las impurezas del plasma puede influir esencialmente en las propiedades del plasma: por un lado desplazan los iones de hidrógeno del plasma (casi neutro) y "diluyen" por tanto el "combustible de fusión", por otro lado irradian grandes densidades de potencia y conducen así a un enfriamiento del plasma que es indeseable en el centro del plasma, pero puede conducir
45 a efectos positivos en el borde del plasma (por ejemplo desacoplamiento de potencia más uniforme). Para la optimización del plasma de fusión es necesario por tanto un conocimiento exacto del contenido de impurezas en el plasma, así como del comportamiento de transporte de las impurezas de plasma.

50 La espectroscopia es una herramienta de diagnóstico importante para la identificación de impurezas en el plasma, porque todos los elementos químicos y sus iones (no totalmente ionizados) se pueden distinguir claramente en virtud de su radiación de líneas característica. Bajo las condiciones de plasma mencionadas anteriormente en plasmas de fusión encerrados magnéticamente, las líneas de resonancia más intensas de la mayoría de los elementos y prácticamente de todos los iones se sitúan en el rango de longitudes de onda ultravioleta en vacío (VUV, desde aproximadamente 1 nm hasta aproximadamente 200 nm). Para poder reconocer con seguridad todas las impurezas del plasma relevantes se requiere una observación permanente y extensa de un amplio rango de longitudes de onda
55 con buena resolución de longitudes de onda para poder medir y diferenciar tantas líneas espectrales diferentes como sea posible al mismo tiempo.

Para la determinación del comportamiento de transporte de las impurezas del plasma, habitualmente son realizados experimentos transitorios en los que se introduce adicionalmente en el plasma un pulso de tiempo corto de una impureza de plasma y es observada espectroscópicamente la penetración de las partículas desde el borde del plasma hasta el centro del plasma. Para tales exámenes se requieren espectrómetros que presentan una resolución de tiempo alta. Por un lado, esto impone exigencias a la tecnología del detector, por otro lado, se requieren espectrómetros eficientes, que registran un número suficiente de fotones por línea espectral y por etapa de tiempo y, por tanto, alcanzan una precisión de medición suficiente (dependiente del número de fotones registrado, por ejemplo distribución de Poisson).

En "Nearly stigmatic toroidal grazing-incidence spectrometer in the 100-300 Å range: design" de P. L. Hagelstein, Applied Optics, Optical Society of America, Washington, EE.UU., vol. 31, N.º 10, 1 de Abril de 1992, páginas 1464-1471, se dan a conocer cálculos y consideraciones para la producción holográfica de una rejilla de difracción toroidal. Sin embargo, no se explicará en detalle ni un procedimiento para averiguar los parámetros de rejilla ni para la determinación de la geometría de exposición.

En "Numerical design method for aberration-reduced concave grating spectrometers" de W. R. McKinney *et al.*, Applied Optics, Optical Society of America, Washington, EE.UU., vol. 26, N.º 15, 1 de agosto de 1987, páginas 3108-3118, se da a conocer un método general para la producción de una rejilla de difracción cóncava. Tampoco aquí se menciona ningún procedimiento de minimización para la determinación de parámetros de rejilla óptimos.

En "Diffraction gratings: aberrations and applications" en OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, Elsevier Science Publisher BV., Ámsterdam, NL, vol. 31 N.º 3, abril de 1999 en las páginas 195 a 218, S. Singh describe rejillas clásicas y holográficas y sus propiedades y aplicaciones.

Wilkinson *et al.* en "Technique for narrow-band imaging in the far ultraviolet based on aberration-corrected holographic gratings", en Applied Optics, Optical Society of America, Washington, EE.UU., vol. 40, N.º 19, 1 de julio de 2001, páginas 3244-3255 dan a conocer un procedimiento para la determinación de parámetros de rejilla que se basan en un desarrollo en serie y se emplean como rejilla plana para un telescopio astronómico.

En "Holographic concave gratings for use with an off-plane constant-deviation monochromator" en Applied Optics, Optical Society of America, Washington, EE.UU., vol. 25, N.º 22, 15 de noviembre de 1986, páginas 4071-4075 K. Koike y M. Ohkubo describen rejillas cóncavas para un monocromador. Los métodos dados a conocer allí para la determinación de parámetros de rejilla se basan igualmente en un desarrollo en serie.

Objeto y solución

El objeto de la invención es proporcionar una rejilla de difracción holográfica, que utilizada en un espectrómetro VUV con un detector plano consiga para un rango de longitudes de onda predeterminado, en particular de 2,5 nm a 160 nm, un ancho de líneas mínimo en el detector con una extensión mayor.

El objeto de la invención se consigue, por un lado, mediante un procedimiento para la determinación de parámetros de rejilla para la producción holográfica de una rejilla de difracción toroidal de acuerdo con la reivindicación principal. El objeto de la invención se consigue además mediante un procedimiento para la producción de una rejilla de difracción según las reivindicaciones subordinadas, cuyos parámetros de producción son determinados mediante el procedimiento mencionado anteriormente. Formas de realización ventajosas, tanto del procedimiento como de la rejilla de difracción, se encuentran de nuevo en las reivindicaciones a las que correspondientemente se hace referencia.

Contenido de la invención

El contenido de la invención es en particular un procedimiento para averiguar y determinar parámetros de rejilla, con cuya ayuda puedan ser producidas rejillas de difracción ventajosas para un espectrómetro VUV con un detector plano y parámetros de espectrómetro predeterminados, que presenten anchos de líneas en el detector, en particular mínimos, claramente mejorados con respecto al estado de la técnica con una extensión alta.

Se encontró en el marco de la invención que para la solución del objeto el ancho medio de líneas de las "líneas espectrales" en el plano del detector debe minimizarse. Las variables, respecto a las cuales se busca el mínimo, son los siguientes siete parámetros de rejilla: radio menor y mayor del sustrato de rejilla toroidal, las distancias de los puntos de iluminación holográfica desde el origen de rejilla, la posición angular de los puntos de iluminación holográfica respecto a la normal a la rejilla y la longitud de onda del láser prefijada para la iluminación holográfica. Como condiciones marginales son prefijados en primer lugar los llamados parámetros del espectrómetro, como por ejemplo las dimensiones de la rendija de entrada y del detector, las distancias de la rendija de entrada y del detector desde el centro de la rejilla, el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión de la radiación respecto a la normal a la rejilla y el rango de longitudes de onda a examinar. Sin embargo, estos también varían ligeramente en el otro procedimiento dentro de anchos de banda correspondientes que se pueden derivar de peculiaridades mecánicas y/o físicas.

Para llevar a cabo el objeto para un rango de longitudes de onda predeterminado, que por regla general está determinado por una tarea de medición física, se va crear un espectrómetro VUV con detector MCP, se proporciona en primer lugar el diseño del espectrómetro de rejilla de difracción que para un rango de longitudes de onda

determinado consigue un ancho de líneas de onda mínimo con al mismo tiempo una eficiencia total máxima. La eficiencia total necesaria resulta por ejemplo de la intensidad de radiación esperada del objeto de medición, plasma de fusión, y la precisión de medición perseguida.

- 5 Los subobjetos que hay que resolver son en primer lugar la determinación de un diseño de rejilla óptimo, en segundo lugar la determinación de la posición angular óptima del detector y, en tercer lugar la determinación de la disposición general asociada (parámetros del espectrómetro). Dado que el segundo subobjeto depende de la solución del primer y del tercero, todo el objeto se lleva a cabo de forma iterativa.

Condiciones marginales físicas y técnicas

- 10 I) Por un lado, la densidad de líneas de la rejilla de difracción no debe exceder de un valor de 2000-2500 por mm, ya que hasta ahora este es el límite técnico del proceso de producción. Por otro lado, tampoco debería estar por debajo de un valor de unos pocos cientos, ya que de lo contrario se alcanzan los límites físicos del proceso de difracción.
- 15 II) Existen varias condiciones marginales para la elección del ángulo de incidencia α de la radiación sobre la rejilla de difracción:
- La reflectividad de la superficie de la rejilla y, por tanto, la eficiencia de difracción de la rejilla dependen del ángulo y de la longitud de onda. La longitud de onda límite inferior, por debajo de la cual desaparece la reflectividad y se produce la absorción completa, es aproximadamente proporcional al coseno del ángulo de incidencia α respecto a la normal a la rejilla:
- $$\lambda_{\text{límite}} \approx \lambda_p \times \cos(\alpha) \text{ con } \lambda_p \approx 15 \text{ nm para oro o platino.}$$
- 20 Para conseguir una reflectividad suficientemente grande en el borde inferior del rango de longitudes de onda seleccionado debe ser elegido prácticamente un ángulo de incidencia cuya longitud de onda límite correspondiente sea al menos un factor 2,5 menor que la longitud de onda mínima λ_{min} del espectrómetro.
- Al mismo tiempo, sin embargo, la extensión y, por tanto, la eficiencia del espectrómetro disminuyen con la incidencia de luz variable (aumento del ángulo α), del mismo modo aproximadamente proporcional al coseno del ángulo de incidencia con respecto a la normal a la rejilla. Debido a las condiciones a) y b) se eligen ángulos de incidencia para los espectrómetros descritos aquí para los cuales se da la condición
- $$\alpha \approx \arccos\left(\frac{\lambda_{\text{min}}}{2,5 \times 15 \text{ nm}}\right).$$
- 25 - Los ángulos de incidencia de más de 87 grados conducen a radios de curvatura extremos del sustrato de rejilla y, por tanto, de manera desfavorable a mayores errores de representación y luz dispersa creciente. Por tanto, este rango angular está excluido de antemano. De aquí resulta en particular que el rango de aplicación razonable de este concepto de espectrómetro está limitado a longitudes de onda por encima de aproximadamente 2 nm.
- 30 III) El tamaño de construcción del espectrómetro debe permanecer lo más limitado posible (en lo que respecta a costes, estabilidad mecánica, necesidad de espacio). Para un rango de longitudes de onda predeterminado esto conduce a través de la ecuación de rejilla a una "longitud de brazo" (es decir, la distancia entre la rejilla y el detector) lo más corta posible, así como a una densidad de líneas de la rejilla alta. No obstante, se debe observar aquí la condición marginal I).
- 35 IV) El ángulo de montaje del detector en el espectrómetro debería elegirse de modo que el ángulo de incidencia local de la luz difractada sobre el detector corresponda al máximo de la eficiencia probada del detector MCP.
- 40 V) Para el proceso de exposición para la producción de una rejilla holográfica se utilizan mesas ópticas de tamaño finito, también los soportes ópticos de los diafragmas de agujero que se utilizan como fuentes de luz puntual durante la exposición tienen un tamaño finito. Además, una iluminación uniforme del sustrato de la rejilla solo se puede lograr si el ángulo de incidencia en la rejilla no se elige como demasiado variable. De estas tres condiciones resultan límites técnicos para las distancias mínimas y máximas, así como ángulos
- 45 máximos de las posiciones de los diafragmas de agujero en la exposición holográfica.

Diseño de una rejilla de difracción

Para el desarrollo y la producción de una rejilla de difracción para un espectrómetro, la determinación de los parámetros de rejilla y las condiciones marginales son en cada caso solo etapas parciales. Todo el procedimiento se puede representar en este caso como sigue:

- 50 A) Especificación del rango de longitudes de onda a ser observadas (longitud de onda mínima y máxima a ser observada en nm), así como el tamaño del detector (ancho).

- B) Elección de la posición angular del detector. Condición marginal: con los detectores MCP abiertos utilizados con frecuencia en el rango VUV, la eficiencia del detector depende en gran medida de la longitud de onda y del ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie del detector.
- C) Elección del ángulo de incidencia de la radiación sobre la rejilla de difracción. Condiciones marginales físicas:
- 5 – La reflectividad del revestimiento de rejilla depende de la longitud de onda y del ángulo de incidencia
- Una incidencia muy variable con ángulos de incidencia de más de 87 grados con respecto a la normal a la rejilla conduce a radios de curvatura extremos y, por tanto, es inusual para sustratos de rejilla toroidales.
- 10 D) Elección de las "longitudes de brazo" del espectrómetro (distancia desde la rendija de entrada al centro de la rejilla, así como distancia desde el centro de la rejilla al foco meridional de orden cero).
- E) Condiciones marginales: De las etapas A a C, así como de las longitudes del brazo resulta la densidad de líneas de la rejilla de que no debe exceder de un valor de 2000-2500 líneas por mm. Una longitud de brazo grande conduce a una densidad de líneas más pequeña, pero encarece la estructura mecánica del espectrómetro.
- 15 F) Creación numérica de un diseño de rejilla (determinación de los siete parámetros de rejilla holográfica). Este punto se describe con más detalle a continuación en los párrafos con respecto a F.1 a F.8.
- G) Análisis numérico de las propiedades de la rejilla mediante cálculos de trazado de rayos (diagramas de puntos, determinación de extensión efectiva y ancho de líneas). Para el conjunto así determinado de los siete parámetros de rejilla y el espectrómetro así fijado es simulado numéricamente el rendimiento total. Para este propósito, como se describe en el párrafo F.7, son simuladas numéricamente numerosas trayectorias de rayo, esta vez sin embargo para varias longitudes de onda diferentes, en particular al menos cinco longitudes de onda diferentes, con iluminación homogénea desde la rendija de entrada y rejilla con por ejemplo 50000 rayos individuales cada una. De aquí resultan los llamados diagramas de puntos en el detector (imágenes de rendija de primer orden) que incluyen los errores de representación restantes, así como los perfiles del aparato de las líneas espectrales. Como resultado se obtiene el ancho de líneas medio del espectrómetro, así como la extensión efectiva.
- 20
- 25 H) Repetición de las etapas (C a G) para diferentes dimensiones de la rejilla y la rendija (variación de la extensión) para la determinación de una configuración con un ancho de líneas óptimo para una extensión dada.
- 30 I) Eventualmente la repetición de las etapas (C a G) que incluyen F.3 a F.8 para diferentes longitudes de brazo para la determinación de una configuración con un ancho de líneas óptimo para una extensión dada.
- J) Cálculo de la eficiencia de la rejilla en función de la longitud de onda por un fabricante de rejillas (esto no es posible con el software desarrollado aquí).
- K) Eventualmente la repetición de las etapas F.1c a F.1g incluyendo (C a G) para diferentes ángulos de incidencia para la determinación de una configuración con un ancho de líneas óptimo con una extensión dada.
- 35 L) Selección de una configuración óptima para la aplicación dada formada por los 7 parámetros de rejilla holográficos, así como los parámetros del espectrómetro (longitudes de brazo, ángulo de incidencia, tamaño de rejilla, tamaño de rendija, tamaño del detector)

Determinación del diseño de rejilla

- 40 El punto F mencionado anteriormente, la determinación numérica del diseño de rejilla, desde el punto de vista matemático es un problema de minimización. Como "condiciones marginales" son prefijados en primer lugar los valores iniciales de los parámetros del espectrómetro (dimensiones, distancias, ángulos, rango de longitudes de onda) y la longitud de onda del láser. Lo que se debe minimizar es el ancho de líneas medio de las "líneas espectrales" sobre el plano del detector. Las variables respecto a las que se busca el mínimo son los siete parámetros de rejilla mencionados
- 45 anteriormente. Después de la determinación de los parámetros de rejilla es examinado numéricamente el sistema completo (espectrómetro VUV) con respecto al ancho de líneas y la eficiencia lograda mediante cálculos de trazado de rayos y se verifica el mantenimiento de todas las condiciones técnicas marginales, así como su utilización óptima. Esto también incluye datos para la eficiencia de difracción de la rejilla, que entre otros pueden ser calculados por el fabricante de la rejilla. La repetición reiterada del proceso para parámetros de espectrómetro seleccionados de manera
- 50 diferente conduce finalmente a una solución óptima para el problema planteado (por ejemplo, rango de longitudes de onda predeterminado y/u otras especificaciones geométricas).

Para un problema predeterminado las etapas individuales del procedimiento para la determinación de los siete parámetros de rejilla óptimos (punto F) se pueden describir preferiblemente como sigue:

ES 2 764 753 T3

- F.1) Especificación de los parámetros del espectrómetro, siempre que no esté ya especificado por los puntos A a D, en particular:
- 5 F.1) a) Especificación del rango de longitudes de onda a observar (longitud de onda mínima y máxima en nm, que debe ser representada en el detector), que está predefinida debido a la tarea de medición física.
- F.1) b) Especificación de la altura y el ancho del detector (por ejemplo, tamaños estándar). Esta especificación se realiza, por ejemplo, utilizando la tecnología de detector disponible.
- F.1) c) Especificación del ángulo de incidencia α de la luz con respecto a la normal a la rejilla: en particular se debe observar la condición marginal II.
- 10 F.1) d) Posición angular ("ángulo MCP") del detector: véase la condición marginal IV. La posición angular del detector es determinada preferiblemente de forma iterativa, ya que el ángulo exacto de incidencia de la radiación sobre el detector también depende de los parámetros de rejilla.
- F.1) e) Especificación de la distancia L_A de la rendija de entrada respecto al centro de la rejilla y de la distancia r_{S0} desde el centro de la rejilla al foco meridional de orden cero: ambas distancias se puede elegir libremente, siempre y cuando se cumplan las condiciones marginales I y III. Sin embargo, ambas distancias deberían elegirse ventajosamente aproximadamente iguales para lograr una representación simétrica y errores de representación mínimos.
- 15 F.1) f) Especificación del ancho y la altura de la rendija de entrada: en principio, estos valores pueden ser seleccionados libremente. Con la ampliación, la extensión aumenta y el ancho de líneas se deteriora (es decir, aumenta).
- 20 F.1) g) Especificación del ancho y la altura de la rejilla de difracción: a medida que se agranda la rejilla de difracción, la extensión aumenta, el ancho de líneas se deteriora (aumenta) de manera desventajosa y los costes de producción crecen.
- F.2) Sigue la especificación de la longitud de onda del láser λ_L para la exposición holográfica del sustrato de rejilla. Este valor es suministrado por parte del fabricante de la rejilla. Resulta de la tecnología láser disponible y de la sensibilidad del material fotosensible utilizado. El número de variables aún por buscar se reduce por tanto a 6.
- 25 F.3) El radio de curvatura mayor R del sustrato de rejilla es determinado a partir de la condición de focalización meridional de orden cero. El número de variables aún por buscar se reduce por tanto a 5.
- F.4) Sigue la determinación iterativa de las siguientes magnitudes: radio de curvatura menor ρ del sustrato de rejilla, densidad de líneas G en el centro de la rejilla y longitud de onda en el centro del detector. Se utilizan la ecuación de la rejilla, así como la condición de focalización sagital de primer orden. El número de variables aún por buscar se reduce por tanto a 4.
- 30 F.5) Otras especificaciones del espectrómetro son la situación y la posición angular del detector. La situación del detector se puede determinar a partir de una ecuación lineal. Los ángulos se pueden determinar a partir de la ecuación de la rejilla incidiendo la luz de primer orden desde la rejilla sobre el detector.
- 35 F.6) De las 4 variables restantes (distancias de los dos puntos de exposición holográfica desde el centro de la rejilla, así como sus posiciones angulares con respecto a la normal a la rejilla), uno de los dos ángulos (aquí: γ) puede eliminarse conociendo el número de líneas medio de la rejilla. Para resolver el problema de minimización se debe determinar un mínimo de una función de las tres variables restantes (distancias r_C , r_D y ángulo δ).
- 40 F.7) Para resolver el problema de minimización el espectrómetro es simulado numéricamente en la aproximación de la óptica geométrica. Para un conjunto de r_C , r_D y δ dados es rastreado numéricamente el curso del rayo en el espectrómetro para un número de 5 longitudes de onda y aquí, respectivamente, para un gran número (al menos unos 1000) de diferentes trayectorias del rayo (diferentes puntos de partida en la rendija de entrada, así como en cada caso diferentes puntos de impacto sobre la rejilla). Para cada rayo individual, el punto de impacto en el detector es determinado utilizando el principio de Fermat (minimización de la trayectoria de la luz). La magnitud a minimizar es el ancho de líneas $\Delta\lambda$ en el detector (promediado a través de todas las longitudes de onda), que depende de la posición de todos los puntos de impacto calculados y de la resolución espacial del detector utilizado. Para la determinación del ancho de líneas en el lado de salida, para cada punto de impacto en el detector es sumada una curva de campana de gauss, cuyo ancho corresponde a la resolución del detector. Por superposición de todas las curvas de gauss se obtiene la distribución de intensidad resultante de las líneas espectrales, que se pueden representar como una gráfica. El ancho de líneas para una longitud de onda resulta entonces del ancho de estas curvas a la mitad del valor máximo. El tamaño $\Delta\lambda$ que se minimizará es el valor medio del ancho de líneas de todas las longitudes de onda
- 45
- 50

consideradas. Cuando los espectros se graban con una cámara con píxeles discretos se obtienen valores medidos discretos, que igualmente son introducidos en las gráficas.

- 5 F.8) Utilizando una estrategia de búsqueda iterativa se busca en el rango completo de las tres variables (r_C , r_D y δ) un mínimo de la magnitud $\Delta\lambda$. Al hacerlo, para cada par de valores (r_C , r_D) en una cuadrícula de ancho de paso predeterminado en el plano (r_C , r_D) se determina un mínimo absoluto de la magnitud $\Delta\lambda$ con respecto a la variable δ . Esta determinación del mínimo con respecto a δ en cada punto (r_C , r_D) se realiza de tal manera que se busca en primer lugar todo el rango angular permitido con una retícula gruesa, para a continuación realizar una determinación fina de la posición mínima exacta mediante un método de Newton. Para limitar el tiempo de cálculo, toda la búsqueda en el plano (r_C , r_D) se realiza en primer lugar con una cuadrícula gruesa (ancho de paso, por ejemplo de 20 mm) y luego en un rango de búsqueda reducido sucesivamente con una cuadrícula fina (por ejemplo, ancho de paso más fino de 1 mm).

Al final, se considera como solución el conjunto de variables r_C , r_D y δ para los que $\Delta\lambda$ alcanza un mínimo absoluto.

Parte de descripción especial

- 15 A continuación se explica con más detalle el contenido de la invención con referencia a 7 figuras, cuatro ejemplos de realización, así como 5 tablas, sin que el contenido de la invención se vea limitado por ello.

Muestran:

- Figura 1: estructura de un espectrómetro (desde arriba).
 Figura 2: esbozo para la exposición holográfica de la rejilla (desde arriba).
 20 Figuras 3-6: distribuciones espectrales simuladas (diagramas de puntos) y perfiles instrumentales correspondientes para cuatro rangos de longitudes de onda diferentes, así como los conjuntos de parámetros de rejilla correspondientes.

- 25 El centro de investigación Jülich GmbH se ocupa desde 1999 del desarrollo del diagnóstico para el nuevo experimento del plasma W7-X, que entró en funcionamiento alrededor de 2008 en Greifswald. En el campo de la espectroscopia VUV deberían ser desarrollados espectrómetros que en conjunto cubran sin huecos el rango de longitudes de onda de 2,5 nm a 160 nm.

- 30 En el marco de la tecnología utilizada aquí se puede conseguir otro aumento del rango de longitudes de onda observado (hasta aproximadamente 1 nm o hasta aproximadamente 200 nm) y/o un aumento de la resolución esencialmente por un aumento del número de aparatos con otra elección correspondiente de los segmentos de longitudes de onda. Para el presente caso, el número de 4 espectrómetros representa un compromiso razonable entre el presupuesto disponible y el rango de observación U-10 disponible en W7-X.

En el marco de esta invención fueron desarrollados los siguientes cuatro espectrómetros con rejillas de difracción optimizadas para cuatro rangos de longitudes de onda que se solapan ligeramente:

- Espectrómetro N.º 1: 2,5 a 10,5 nm
 35 Espectrómetro N.º 2: 9,0 a 24,0 nm
 Espectrómetro N.º 3: 20 a 66 nm
 Espectrómetro N.º 4: 60 a 160 nm

- 40 La posición espectral de líneas espectrales importantes, así como la disponibilidad de métodos de calibración y fuentes de luz se tuvieron en cuenta en la determinación de los rangos de longitudes de onda. Los nuevos espectrómetros deben tener una alta eficiencia para permitir exámenes con una resolución de tiempo alta, pero al mismo tiempo poseer una buena resolución de longitudes de onda, para que puedan ser observadas aisladas al mismo tiempo muchas líneas espectrales. La eficiencia total del espectrómetro resulta del producto de la extensión efectiva, la eficiencia de la rejilla (esta es la fracción de la luz incidente que es desviada en el primer orden de difracción) y la eficiencia probada del detector. La extensión efectiva es el producto de tres magnitudes: superficie iluminada de la rendija de entrada;
 45 ángulo sólido iluminado; proporción de los rayos provenientes de la rejilla que inciden en el detector dentro de su superficie sensible.

- Actualmente no existen rejillas estandarizadas adecuadas para tal aplicación. No obstante, los fabricantes de rejillas como Jobin-Yvon /Horiba (fabricante líder en rejillas holográficas) o Zeiss (especialista en varios productos especiales para óptica, incluidas las rejillas holográficas) disponen de la tecnología para la producción de rejillas holográficas, siempre que sean predeterminados los parámetros de rejilla necesarios para ello.
 50

5 Para ello, sin embargo, es necesaria en primer lugar la determinación de los siete parámetros de una rejilla de difracción holográfica para un espectrómetro VUV correspondiente con un detector plano, de modo que con parámetros de espectrómetro predeterminados (dimensiones, distancias, ángulo, rango de longitudes de onda) se consigue un ancho de líneas mínimo en el detector (promediado a través del rango de longitudes de onda) con una extensión alta (intensidad de luz).

Diseños adecuados de rejillas holográficas corregidas para el espectrómetro desarrollado no están disponibles normalmente en los fabricantes de rejillas.

10 Las rejillas de Rowland para los rangos de longitudes de onda mencionados están parcialmente disponibles. Un uso de tales rejillas conduce de manera desventajosa a espectrómetros que tienen una extensión considerablemente menor (factor 2-10) y una resolución más pobre que la que se puede lograr con rejillas holográficas corregidas.

15 Se ha encontrado en el marco de la invención que para llevar a cabo el objeto debe minimizarse el ancho medio de líneas de las "líneas espectrales" en el plano del detector. Las variables respecto a las cuales se busca el mínimo son los siete parámetros de rejilla. Los parámetros del espectrómetro, tales como por ejemplo las dimensiones, las distancias, los ángulos y el rango de longitudes de onda se especifican en primer lugar como condiciones marginales. En el procedimiento posterior, sin embargo, estos son variados igualmente dentro de anchos de banda correspondientes, que se pueden derivar de peculiaridades mecánicas y/o físicas.

Ejemplos de realización

A continuación son representados los resultados de 4 ejemplos de realización para nuevos diseños de rejilla. Se aplican en este caso las siguientes denominaciones:

20 A. Parámetros de rejilla holográfica:

R: radio mayor del sustrato de rejilla toroidal

ρ : radio menor del sustrato de rejilla toroidal

r_c, r_d : distancias de los puntos de iluminación holográfica desde el origen de rejilla

γ, δ : posición angular de los puntos de iluminación holográfica respecto a la normal a la rejilla

25 λ_L : longitud de onda del láser

B. Parámetros del espectrómetro:

L_A : distancia de la rendija de entrada al centro de la rejilla

r_{S0} : distancia del origen de la rejilla al foco meridional de orden cero

L_B : distancia desde el centro de la rejilla al detector

30 α : ángulo de incidencia de la radiación con respecto a la normal a la rejilla

β : ángulo de reflexión de la radiación respecto a la normal a la rejilla

λ : longitud de onda de la radiación dentro de un rango de longitudes de onda definido anteriormente

G: densidad de líneas en el origen de la rejilla

Ángulo MCP: ángulo de montaje del detector con respecto a la tangente a la rejilla

35 TH: proporción de los rayos de reflexión que inciden en el detector dentro de un rango vertical de una altura predeterminada

Explicación del diseño de rejilla:

40 El diseño 1 ha sido determinado para un espectrómetro en el rango de longitudes de onda de 2,5 nm a 10,5 nm, el diseño 2 para un espectrómetro en un rango de longitudes de onda de 9,0 nm a 24,0 nm, el diseño 3 para un espectrómetro en longitudes de onda de 20 nm a 66 nm y el diseño 4 para un espectrómetro en el rango de longitudes de onda de 60 nm a 160 nm, de modo que todos los cuatro nuevos diseños se utilicen en el experimento de fusión W7-X. En la siguiente descripción de las cuatro figuras 3 a 6, todas las dimensiones se indican en mm y todos los ángulos en °. El origen fue dispuesto en el centro de la rejilla de difracción.

Tabla 1 de los parámetros para las figuras 3 a 6

A. Parámetros de rejilla					
		Figura 3	Figura 4	Figura 5	Figura 6
Radio mayor	R	6451,0	1860	828,2	495,0
Radio menor	ρ	52,0	132,8	165,7	264,2
Distancias de los puntos de iluminación	r_c	328	327	337	362
	r_d	1000	1000	1000	1000
Posición angular de los puntos de iluminación	γ	4,74	-2,65	19,60	32,60
	δ	75,0	75,0	75,0	75,0
Longitud de onda del láser	λ_L	487,98	487,98	487,98	487,98

B. Parámetros del espectrómetro					
		Figura 3	Figura 4	Figura 5	Figura 6
Densidad de líneas	G	1810,27	2074,07	1291,98	875,49
Angulo de incidencia de la radiación	α	-86,0	-76,0	-65,0	-45,0
Angulo de reflexión de la radiación	β_1	83,24	72,11	61,70	40,89
	β_2	78,11	67,00	55,19	34,54
Distancia: rendija de entrada-centro de la rejilla	L_A	450	450	350	350
Distancia: origen de rejilla-foco meridional de orden 0	r_{s0}	450	450	350	350
Angulo de montaje del detector	MCP	79,2	71,1	62,7	47,9
Distancia: centro de rejilla-detector	L_{B1}	447,95	448,42	349,77	352,19
	L_{B2}	446,91	449,50	352,74	359,27
Altura de rendija		3,8	3,8	3,8	3,8
Ancho de rendija		0,22	0,12	0,06	0,06
Altura de rejilla		4,5	8,0	9,0	9,0
Ancho de rejilla		24	24	30	18
Apertura		50	50	15	15

ES 2 764 753 T3

Tabla 2 de los diagramas de puntos y perfiles instrumentales para la Figura 3:

Longitudes de onda	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5
Ancho de líneas óptico	0,0267	0,0261	0,0240	0,0238	0,0283
Ancho de líneas de paso de banda	0,0266	0,0262	0,0246	0,0250	0,0294
Ancho de líneas detectado	0,0285	0,0294	0,0290	0,0304	0,0355
Extensión en 10^{-5} [mm ² sr]	2,8099	3,0091	3,1357	3,0730	2,9735
Transmisión	0,20007	0,21425	0,22327	0,21880	0,21171
Proporción de rayos de reflexión que inciden en el detector a altura predeterminada (TH)	0,90455	0,96596	0,99894	0,98598	0,94938

Tabla 3 relativa a los diagramas de puntos y perfiles instrumentales para la Figura 4:

Longitudes de onda	9,00	12,75	16,50	20,25	24,00
Ancho de líneas óptico	0,0378	0,0372	0,0381	0,0398	0,0426
Ancho de líneas de paso de banda	0,0387	0,0386	0,0394	0,0416	0,0443
Ancho de líneas detectado	0,0454	0,0464	0,0479	0,0505	0,0546
Extensión en 10^{-4} [mm ² sr]	0,97527	1,0125	1,0398	1,0541	1,0296
Transmisión	0,37131	0,38547	0,39587	0,40133	0,39198
Proporción de rayos de reflexión que inciden en el detector a altura predeterminada (TH)	0,93350	0,96922	0,99293	1,0000	0,98658

Tabla 4 relativa a los diagramas de puntos y perfiles instrumentales para la Figura 5:

Longitudes de onda	20,0	31,5	43,0	54,5	66,0
Ancho de líneas óptico	0,0761	0,0799	0,0878	0,0933	0,0998

ES 2 764 753 T3

Ancho de líneas de paso de banda	0,0838	0,0895	0,0964	0,1017	0,1087
Ancho de líneas detectado	0,1136	0,1205	0,1284	0,1347	0,1414
Extensión en 10^{-5} [mm ² sr]	1,9920	2,0524	2,0832	2,0993	2,1113
Transmisión	0,49982	0,51498	0,52271	0,52674	0,52976
Proporción de rayos de reflexión que inciden en el detector a altura predeterminada (TH)	0,94072	0,96369	0,98110	0,99157	0,99695

Tabla 5 relativa a los diagramas de puntos y perfiles instrumentales para la Figura 6:

Longitudes de onda	60,0	85,0	110,0	135,0	160,0
Ancho de líneas óptico	0,1800	0,1753	0,1535	0,1417	0,2079
Ancho de líneas de paso de banda	0,1854	0,1917	0,1721	0,1609	0,2189
Ancho de líneas detectado	0,2586	0,2576	0,2451	0,2389	0,2790
Extensión en 10^{-5} [mm ² sr]	2,0745	2,0890	2,1036	2,1247	2,1309
Transmisión	0,65349	0,65806	0,66266	0,66929	0,67125
Proporción de rayos de reflexión que inciden en el detector a altura predeterminada (TH)	0,97546	0,98487	0,99204	0,99773	0,99968

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la determinación de un conjunto de parámetros de rejilla para la producción holográfica de una rejilla de difracción que presenta un sustrato de rejilla toroidal, para una configuración de espectrómetro VUV,

en el que

- 5 – el rango de longitudes de onda que se va a observar y
- la dimensión del detector están predefinidos,

y en el que el conjunto de parámetros de rejilla, además de la longitud de onda del láser λ_L predeterminada para la iluminación holográfica, comprende

- el radio menor y mayor del sustrato de rejilla toroidal (ρ y R),
- 10 – las dos distancias de los dos puntos de iluminación holográfica desde el origen de rejilla (r_e y r_d), y
- la posición angular de los puntos de iluminación holográfica respecto a la normal a la rejilla (γ y δ),

y en el que como condición marginal son prefijados en primer lugar los siguientes parámetros de espectrómetro

- i. las dimensiones de la rendija de entrada,
- ii. la distancia L_A de la rendija de entrada desde el origen de rejilla,
- 15 iii. la distancia R_{so} desde el origen de rejilla al foco meridional de orden cero, en el que la densidad de líneas de la rejilla no excede de 2500 por mm,
- iv. el ángulo de incidencia y de reflexión de la radiación con respecto a la normal a la rejilla,
- v. la situación y posición angular del detector, incidiendo luz de primer orden desde la rejilla sobre el detector,
- vi. anchura y altura de la rejilla de difracción,

20 en el que

- a) el radio mayor R del sustrato de rejilla toroidal es determinado a partir de la condición de focalización meridional de orden cero,
- b) el radio menor ρ del sustrato de rejilla toroidal, la densidad de líneas G en el centro de rejilla y la longitud de onda λ_m en el centro de detector son determinados de forma iterativa a través de la ecuación de rejilla, así como a
- 25 través de la condición de focalización sagital para el primer orden de difracción,
- c) de las 4 variables que quedan, concretamente las distancias de los dos puntos de iluminación holográfica desde el origen de rejilla (r_e y r_d), así como sus posiciones angulares con respecto a la normal a la rejilla (γ y δ), es eliminado uno de los dos ángulos (γ) mediante el conocimiento del número medio de líneas de la rejilla,
- d) el mínimo de la magnitud $\Delta\lambda$, el ancho de líneas medio en el detector a través de todas las longitudes de onda del
- 30 rango de longitudes de onda que se observan, es determinado de forma iterativa como función de las tres variables que quedan (distancias r_c , r_D , y ángulo δ), siendo considerado como solución el conjunto de variables r_c , r_D , y δ para el que $\Delta\lambda$ adopta un mínimo absoluto.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que sobre la base de los parámetros de rejilla determinados y las condiciones marginales del espectrómetro prefijadas en este caso son determinados el ancho medio de líneas y la extensión efectiva.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 2, en el que las etapas a) a d) son repetidas para al menos diez configuraciones diferentes de dimensiones de rejilla y/o rendija y/o longitudes de brazo, en correspondencia a los puntos i. hasta iii. en la reivindicación 1.

4. Programa informático, que puede ser cargado en una memoria de un ordenador digital, con un código de software para llevar a cabo un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3.

5. Sistema informático con un programa informático según la reivindicación anterior.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que los parámetros de rejilla determinados son usados para la producción de una rejilla de difracción.

7. Procedimiento para la producción de una rejilla de difracción,

ES 2 764 753 T3

- en el que la longitud de onda del láser para la iluminación holográfica está fijada en $(\lambda_L) = 487,98$ nm,
 - en el que está establecido el rango de longitudes de onda de 2,5 a 10,5 nm, y
 - en el que se emplean los siguientes parámetros de rejilla que fueron determinados por un procedimiento según las reivindicaciones 1 a 3:
- 5 radio mayor del sustrato de rejilla toroidal $(R) = 6451$ mm,
radio menor del sustrato de rejilla toroidal $(\rho) = 52,0$ mm,
distancias de los puntos de iluminación desde el origen de rejilla $(r_c) = 328$ mm, $(r_d) = 1000$ mm,
posición angular de los puntos de iluminación con respecto a la normal a la rejilla $(\gamma) = 4,74$ y $(\delta) = 75,0$.
8. Procedimiento para la fabricación de una rejilla de difracción,
- 10 – en el que está fijada la longitud de onda del láser para la iluminación holográfica en $(\lambda_L) = 487,98$ nm,
– en el que el rango de longitudes de onda está establecido de 9 a 24 nm, y
– en el que se emplean los siguientes parámetros de rejilla que fueron determinados mediante un procedimiento según las reivindicaciones 1 a 3:
radio mayor del sustrato de rejilla toroidal $(R) = 1860$ mm,
- 15 radio menor del sustrato de rejilla toroidal $(\rho) = 132,8$ mm,
distancias de los puntos de iluminación desde el origen de rejilla $(r_c) = 327$ mm, $(r_d) = 1000$ mm,
posición angular de los puntos de iluminación con respecto a la normal a la rejilla $(\gamma) = -2,65$ y $(\delta) = 75,0$.
9. Procedimiento para la fabricación de una rejilla de difracción,
- en el que está fijada la longitud de onda del láser para la iluminación holográfica en $(\lambda_L) = 487,98$ nm,
- 20 – en el que el rango de longitudes de onda está fijado desde 20 a 66 nm, y
– en el que se emplean los siguientes parámetros de rejilla que fueron determinados por un procedimiento según las reivindicaciones 1 a 3:
radio mayor del sustrato de rejilla toroidal $(R) = 828,2$ mm,
radio menor del sustrato de rejilla toroidal $(\rho) = 165,7$ mm,
- 25 distancias de los puntos de iluminación desde el origen de rejilla $(r_c) = 337$ mm, $(r_d) = 1000$ mm,
posición angular de los puntos de iluminación con respecto a la normal a la rejilla $(\gamma) = 19,6$ y $(\delta) = 75,0$.
10. Procedimiento para la producción de una rejilla de difracción,
- en el que la longitud de onda del láser para la iluminación holográfica está fijada en $(\lambda_L) = 487,98$ nm,
 - en el que el rango de longitudes de onda está fijado desde 60 a 160 nm, y
- 30 – en el que se emplean los siguientes parámetros de rejilla que fueron determinados por un procedimiento según las reivindicaciones 1 a 3:
radio mayor del sustrato de rejilla toroidal $(R) = 495$ mm,
radio menor del sustrato de rejilla toroidal $(\rho) = 164,2$ mm,
distancia de los puntos de iluminación del origen de rejilla $(r_c) = 362$ mm, $(r_d) = 1000$ mm,
- 35 posición angular de los puntos de iluminación con respecto a la normal a la rejilla $(\gamma) = 32,6$ y $(\delta) = 75,0$.

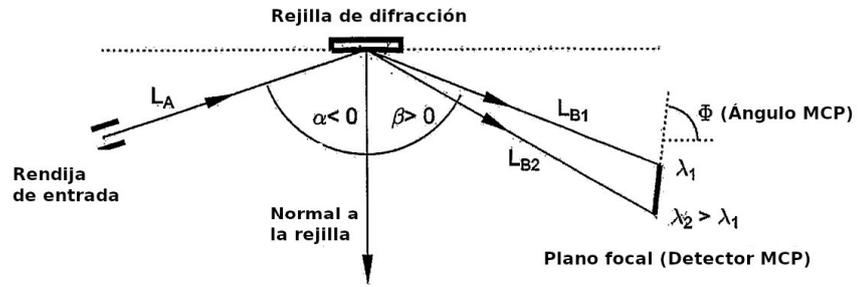


Figura 1

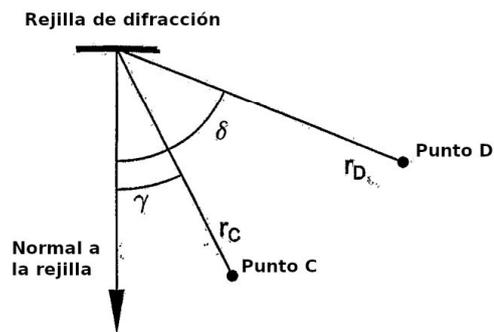


Figura 2

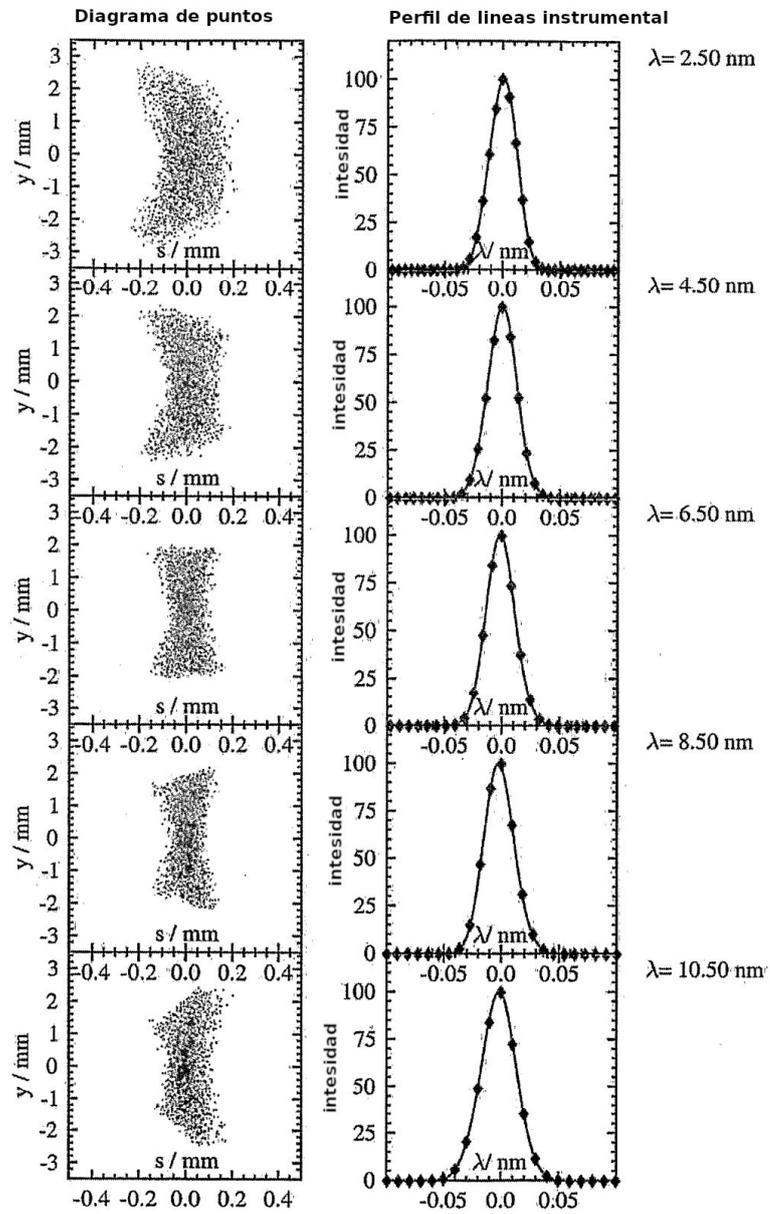


Figura 3

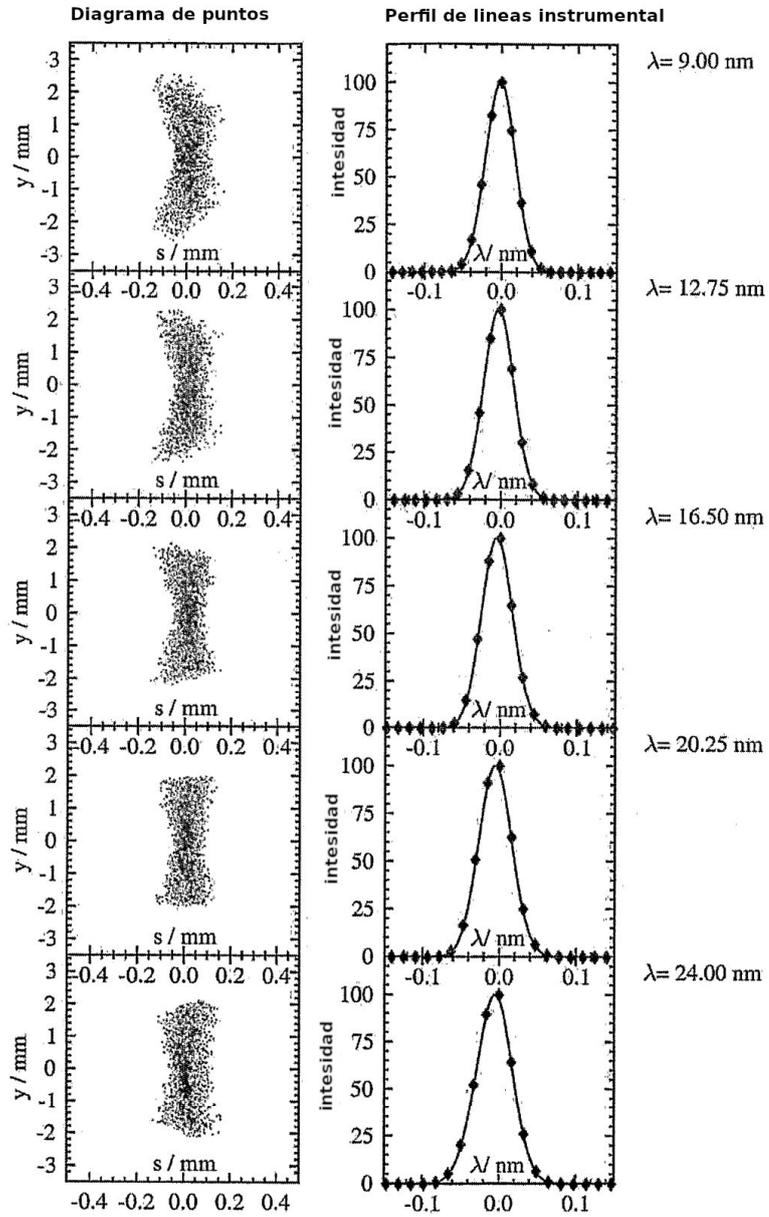


Figura 4

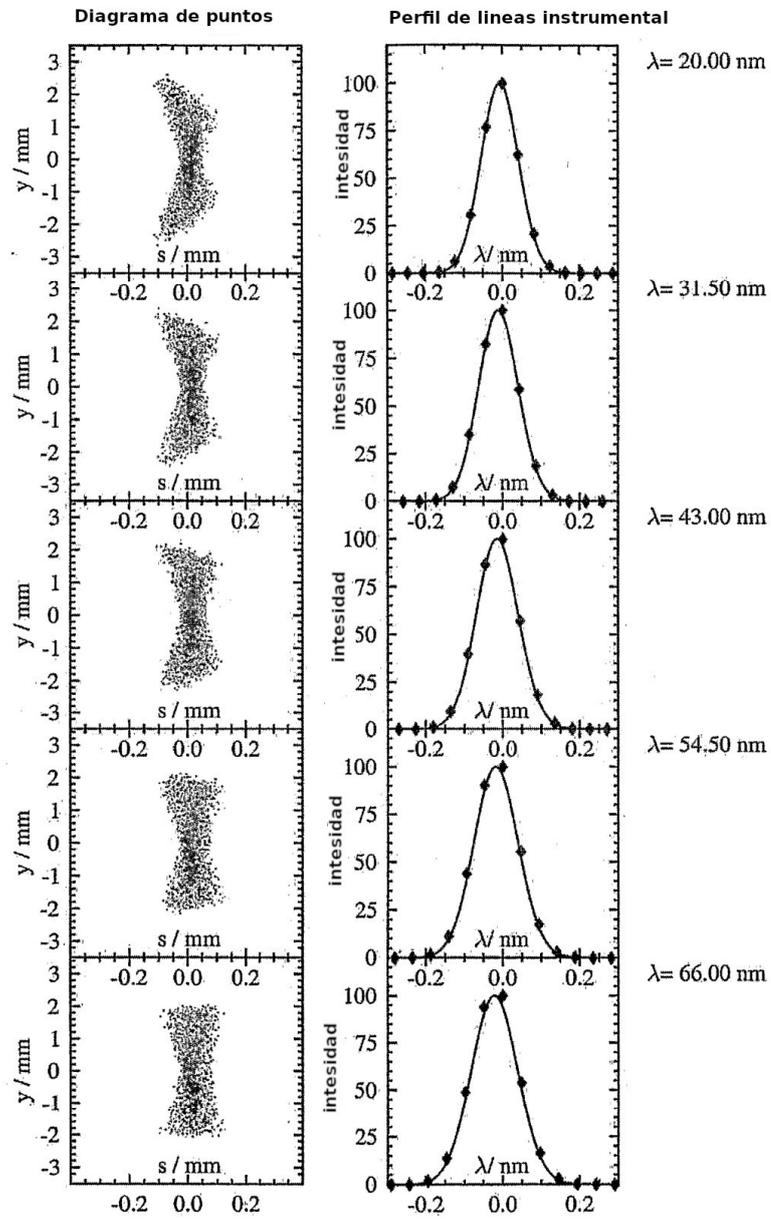


Figura 5

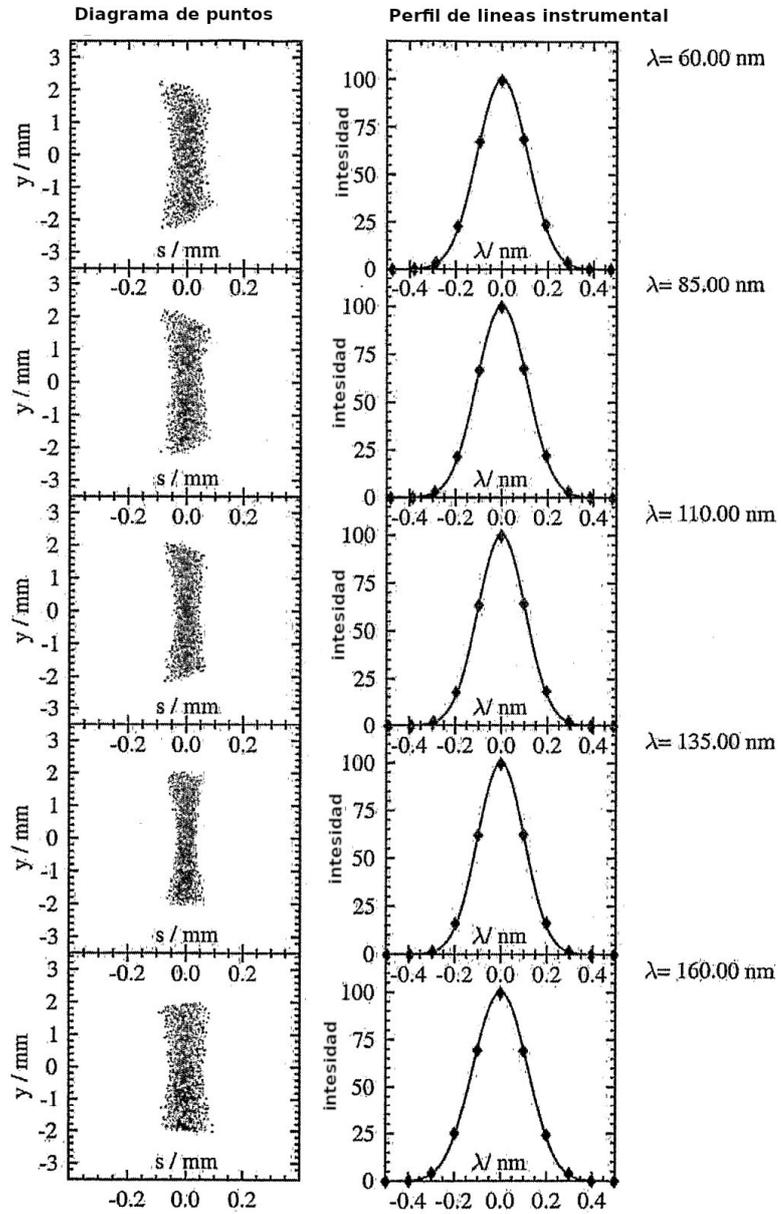


Figura 6