

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 540 928**

51 Int. Cl.:

G01T 1/29 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.04.2005 E 05735755 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.06.2015 EP 1740975**

54 Título: **Obtención de imágenes de alta resolución**

30 Prioridad:

29.04.2004 GB 0409572

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

14.07.2015

73 Titular/es:

**PHASE FOCUS LTD (100.0%)
40 LEAVYGREAVE ROAD
SHEFFIELD S3 7RD, GB**

72 Inventor/es:

**RODENBURG, JOHN MARIUS y
FAULKNER, HELEN MARY LOUISE**

74 Agente/Representante:

LAZCANO GAINZA, Jesús

ES 2 540 928 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

Obtención de imágenes de alta resolución

5 La presente invención se refiere a un método y aparato para proporcionar datos de imagen a partir de los cuales puede generarse una imagen de un objeto destino. Los datos de imagen proporcionan información de alta resolución acerca de la estructura del objeto destino y permiten que la imagen resultante sea de una alta resolución. Particular, pero no exclusivamente, la presente invención se refiere a un método y aparato para proporcionar imágenes de resolución de longitud de onda limitada sin la necesidad de un posicionamiento de alta precisión de la radiación incidente, usada para sondear un destino, con relación a dicho destino.

10 Muchos tipos de técnicas de obtención de imágenes son conocidas por derivar información espacial acerca de un objeto destino (o muestra). En la obtención de imágenes de transmisión convencional un objeto se irradia por iluminación de onda plana 10. Las ondas dispersadas por el objeto se vuelven a interferir por una lente 12 para formar una imagen, como se muestra en la Figura 1A. En el caso de la obtención de imágenes de longitud de onda muy corta (rayos X o electrones) esta técnica tiene muchas dificultades conocidas asociadas con aberraciones e inestabilidades introducidas por la lente que limitan la resolución y la interpretación de la imagen resultante. La resolución alcanzable típica es muchas veces mayor que el límite de longitud de onda teórico. La obtención de imágenes de transmisión de exploración convencionales es otro ejemplo de tal técnica de obtención de imágenes en la cual una lente se usa para enfocar un punto de radiación a través de un objeto destino. Uno o más detectores se localizan en el lado posterior al destino de un objeto destino para detectar la radiación dispersada. Se conocen varios tipos de estrategias de detectores tales como detectores anulares, detectores de cuadrantes y/o detectores de acceso externo. Sin embargo estos métodos se basan en la exploración del punto focal de la radiación a todos los puntos donde se requiere una imagen del objeto destino. Hay un número de problemas asociados con tales técnicas tal como el hecho de que se requiere un control muy preciso del punto debido a que si se desea una imagen de 1000 x 1000 píxeles deben usarse un millón de puntos de posición de la sonda precisos Otro problema es que la lente usada deberá ser de una calidad muy alta. Esto no solamente se debe a que la resolución de la imagen final es sólo tan buena como la nitidez y la localización del punto sino también se debe a que con varias formas de radiación tales como los electrones o rayos X hay muchos problemas tales como efectos de aberración, propagación cromática e inestabilidad actual de la lente que pueden afectar la producción de la imagen y pueden arruinar la resolución. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 1B en la cual la radiación incidente 15 tal como un haz de electrón o de rayos X incide sobre una muestra 16 que forma un objeto destino. La radiación dispersada por el objeto sale del objeto destino y se propaga sobre el plano detector 17.

35 Los problemas conocidos con la obtención de imágenes de transmisión de exploración convencionales son que las imágenes toman un tiempo largo para completarse debido al número de puntos que debe sondearse con el punto incidente de radiación. Si el objeto destino se mueve durante la recolección de datos esto puede conducir a que se recojan datos inexactos y se produzcan en última instancia imágenes inexactas. Además los métodos de obtención de imágenes de transmisión de exploración convencionales no permiten que la información con relación a la fase de la radiación salga del objeto destino que se mide. Solamente puede medirse la intensidad de dispersión total en los detectores. Como tal no puede recogerse la información de fase con relación a la onda de salida que emanó más allá del objeto destino.

45 Una modificación de la obtención de imágenes de transmisión de exploración convencionales es la obtención de imágenes de deconvolución en cuatro dimensiones. Esto utiliza un aparato similar al que se muestra en la Figura 1 pero registra un patrón de difracción entero para cada posición de sonda. Esto proporciona una manera de determinar la estructura del objeto destino en una mejor resolución que el tamaño del punto o función de respuesta de la lente usada pero tiene un número de problemas mayor. El problema más notable es que deberán registrarse enormes cantidades de datos que toman horas recolectar para un campo razonable de visión. Esto hace el experimento prácticamente muy difícil de llevar a cabo debido a que es esencial controlar la iluminación de sondeo con mucha precisión y moverla con precisión para explorar cada (millones) de píxeles para la reconstrucción de la imagen final. Además pueden producirse daños severos al objeto destino debido a que se requieren grandes dosis de radiación incidente para los grandes tiempos empleados.

55 Otra técnica de obtención de imágenes bien conocida es la obtención de imágenes difractivas puras. En esta estrategia alternativa puede omitirse la lente y se ilumina un objeto destino por una onda plana sencilla de radiación de sondeo. El patrón de dispersión medido en el campo lejano forma un patrón de difracción plano de Fourier y puede registrarse la intensidad de este. Se usa entonces un método iterativo mediante la aplicación de información derivada de la intensidad medida para calcular un campo de onda de salida del objeto estimado. Para determinar la información real acerca del objeto destino a partir del campo de onda estimado debe proporcionarse un área en el espacio real donde se conoce que el objeto está ausente o enmascarado de alguna manera definida. Sólo conociendo este hecho puede alterarse de manera iterativa un valor estimado de funcionamiento del campo de onda que representa el objeto. Hay sin embargo una multitud de problemas asociados con la obtención de imágenes difractivas puras. Más notablemente el objeto destino debe excluirse o aislarse en alguna localización fija de alguna manera. Esto es prácticamente muy difícil de lograr. Además no es posible extender la solución a las partes nuevas o diferentes del objeto u obtener una imagen grande de buena resolución. Solamente una región aislada de un objeto puede iluminarse y solucionarse. Además el

objeto destino debe ser de un valor único. Es decir, debe representarse por un único número real. Ese número puede representar una absorción o un cambio de fase pero no puede representar ambos. De hecho la mayoría de las ondas de objeto destino reales (que es la función de onda que sale de un objeto destino) aparecen como números complejos que tienen componentes tanto de fase como de amplitud.

5

Otro gran problema con la obtención de imágenes difractivas puras es que el borde del objeto destino debe estar claramente definido y por lo tanto tener un borde distinto. Esto es de manera que está bien definida un área donde se conoce que el objeto está ausente o enmascarado de alguna manera. En la práctica es difícil producir un objeto o abertura que tiene tal borde definido.

10

Otros problemas son que para los objetos que se dispersan débilmente, que es un tipo común de objeto destino en la dispersión de rayos X y de electrones, la mayor parte de la radiación que pasa a través del objeto termina en el centro del patrón de difracción. Se pierde la información en esta zona ya que no ayuda en el proceso de obtención de imágenes pero la radiación que pasa a través del objeto puede dañar el objeto. Además se requiere iluminación paralela. Sin embargo esto significa que para una fuente de brillo dado se proporcionan relativamente pocos conteos en el plano objeto. En combinación con el hecho de que la cantidad de radiación que pasa a través de los objetos que se dispersan débilmente termina en una zona central como se mencionó anteriormente significa que todo el experimento en la práctica toma mucho tiempo para obtener suficientes conteos. Si durante la etapa de recolección de datos el objeto o algún otro aparato de obtención de imágenes se desvía o se mueve durante la exposición pueden arruinarse los datos.

20

Un método para encontrar esta solución que ha ganado considerable interés es el método iterativo sugerido por primera vez por Gerchberg y Saxton [R. W. Gerchberg and W. O. Saxton. *Optik*, 35(2): 237-246, 1972]. Tales métodos iterativos se han aplicado recientemente a la geometría ilustrada en la Figura 2 tanto para los electrones como para los rayos X. En este arreglo la radiación incidente 20 se dirige a una muestra 21 que forma un objeto destino. El objeto destino dispersa la radiación incidente en un intervalo angular amplio que forma un patrón de difracción en un plano de difracción 22. El patrón de difracción en el plano de difracción 22 puede registrarse mediante cualquier método adecuado tal como una película fotográfica o detector de CCD. La ventaja experimental de la difracción es que se determina la condición de interferencia solamente por la dispersión dentro del propio objeto destino, y así se evitan las graves dificultades implícitas por el uso de una lente de longitud de onda corta.

25

30

La US 6,049,074 describe un dispositivo de conversión fotoeléctrica para su uso en un aparato de obtención de imágenes de rayos X digital, y capaz de convertir la energía de rayos X incidentes en luz visible.

35

La US 2004/000630 describe un sistema de obtención de imágenes de exploración de conversión directa de alta energía que tiene un sensor capaz de convertir los rayos X incidentes en una señal electrónica.

40

La EP1120086 se refiere a un dispositivo de mamografía que detecta la radiación dispersada coherentemente de ángulo reducido cuando un objeto se irradia por una radiación penetrante, para determinar ciertas características del objeto irradiado. FAULKNER H M L y otros: "Moveable aperture lensless microscopy: a novel phase retrieval algorithm", *ELECTRON MICROSCOPY AND ANALYSIS 2003. INSTITUTE OF PHYSICS ELECTRON MICROSCOPY AND ANALYSIS GROUP CONFERENCE 3-5 DE SEPT. DE 2003 OXFORD, RU*; [INSTITUTE OF PHYSICS CONFERENCE SERIES, ISSN 1755-1315; VOL.179], INSTITUTE OF PHYSICS PUBL, BRISTOL, vol. 179, 18 de febrero de 2004 (2004-02-18), páginas 337-340 describe un método para proporcionar datos de imagen de una región de un objeto destino, proporcionando la radiación incidente desde una fuente de radiación en el objeto destino, detectar la intensidad de la radiación dispersada por el objeto destino a través de un detector y haciendo uso de una abertura brusca móvil y un proceso iterativo. Es un objetivo de las modalidades de la presente invención mitigar al menos parcialmente los problemas mencionados anteriormente. Es una modalidad adicional de la presente invención proporcionar un método y aparato para proporcionar datos de imagen que pueden usarse para construir una imagen de alta resolución de un objeto destino que utiliza las ventajas de las técnicas iterativas pero sin las desventajas de los métodos iterativos de la técnica anterior.

45

50

Es un objetivo de las modalidades de la presente invención proporcionar un método y aparato para proporcionar datos de imagen que pueden usarse para construir una imagen de alta resolución de un objeto destino sin la necesidad de usar técnicas de posicionamiento de alta resolución para posicionar la radiación incidente con relación a un objeto destino o para soportar un destino en una localización bien definida.

55

Es un objetivo de las modalidades de la presente invención proporcionar un método de microscopía de transmisión adecuado para todas las formas de radiación que tienen una resolución que no dependen del uso de una lente y/o una onda de referencia holográfica y/o cualquier forma de interferometría de campo lejano.

60

Es un objetivo de las modalidades de la presente invención proporcionar un método y aparato para proporcionar datos de imagen que pueden usarse para generar una imagen de resolución de longitud de onda limitada. La imagen puede ser de una parte de un objeto destino o, si la estructura destino está bien definida, de la radiación en una localización seleccionada en la trayectoria experimental.

65

De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención se proporciona un método para proporcionar datos de imagen para construir una imagen de alta resolución de una región de un objeto destino, que comprende las etapas de: proporcionar radiación incidente, a partir de una fuente de radiación, en el objeto destino; mediante al menos un detector, detectar la intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino con una abertura posterior al objeto destino en una primera posición con respecto al objeto destino, volver a posicionar la abertura con relación al objeto destino, detectar subsecuentemente la intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino con la abertura en una segunda posición con respecto al objeto destino; o mediante al menos un detector, detectar la intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino con la radiación incidente en una primera posición con respecto al objeto destino, volver a posicionar la radiación incidente con relación al objeto destino, detectar subsecuentemente la intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino con la radiación incidente en una segunda posición con respecto al objeto destino; y seleccionar dicha segunda posición de manera que una primera área de la región del objeto destino seleccionada en dicha primera posición se solapa al menos en parte con una segunda área de la región del objeto destino determinada en dicha segunda posición; y en respuesta a al menos la intensidad detectada en dichas primera y segunda posiciones, proporcionar dichos datos de imagen mediante un proceso iterativo y mediante el uso de una función de transmitancia suavemente variable o función de iluminación móvil con respecto a dicho objeto destino en donde la transmitancia suavemente variable o función de iluminación es una función de ancho de banda limitado no compuesta de frecuencias espaciales altas.

De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención se proporciona un aparato para proporcionar datos de imagen para generar una imagen de alta resolución de una región de un objeto destino, que comprende: el medio de localización que localiza un objeto destino en una localización predeterminada; una fuente de radiación para proporcionar radiación incidente a un objeto destino localizado por dicho medio de localización; al menos un dispositivo detector para detectar una intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino; el medio de localización que localiza la radiación incidente en una primera y segunda posiciones con respecto a dicho objeto destino; o el medio de localización que localiza una abertura, localizada posterior al objeto destino, en una primera y segunda posiciones con respecto a dicho objeto destino; y seleccionar dicha segunda posición de manera que una primera área de la región del objeto destino determinada en dicha primera posición se solapa al menos en parte con una segunda área de la región del objeto destino determinada en dicha segunda posición; y el medio de procesamiento que proporciona dichos datos de imagen en respuesta a una intensidad detectada de la radiación dispersada en la primera y segunda posiciones mediante un método iterativo y mediante el uso de una función de transmitancia suavemente variable o función de iluminación, en donde la transmitancia suavemente variable o función de iluminación es una función de ancho de banda limitado no compuesta de frecuencias espaciales altas.

Preferentemente los métodos proporcionan datos de imagen que tienen una resolución de longitud de onda sustancialmente limitada.

Convenientemente los datos de imagen para la región del objeto destino se proporcionan sustancialmente en tiempo real.

Favorablemente la radiación incidente comprende un campo de onda sustancialmente localizado.

De acuerdo con un tercer aspecto de la presente invención se proporciona un producto de programa de computadora de acuerdo con la reivindicación 31.

Las modalidades de la presente invención usan un método iterativo para proporcionar datos de imagen que pueden usarse para construir una imagen de resolución de longitud de onda limitada de una región de un objeto destino. Un haz suavemente enfocado es incidente en un objeto destino o se posiciona una abertura móvil aguas abajo del objeto. Se recogen uno, dos o más patrones de difracción o bien por el movimiento del objeto destino o por el movimiento de la abertura de manera que se permite que se detecte una región diferente de una función de onda de salida del objeto. Favorablemente la abertura puede moverse distancias relativamente grandes (la mitad del ancho de la abertura o más) antes de que se registren los patrones de dispersión en las posiciones. Esto significa que el método de la presente invención puede explorar grandes campos de visión y obtener imágenes de muy alta resolución en tiempo real. Alternativamente en lugar de mover el destino o abertura puede cambiarse una característica preseleccionada de la sonda u objeto.

Las modalidades de la presente invención se describirán ahora de aquí en adelante en la presente invención, a modo de ejemplo solamente, con referencia a los dibujos acompañantes, en los cuales:

Las Figuras 1A y 1B ilustran el uso de la obtención de imágenes de transmisión convencionales y la obtención de imágenes de transmisión de exploración convencionales respectivamente;
 La Figura 2 ilustra cómo la difracción no limita el intervalo angular;
 La Figura 3 ilustra cómo un arreglo de aberturas en movimiento permite un gran campo de visión a medir;
 La Figura 4 ilustra el movimiento de una abertura posterior al objeto destino;
 La Figura 5 ilustra cómo una sonda enfocada en movimiento permite un gran campo de visión a medir;

La Figura 6 ilustra un incidente de la sonda en un objeto destino;
 La Figura 7 ilustra un algoritmo de recuperación de fase;
 La Figura 8 ilustra los resultados de intensidad y fase;
 La Figura 9 ilustra los resultados de intensidad y fase adicionales con ruido añadido;
 Las Figuras 10A, 10B y 10C ilustran maneras alternativas en las cuales puede proporcionarse radiación a un objeto destino;
 Las Figuras 11A y 11B ilustran cómo las modalidades de la presente invención pueden proporcionar un perfilómetro de superficie; y
 La Figura 12 ilustra el aparato para proporcionar datos de imagen.

En los dibujos los mismos números de referencia se refieren a partes similares.

La Figura 3 ilustra cómo un patrón de dispersión puede desarrollarse y utilizarse para determinar información de alta resolución sobre la estructura de un objeto destino. Se entenderá que el término objeto destino se refiere a cualquier muestra o elemento colocado en la trayectoria de la radiación incidente que provoca la dispersión de la radiación. Se entenderá que el objeto destino debe ser al menos parcialmente transparente a la radiación incidente. El objeto destino puede o no tener algún tipo de estructura repetitiva.

La radiación incidente 30 es provocada por caer sobre el objeto destino 31. Debe entenderse que el término radiación generalmente se interpretará como la energía de una fuente de radiación. Esto incluirá la radiación electromagnética incluyendo rayos X, partículas emitidas como los electrones y/u ondas acústicas. Dicha radiación puede representarse por una función de onda $\Psi(r)$. Esta función de onda incluye una parte real y una parte imaginaria como se entenderá por los expertos en la técnica. Esto puede representarse por el módulo de las funciones de onda y fase. $\Psi(r)^*$ es el conjugado complejo de $\Psi(r)$ y $\Psi(r)\Psi(r)^* = |\Psi(r)|^2$ donde $|\Psi(r)|^2$ es una intensidad que puede medirse por la función de onda.

La radiación incidente 30 se dispersa a medida que pasa a través de y más allá de la muestra 31. Como tal la función de onda de la radiación incidente a medida que sale de la muestra será modificada en amplitud y fase con respecto a la función de onda de la radiación incidente próximo al objetivo previo de la muestra. La dispersión que se produce puede incluir difracción de Fourier, refracción y/o difracción de Fresnel y cualquier otra forma de dispersión en la cual las características de la radiación incidente se modifican como resultado de la propagación después de la muestra. Si una disposición de detectores tal como un detector de CCD 32 se dispone a una larga distancia de la muestra entonces el patrón de difracción se forma en un plano de difracción 33. Se formará un patrón de difracción de Fourier si los detectores 32 se encuentran a una distancia D de la muestra donde D es lo suficientemente larga como para que el patrón de difracción se forme eficazmente de una fuente puntual. Si el plano de difracción se forma más cerca de la muestra, mediante la localización de los detectores más cercanos, se formará un patrón de difracción de Fresnel. Una abertura 34 se encuentra posterior al objeto destino para seleccionar de este modo la región del objeto de la investigación. La abertura se forma en una cubierta de manera que la abertura define el "soporte". El soporte está en el área de una función donde esta función no es cero. En otras palabras fuera del soporte de la función es cero. Fuera del soporte de la cubierta de bloques de la transmitancia de la radiación. A diferencia de las aberturas de las técnicas de la técnica anterior para su uso con la presente invención no necesitan ser infinitas y claramente definidas. Pueden moverse y variar lentamente en sus bordes. De esta manera la función de iluminación suavemente variable o transmitancia no se compone de frecuencias espaciales altas. En otras palabras es una función de ancho de banda limitado. Ya que no se usa ninguna lente puede medirse un gran campo de visión por los detectores 32. El término abertura describe una función de transmisión localizada de radiación. Este puede representarse por una variable compleja en dos dimensiones que tienen un valor modular entre 0 y 1. Un ejemplo es una cubierta que tiene una región con una abertura física con variación de la transmitancia.

La Figura 4 ilustra esquemáticamente la propagación de ondas a través de la disposición de la Figura 3. La radiación incidente 30 cae sobre el lado aguas arriba de la muestra 31 y se dispersa por la muestra, cuando se transmite. Una onda de muestra $O(r)$ es una función de onda de salida de la radiación después de la interacción con el objeto 31. De este modo $O(r)$ representa una función compleja de dos dimensiones de manera que cada punto en $O(r)$, donde r es un vector bidimensional de coordenadas, se asocia con un número complejo. $O(r)$ representará físicamente una onda de salida que emanaría del objeto que está iluminado por una onda plana. Por ejemplo, en el caso de la dispersión de electrones, $O(r)$ representaría la alteración de fase y amplitud introducida en una onda incidente como resultado de pasar a través del objeto de interés. La abertura 34 proporciona una función de sonda de $P(r)$ (o función de filtrado) que selecciona una parte de la función de onda de salida objeto para el análisis. Se entenderá que en lugar de seleccionar una abertura de una rejilla de transmisión u otra con función de filtrado puede situarse aguas abajo de la función objetivo. La función de sonda de $P(r-R)$ es una función de transmisión de abertura donde dicha abertura se encuentra en la posición R . La función de sonda puede representarse como una función compleja cuyo valor complejo se da por un módulo y una fase los cuales representan las alteraciones de módulo y la fase introducidas por la sonda en una onda plana perfecta incidente sobre ella.

La función de onda de salida $\psi(r,R)$ 43 es una función de onda de radiación medida a la salida de la abertura. Esta onda

de salida $\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{R})$ 43 forma un patrón de difracción $\Psi(\mathbf{k}, \mathbf{R})$ 44 en un plano de difracción 33. Aquí \mathbf{r} es un vector de coordenadas en el espacio real y \mathbf{k} es un vector de coordenadas en el espacio de difracción.

5 La Figura 5 ilustra una modalidad adicional de la presente invención en la cual no se requiere abertura. En esta la radiación incidente 50 cae sobre una primera superficie del objeto destino 51. La radiación incidente se dispersa en la muestra y la radiación transmitida se propaga a través de un plano de difracción 52 donde se forma el patrón de difracción.

10 La Figura 6 ilustra este proceso con más detalles. La radiación 50 se enfoca aproximadamente, por ejemplo mediante una lente débil, de modo que se ilumine la región de la primera superficie del objeto destino. La lente débil puede por supuesto comprender cualquier aparato de enfoque apropiado, tal como un conjunto de placas y un suministrador de voltaje para un haz de electrones o una superficie reflectante de rayos X. Este débil enfoque es suficiente para limitar sustancialmente el haz de radiación de sondeo. Por lo tanto, no es necesario enfocar la radiación aunque por supuesto la radiación fuertemente enfocada se podría utilizar. Aquí el objeto destino proporciona una función objetivo $O(\mathbf{r})$ que representa la alteración de fase y amplitud introducida en una onda incidente como resultado de pasar a través del objeto de interés. La radiación de iluminación incidente sobre el objeto destino representa una función de sonda $P(\mathbf{r})$ que forma una función de iluminación tal como la que se genera por un perfil cáustico o de iluminación que se forma por una lente u otro componente óptico. $P(\mathbf{r})$ es el valor estacionario complejo de este campo de onda calculado en el plano objeto. La función de onda de salida $\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{R})$ 63 define la radiación dispersada cuando sale de la superficie aguas abajo del objeto destino. Como esta onda de salida se propaga a través del espacio se formará un patrón de difracción $\Psi(\mathbf{k}, \mathbf{R})$ 64 en un plano de difracción 33. Se entenderá que tanto con la modalidad de abertura formada ilustrada en la Figura 4 y la modalidad de no abertura descrita con respecto a la Figura 6 si el plano de difracción en el que se detecta la radiación dispersada se mueve más cerca de la muestra se detectan los patrones de difracción de Fresnel en lugar de los patrones de difracción de Fourier. En tal caso la función de propagación de la onda de salida $\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{R})$ para el patrón de difracción $\Psi(\mathbf{k}, \mathbf{R})$ será una transformada de Fresnel en lugar de una transformada de Fourier.

La Figura 7 ilustra un algoritmo para obtener una función de onda de un objeto y por lo tanto obtener datos de imagen que pueden usarse subsiguientemente para generar imágenes de alta resolución de un objeto. La Figura 7 ilustra un posible método mediante el uso de la primera modalidad de la presente invención ilustrada en las Figuras 3 y 4 y el movimiento de la abertura desde una primera posición después de medir el patrón de difracción a una segunda posición donde puede medirse un segundo patrón de difracción respectivo. Debe entenderse que las modalidades de la presente invención pueden usar una o más posiciones para la abertura. Además las modalidades de acuerdo con las Figuras 5 y 6 pueden usarse de manera que en lugar de mover la abertura puede seleccionarse la localización donde la radiación débilmente enfocada cae en la muestra.

35 Como se mencionó anteriormente $O(\mathbf{r})$ y $P(\mathbf{r})$ representan las funciones complejas en dos dimensiones, es decir, cada punto en $O(\mathbf{r})$ o $P(\mathbf{r})$, donde \mathbf{r} es una coordenada en dos dimensiones, se ha asociado con un número complejo. A continuación, $O(\mathbf{r})$ representará físicamente una onda de salida que emanaría de una función objetivo que se ilumina por una onda plana. Por ejemplo, en el caso de la dispersión de electrones, $O(\mathbf{r})$ representaría la alteración de la fase y la amplitud introducida en una onda incidente como resultado de pasar a través del objeto de interés.

A continuación $P(\mathbf{r})$ representa o bien una función de iluminación, tal como la generada por un perfil cáustico o perfil de iluminación formado por una lente u otro componente óptico (por ejemplo como se muestra en las Figuras 5 y 6, se entiende que $P(\mathbf{r})$ es el valor fijo complejo de este campo de ondas calculado en el plano de la función objetivo) o una función de filtrado, tal como una abertura o rejilla de transmisión montada aguas abajo de la función objetivo (como se muestra en las Figuras 3 y 4).

Puede suponerse a continuación que $O(\mathbf{r})$ o $P(\mathbf{r})$ puede moverse uno respecto al otro por varias distancias \mathbf{R} . La nomenclatura adoptada se escribe en términos del movimiento $P(\mathbf{r})$, aunque equivalentemente podríamos mover en su lugar a $O(\mathbf{r})$ con relación a $P(\mathbf{r})$. En ambas situaciones, el valor complejo de $O(\mathbf{r})$ se altera mediante la formación del producto de $O(\mathbf{r})$ con $P(\mathbf{r}-\mathbf{R})$ para dar una función de onda de salida total de $\psi(\mathbf{r})$, es decir

$$\psi(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = O(\mathbf{r}) P(\mathbf{r}-\mathbf{R}) \quad \dots 1$$

55 Esto generalmente será satisfecho. Debe notarse que hay muy pocas restricciones prácticas o bien en la función objetivo o en la función de sonda/abertura. Ninguna función puede ser una onda plana, o periódica con una distancia de repetición que es un múltiplo de la diferencia entre valores diferentes para \mathbf{R} . Esto se debe a que el algoritmo requiere varias mediciones que son diferentes para que funcione. En la práctica experimental estos criterios son fáciles de satisfacer.

60 El algoritmo funciona para encontrar la fase y la intensidad de la función compleja $\psi(\mathbf{r}, \mathbf{R})$. Se requiere como conocimiento de entrada de la función $P(\mathbf{r}-\mathbf{R})$, y una o más (preferentemente varias) mediciones de la intensidad de la función de onda en un plano que es diferente al que contiene la muestra. Es conveniente usar el plano de difracción,

que se relaciona con el plano de la muestra por la transformada de Fourier. En este caso los datos de entrada medidos son las intensidades de los patrones de difracción en una o más posiciones de sonda/abertura. Usar los datos de difracción tiene varias ventajas, que incluyen la facilidad de recolección, no hay requisitos para enfocar la función de onda de salida en una imagen, y el aumento de resolución alcanzado por la medición de los datos en ángulos altos.

Sin embargo también es posible ejecutar el algoritmo en base a un conjunto de imágenes desenfocadas medidas a cierta distancia de la superficie de salida de la muestra/abertura. En esta situación el propagador espacial libre se sustituye por la transformada de Fourier.

El algoritmo no se restringe al uso de estas dos transformadas. Otras transformadas eficaces podrían usarse para pasar de un plano de información al otro. A continuación una transformada general T se refiere a que se transforma una función de onda del primer plano, llamado plano 1, al segundo plano, llamado plano 2.

El algoritmo funciona como sigue y con referencia a la Figura 7:

1. Iniciar en la etapa S700 con una suposición en la función objetivo $O_{g,n}(\mathbf{r})$, donde el subíndice g,n representa una onda supuesta en la iteración n del algoritmo. Estas funciones están en el plano 1 (que es el plano espacial real si se usa la transformada de Fourier). Preferentemente la primera suposición de $O_{g,n}(\mathbf{r})$ es igual a la unidad en todos los puntos \mathbf{r} . Esto corresponde a una muestra ausente.
2. Se selecciona una abertura conocida en términos de posición y características en la etapa S701. Esto proporciona una función de sonda $P(\mathbf{r}-\mathbf{R})$. En la etapa S702 la suposición actual en la función objetivo se multiplica por la abertura o sonda en la posición actual \mathbf{R} , $P(\mathbf{r}-\mathbf{R})$. Esto produce la función de onda de salida supuesta (aún en el plano 1) para la posición \mathbf{R} ,

$$\psi_{g,n}(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = O_{g,n}(\mathbf{r}) P(\mathbf{r}-\mathbf{R}) \quad \dots 2$$

3. Continuar en la etapa S703 una transformación de $\psi_{g,n}(\mathbf{r}, \mathbf{R})$ para obtener la correspondiente función de onda en el plano 2 (que sería el plano espacial de difracción si se usa la transformada de Fourier), para esa posición \mathbf{R} . Aquí T se usa para representar cierta transformada general que a menudo será la transformada de Fourier, pero podría ser también el propagador espacial libre de Fresnel, o alguna otra transformada adecuada a una aplicación particular del algoritmo.

$$\Psi_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R}) = T[\psi_{g,n}(\mathbf{r}, \mathbf{R})] \quad \dots 3$$

\mathbf{k} es la coordenada en el plano 2. (Para la transformada de Fourier, \mathbf{k} sería la coordenada espacial recíproca habitual. Para el propagador, \mathbf{k} sería la xy coordenada en el plano desenfocado.) Es importante notar que $\Psi_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})$ es una versión "supuesta" de la función de onda actual en el plano 2, ya que se ha producido por la función objetivo supuesta $O_{g,n}(\mathbf{r})$. Las iteraciones sucesivas del algoritmo producirán versiones cada vez más precisas de $\Psi_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})$.

Nótese que $\Psi_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})$ pueden escribirse en la forma:

$$\Psi_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R}) = |\Psi_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})| e^{i\theta_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})} \quad \dots 4$$

donde $|\Psi_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})|$ es la amplitud de la función de onda (supuesta) y $\theta_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})$ es la fase (supuesta) en el plano 2 en la iteración n , para la posición \mathbf{R} .

Mediante la medición de la intensidad del patrón de difracción por técnicas conocidas tal como el arreglo de detectores se conoce la información acerca de la función de onda de salida transformada actual. Una intensidad medida del patrón de difracción donde la abertura está en una primera posición por lo tanto forma la base de un valor estimado de la función de onda compleja del patrón de difracción. Sin embargo la intensidad medida no proporciona información acerca de la fase de la función de onda. Más bien la intensidad medida puede compararse con el módulo cuadrado de

$\Psi(\mathbf{r})$. Es decir $|\Psi(\mathbf{r})|^2$. Una vez que se conoce la intensidad de la radiación en el patrón de difracción en el plano 2 en la etapa S704 puede llevarse a cabo entonces la siguiente etapa.

4. Corregir, en la etapa S705 las intensidades de la función de onda plana supuesta 2 con los valores conocidos.

$$\Psi_{c,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R}) = |\Psi(\mathbf{k}, \mathbf{R})| e^{i \theta_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})} \quad \dots 5$$

donde $|\Psi(\mathbf{k}, \mathbf{R})|$ es el módulo plano conocido 2. Es decir la raíz cuadrada de la intensidad medida en el plano de imagen.

5. Transformación inversa S706 de nuevo en el espacio real para obtener una suposición nueva y mejorada en la función de onda de salida (en el plano 1) (T^{-1} representa la inversa de la transformada usada anteriormente T),

$$\psi_{c,n}(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = T^{-1}[\Psi_{c,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})]. \quad \dots 6$$

6. Actualizar mediante la etapa S707 la función de onda de objeto supuesta en el área recubierta por la abertura o sonda, mediante el uso de la función de actualización

$$O_{g,n+1}(\mathbf{r}) = O_{g,n}(\mathbf{r}) + \frac{|P(\mathbf{r} - \mathbf{R})|^\ell P^*(\mathbf{r} - \mathbf{R}) \beta (\psi_{c,n}(\mathbf{r}, \mathbf{R}) - \psi_{g,n}(\mathbf{r}, \mathbf{R}))}{|P_{\max}(\mathbf{r} - \mathbf{R})|^\ell (|P(\mathbf{r} - \mathbf{R})|^2 + \delta)} \quad \dots 7$$

donde los parámetros β , δ y ℓ se seleccionan adecuadamente, y $|P_{\max}(\mathbf{r} - \mathbf{R})|$ es el valor máximo de la amplitud de $P(\mathbf{r})$. El resultado es una nueva suposición para la función objetivo (S708).

La función de actualización ayuda a hacer posible que se produzca la deconvolución eficaz e introduce un factor de ponderación que hace que la función objetivo se actualice con más fuerza donde la función de sonda tiene mayor amplitud. La constante que puede seleccionarse ℓ puede establecerse en 1. Puede seleccionarse como cualquier valor en el intervalo de 0 a 3 y no tiene por qué ser un valor integral. Es útil establecer $\ell > 1$ cuando hay mucho ruido. ℓ puede seleccionarse $\ell < 1$ cuando debido a la geometría de la dispersión, la intensidad detectada es de la forma de un holograma de Gabor o similar. El valor δ se usa para evitar que se produzca una división por cero si $|P(\mathbf{r} - \mathbf{R})| = 0$. δ es un número real pequeño como el que se aplica comúnmente en los filtros de Weiner y es usualmente (aunque no necesariamente) más pequeño que P_{\max} y puede ser considerablemente más pequeño si el ruido presente en los datos registrados es pequeño. La constante β controla la cantidad de retroalimentación en el algoritmo, y puede variarse favorablemente entre aproximadamente 0.1 y 1. Cuando $\beta =$ menos de 0.5, el valor estimado anterior del objeto se considera que es más importante que el nuevo valor estimado. Los valores que varían entre la importancia relativa de los dos valores estimados. β determina cuán rápidamente se alcanza una solución.

δ es un parámetro que puede establecerse en un valor fijo o que puede variar. Se indica cuán ruidoso son los datos registrados y se usa para atenuar cómo se lleva a cabo la actualización en respuesta a estas circunstancias. Si existen buenas condiciones para la recolección de datos es decir con alta corriente del haz (flujo alto), que implicaría bajo ruido de disparo, entonces es seguro usar los resultados recogidos para actualizar el valor estimado supuesto. Consecuentemente el valor de δ puede ser una fracción pequeña de P_{\max} (por ejemplo menos de $1/10^{\text{mo}}$).

La expresión:

$$\frac{|P_{\max}(\mathbf{r}-\mathbf{R})|^{\ell}}{|P(\mathbf{r}-\mathbf{R})|^{\ell}} \dots 8$$

20

maximiza el efecto de actualización de las regiones donde $|P(\mathbf{r}-\mathbf{R})|$ es grande. Esto es útil, ya que son las regiones las que reciben la mayor cantidad de radiación incidente, y por lo tanto las que contienen información con una señal relativamente alta con relación al ruido. Esta información es claramente más valiosa que la de las regiones donde muy poca radiación es incidente, y que se afecta fuertemente por el ruido.

Para la situación donde $\beta = 1$, $\ell=0$ y $\delta=0$ y la función $P(\mathbf{r}-\mathbf{R})$ es una máscara es decir que puede representarse por una región donde su valor es la unidad mientras que es cero en otro lugar, o función de soporte, el algoritmo tiene algunas similitudes con el algoritmo de Fienup bien conocido. Si en esta situación, solamente se usa una posición \mathbf{R} , entonces el algoritmo se reduce a ser matemáticamente idéntico al algoritmo de Fienup básico. Donde se usa más de una posición \mathbf{R} , el algoritmo tiene ventajas considerables sobre los métodos conocidos, que incluyen el hecho de que no sufre de problemas de singularidad, y que puede fotografiarse un campo más amplio de visión.

Subsecuentemente para actualizar el valor estimado de funcionamiento de la suposición el algoritmo que se muestra en la Figura 7 avanza para seleccionar una nueva posición \mathbf{R} que se solapa al menos en parte a la posición anterior. La superposición preferentemente debe ser más de 20% y es preferentemente 50% o más. Esto puede lograrse o bien por el movimiento de la abertura en la dirección de la flecha A que se muestra en la Figura 3 por una cantidad predeterminada o haciendo que la radiación de iluminación que se muestra en la Figura 5 caiga sobre una región diferente del destino. Debe entenderse que las modalidades de la presente invención pueden proporcionar con éxito los datos de imagen para una localización de un objeto destino sin hacer ningún cambio en la localización de una abertura o radiación incidente. En tales modalidades después de la etapa S708 el algoritmo regresa a la etapa S702. En lugar de cargarse el valor estimado inicial de la función objetivo $O(\mathbf{r})$ se carga en la nueva suposición para $O(\mathbf{r})$ de la etapa S708. En cada iteración la nueva suposición para la función objetivo se aproximará más y más a la función objetivo actual como en cada información de iteración de la intensidad conocida y por lo tanto se añade el componente de amplitud conocido de la radiación incidente para mejorar la precisión del valor estimado.

Sin embargo el método más preferible es mover a una nueva posición \mathbf{R} que en parte solapa la posición anterior como se muestra en la Figura 7.

Una función de sonda conocida $P(\mathbf{r}-\mathbf{R}_2)$ en la segunda posición se identifica en la etapa S709 y entonces las etapas como se mencionó anteriormente se repiten de manera que la nueva suposición generada en la etapa S708 se multiplica por la nueva función de sonda conocida identificada en la etapa S709. Esto se ilustra en la etapa S710. Eficazmente esto genera una función de onda de salida o bien posterior a la muestra o posterior a la abertura en dependencia de la modalidad en cuestión. La función de onda de salida resultante se propaga en la etapa S711 para proporcionar un valor estimado del patrón de dispersión que debe detectarse en esa posición. El patrón de difracción se mide en la etapa S712 que proporciona una información de intensidad y por lo tanto información de amplitud acerca de la función de onda transformada. La información de intensidad se usa para corregir la amplitud de la función de onda transformada mientras la información de fase se retiene en la etapa S713. Esta función de onda corregida se propaga inversamente mediante la transformación de Fourier (cuando la imagen se forma en el campo lejano), transformación de Fresnel cuando la imagen se forma en una localización donde predomina la difracción de Fresnel o por cualquier otra transformación adecuada. Esto se ilustra en la etapa S714. El valor estimado de funcionamiento de $O(\mathbf{r})$ se corrige entonces de acuerdo con la función de actualización que se muestra anteriormente en la etapa S715 y el resultado es una nueva suposición para la función objetivo ilustrada en la etapa S716.

En esta etapa el movimiento adicional de la iluminación o abertura puede hacerse a una tercera posición o posición adicional. De nuevo es preferible una localización donde se produce alguna superposición entre las localizaciones iluminadas anteriormente. De esta manera todo el objeto destino puede mapearse opcionalmente. Alternativamente la nueva suposición generada en la etapa S716 puede repetirse sin el posicionamiento adicional conociendo los resultados del patrón de difracción conocido. En la Figura 7 se ilustra el método iterativo a medida que se repite regresando a la etapa S702 en la cual se introduce la nueva suposición generada en la etapa S716 a la etapa de multiplicación en lugar del valor estimado inicial de la función objetivo suministrado en la etapa S700.

El método iterativo puede repetirse hasta que se produce un evento predeterminado. Por ejemplo la iteración puede repetirse un número predeterminado de veces, por ejemplo 1000 veces o hasta que la suma de errores al cuadrado (SSE) sea suficientemente pequeña. La SSE se mide en el plano 2, como

5

$$SSE = \frac{(|\psi_{g,n}(\mathbf{k}, \mathbf{R})|^2 - |\psi(\mathbf{k}, \mathbf{R})|^2)^2}{N} \dots 9$$

10

donde N es el número de píxeles en el arreglo que representa la función de onda.

15

Durante el proceso de iteración la suposición de datos más actualizada de la función objetivo proporciona un valor estimado de funcionamiento para esa función objetivo. Cuando se completa el proceso de iteración como se determina por la ocurrencia de un evento predeterminado, el valor estimado de funcionamiento de la función objetivo proporciona los datos de imagen en las localizaciones que están o bien iluminadas por la radiación incidente o que se seleccionan por la localización de una abertura posterior al objeto destino. Estos datos de imagen incluyen amplitud e información de fase que pueden usarse subsecuentemente para generar una imagen de alta resolución de la región seleccionada del objeto destino.

20

25

El algoritmo de sonda en movimiento se ha usado para recuperar la fase de la función de onda creada cuando una sonda STEM es incidente en un objeto con la función de transmisión que se muestra en la primera fila. Esta transmisión se creó mediante la toma de una imagen medida con una cámara de CDD de partículas de oro en un fondo de carbono amorfo, tratando esa imagen solamente como un objeto de amplitud, y propagando el resultado por 1000Å, para obtener la intensidad y fase mostradas.

30

La sonda STEM tiene un tamaño de abertura de 0.25Å⁻¹, desenfoque de 3000A, y un número total de conteos de 1.0 x 10⁶. Esto resulta en la intensidad y fase que se muestra en la Figura 8. Esta sonda se multiplica por la función de transmisión de objeto, para varias posiciones de sonda diferentes en un arreglo de 128 x 128 píxeles. Las funciones de onda resultantes son las transformadas de Fourier para obtener patrones de difracción tales como los que se muestran en la tercera fila de la Figura 8, que es el patrón de difracción para la posición de sonda (60, 40).

35

Se ejecutó el algoritmo, con los parámetros de la ecuación 7 de β=1, ξ=1 y δ=0.0001, para 2000 iteraciones, en cuyo punto la SSE en el espacio de difracción fue 1.444 x 10⁻⁷, y aún sigue disminuyendo rápidamente. La función de onda recuperada en esta etapa es la que se muestra en la cuarta fila de la Figura 8. Claramente el algoritmo funciona muy bien. Se repitió el mismo experimento dos veces más con la inclusión de ruido de Poisson añadido, con un valor medio primero de 1.0, y en segundo lugar de 5.0. El valor de β se modificó a β=0.6, lo que resultó en una convergencia mejorada. Los resultados de estas simulaciones son los que se muestran en la Figura 9. Claramente la adición de ruido tiene un efecto en el algoritmo. Es particularmente claro que la función de transmisión de objeto se recupera sólo eficazmente en el área adyacente del conjunto de posiciones de sonda usado para dicha recuperación. Este es el comportamiento esperado ya que se conoce muy poco acerca del objeto en las regiones donde la sonda es extremadamente pequeña. Los resultados que se muestran se han llevado a escala a la misma escala de grises como la función de transmisión de objeto original. Está claro entonces que la estructura y algunos de los detalles del objeto se recuperan, incluso en el caso donde el ruido es relativamente alto.

40

45

50

Las modalidades de la presente invención por lo tanto proporcionan un nuevo método de recuperación de fase que puede aplicarse a muchas situaciones en microscopía con particular énfasis en su aplicabilidad a los microscopios electrónicos de transmisión de exploración. El método requiere como información de intensidad de entrada solamente las mediciones de un pequeño número (uno o más) de las diferentes posiciones de la sonda o abertura y esto por lo tanto elimina la necesidad de las lentes posteriores a la muestra lo que evita por lo tanto los problemas asociados con las aberraciones de tales lentes. El algoritmo empleado converge rápidamente para recuperar la fase de la función de transmisión de objeto. Esto permite imágenes de alta resolución que ilustren la estructura de objetos destino que se generan en tiempo real. El algoritmo es eficaz también en situaciones ruidosas y funciona para una amplia variedad de funciones de objeto y de sonda diferentes. Las modalidades de la presente invención permiten además que se calculen las funciones de sonda cuando se usan los objetos destino que tienen una estructura predeterminada.

55

60

Las Figuras 10A, 10B y 10C ilustran modalidades alternativas de la presente invención y particularmente muestran cómo la radiación incidente en un destino puede generarse y pueden detectarse los aspectos de identificación de datos de la radiación dispersada del destino. La Figura 10A ilustra cómo una fuente de radiación 1000 que puede localizarse cerca a un destino 1001 puede usarse para formar un patrón de dispersión en un arreglo de detectores 1002. La fuente debe estar suficientemente cerca al objeto destino para garantizar que el área iluminada del objeto destino sea suficientemente pequeña de manera que la condición de muestreo Nyquist se satisface en el plano detector. Esta modalidad no necesita lentes o aberturas para proporcionar datos de imagen a partir de los cuales pueden generarse

65

imágenes de alta resolución del destino 1001. Es sin embargo importante bajo estas condiciones particulares localizar la fuente 1000 suficientemente cerca a la superficie aguas arriba del destino 1001 para alcanzar esta resolución. Para proporcionar más de una posición para el proceso de actualización la muestra o la fuente puede ser móvil.

5 La Figura 10B ilustra una modalidad adicional de la presente invención en la cual se hace que una fuente de radiación de onda plana 1003 caiga en un tubo de enfoque 1004. El tubo 1004 selecciona una región de la radiación 1003 que se deja pasar y se convierte en radiación incidente en el destino 1001. No se requieren lentes o aberturas posteriores al destino de acuerdo con esta modalidad particular.

10 La Figura 10C ilustra aún una modalidad adicional en la cual una fuente puntual 1000 de radiación emite radiación que cae en un espejo de ángulo bajo 1005 o alguna otra superficie reflectante. Tal superficie reflectante puede aplicarse particularmente cuando la fuente puntual 1000 es una fuente de rayos X. La radiación se refleja por el espejo 1005 cerca de los ángulos rasantes y es incidente en el destino 1001. De nuevo la radiación dispersada se detecta por el arreglo de detectores 1002.

15 Las Figuras 11A y 11B ilustran aún modalidades adicionales de la presente invención. Particularmente ilustran cómo las modalidades de la presente invención pueden aplicarse para proporcionar un perfilómetro de superficie. Una fuente puntual 1100 irradia radiación que cae sobre una superficie de una muestra destino 1101. En lugar de ser transmitida a través de la muestra como se describe anteriormente esta muestra es o bien totalmente o parcialmente reflectante. Las protuberancias y otras características de superficie provocan un cambio de fase en la radiación incidente y esta radiación reflejada a partir del destino se dispersa a un arreglo de detectores 1102 donde el patrón de dispersión puede detectarse como se describe anteriormente. La Figura 11B ilustra una modalidad alternativa para el perfilómetro de superficie en la cual la radiación de la fuente 1100 primero se enfoca por una lente 1103 antes de la iteración con el objeto destino 1101. Debe entenderse que el algoritmo descrito anteriormente puede aplicarse por igual al modo de transmitancia descrito anteriormente y las modalidades reflectantes descritas con respecto a la Figura 11. En cada una de las diversas modalidades descritas en las Figuras 10 y 11 el movimiento de la fuente 1000, 1100, destino 1001, tubo 1004 y/o espejo reflectante 1005 pueden usarse para la reposición de una función de iluminación o función de sonda para su uso en una siguiente iteración en el algoritmo descrito anteriormente.

30 La Figura 12 ilustra un aparato para proporcionar datos de imagen que pueden usarse para construir una imagen de alta resolución de una región de un objeto destino de acuerdo con la modalidad anteriormente descrita ilustrada en las figuras 5 y 6. Una fuente de radiación 1200 proporciona iluminación en una lente 1201 que enfoca débilmente la radiación sobre una región seleccionada de un objetivo 51. La radiación incidente tiene una función de onda incidente 1202 y una función de onda de salida 1203. Esta función de onda de salida se propaga a través de la distancia D donde se forma un patrón de difracción en un arreglo de detectores 1204. La distancia D es ventajosa y suficientemente larga para que la función de onda de salida propagada 1203 forme un patrón de difracción de Fourier en un campo lejano. El arreglo de detectores proporciona al menos un detector que puede detectar la intensidad de la radiación dispersada por el objeto destino 51. Se prevé un dispositivo de localización 1205 el cual puede ser un micro actuador y puede localizar el objeto destino en una o más ubicaciones como se desee con respecto al objeto destino. De esta manera, la radiación de la fuente 1200 puede hacerse incidir sobre diferentes ubicaciones de la superficie aguas arriba del objetivo 51.

Una unidad de control 1206 proporciona señales de control al micro actuador y también recibe los resultados de medición de intensidad de cada uno de los detectores de pixeles en el arreglo de detectores 1204. La unidad de control 1206 incluye un microprocesador 1207 y una base de datos 1208 junto con una interfaz de usuario 1209 que puede incluir una pantalla de usuario y un teclado de entrada de usuario. La unidad de control puede conectarse a un dispositivo de procesamiento adicional, tal como un ordenador portátil 1210 o PC para el control remoto. Alternativamente, se entenderá que la unidad de control 1206 puede proporcionarse mediante un ordenador portátil o PC. La unidad de control 1206 puede controlar automáticamente la producción de datos de imagen en tiempo real. Alternativamente, un usuario puede utilizar la interfaz de usuario 1209 para seleccionar áreas del objeto destino para la obtención de imágenes o proporcionar otras entradas del usuario.

45 En uso, la fuente de radiación 1200 ilumina la lente 1200 con radiación. El objeto destino 1200 selectivamente se localiza por el actuador 1205 bajo el control de la unidad de control 1206. La radiación forma un patrón de difracción que se detecta en las ubicaciones respectivas por cada uno de los detectores en el arreglo de detectores 1204. Los resultados de estos detectores es la entrada a la unidad de control y pueden almacenarse en la base de datos 1208. Si sólo se utiliza una posición para derivar los datos de imagen, el microprocesador utiliza esta información detectada junto con instrucciones del programa que incluye información sobre el algoritmo anteriormente señalado para derivar los datos de imagen. Sin embargo, si se requiere una o más posiciones adicionales antes de finalizar los datos de imagen, la unidad de control emite señales próximas al actuador 1205 quien localiza la muestra en otra ubicación seleccionada. El actuador 1205 puede colocar la muestra en una de las diferentes posiciones existentes. Después de la reubicación un patrón de difracción formado en el arreglo de detectores se mide y los resultados se almacenan en la unidad de control. Como un ejemplo, el arreglo 1204 puede ser un arreglo CCD de 1200 x 1200 pixeles. Si no se requieren más mediciones de la intensidad los datos de imagen en esta etapa pueden ser generados por la unidad de control de acuerdo con los dos conjuntos de resultados almacenados recientemente utilizando el algoritmo indicado anteriormente. Los datos de imágenes primarios pueden mostrarse o una imagen de alta resolución generada a partir de los datos de

las imágenes pueden mostrarse en la interfaz de usuario 1209 o en la pantalla remota de una PC u otro dispositivo similar.

5 Las modalidades de la presente invención por lo tanto proporcionan un método iterativo para derivar los datos de imagen de un objeto destino. El método iterativo puede aplicarse de una manera inteligente a fin de ser capaz de hacer frente a los sistemas de iluminación generalizados. En estos la función de transmitancia de una abertura se define débilmente o un haz de la radiación puede enfocarse débilmente.

10 Las modalidades de la presente invención proporcionan un método para obtener datos de imagen adecuados para generar subsecuentemente una imagen de alta resolución de una parte de una muestra a una resolución de longitud de onda limitada. De esta manera se proporciona un método y aparato que puede producir datos de imagen que tienen una resolución mucho más alta que la resolución requerida para la precisión de posicionamiento del aparato usado para derivar dicha información. En el caso de la radiación de longitud de onda muy corta (subatómica) la mejora de resolución puede ser de 40 o más con relación a las técnicas anteriores. En algunos casos la resolución se verá
15 comprometida por los propios movimientos atómicos.

Reivindicaciones

1. Un método para proporcionar datos de imagen para la construcción de una imagen de alta resolución de una región de un objeto destino (31), que comprende las etapas de:
 5 proporcionar radiación incidente (30), desde una fuente de radiación, en el objeto destino (31);
 mediante al menos un detector (32), detectar la intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino con una abertura posterior al objeto destino (34) en una primera posición con respecto al objeto destino (31), volver a posicionar la abertura (34) con relación al objeto destino, detectar subsecuentemente la intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino (31) con la abertura (34) en una segunda posición con respecto al objeto destino; o
 10 mediante al menos un detector (32), detectar la intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino con la radiación incidente (30) en una primera posición con respecto al objeto destino (31), volver a posicionar la radiación incidente (30) con relación al objeto destino, detectar subsecuentemente la intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino (31) con la radiación incidente (30) en una segunda posición con respecto al objeto destino; y **caracterizada por**:
 15 seleccionar dicha segunda posición de manera que una primera área de la región del objeto destino seleccionada en dicha primera posición se solapa al menos en parte con una segunda área de la región del objeto destino determinada en dicha segunda posición; y
- 20 en respuesta a al menos la intensidad detectada en dichas primera y segunda posiciones, proporcionar dichos datos de imagen mediante un proceso iterativo y mediante el uso de una función de transmitancia suavemente variable o función de iluminación móvil con respecto a dicho objeto destino en donde la transmitancia suavemente variable o función de iluminación es una función de ancho de banda limitado no compuesta de frecuencias espaciales altas
- 25 2. El método como se reivindica en la reivindicación 1 en donde dicha etapa de proporcionar dichos datos de imagen comprende las etapas de:
- 30 estimar una función objetivo (41) que indica al menos una característica de dicha región del objeto destino (31); y
 volver a estimar iterativamente dicha función objetivo; de manera que se mejora una precisión de un valor estimado de funcionamiento de la función objetivo con cada iteración.
- 35 3. El método como se reivindica en la reivindicación 2 que comprende además las etapas de:
 multiplicar la función objetivo estimada (61) por una función de sonda (62) que indica al menos una característica de la radiación incidente (30) en dicho objeto destino (31);
 proporcionar una función de onda de salida (63) en respuesta a un resultado de dicha multiplicación;
 propagar la función de onda de salida (63) para proporcionar un valor estimado de un patrón de dispersión esperado (64); y
 40 corregir al menos una característica de dicho patrón de dispersión esperado de acuerdo con una intensidad detectada.
- 45 4. El método como se reivindica en la reivindicación 1 en donde dicha etapa de proporcionar dichos datos de imagen comprende las etapas de:
 estimar una función objetivo (41) que indica al menos una característica de una función de onda posterior al objeto destino inmediatamente antes de una abertura posterior al objeto destino (34); y
 volver a estimar iterativamente dicha función objetivo (41); de manera que se mejora una precisión de un valor estimado de funcionamiento de la función objetivo con cada iteración.
- 50 5. El método como se reivindica en la reivindicación 4 que comprende además las etapas de:
 multiplicar la función objetivo estimada (41) por una función de sonda (42) que indica al menos una característica de una abertura posterior al objeto destino (34);
 proporcionar una función de onda de salida (43) en respuesta a un resultado de dicha multiplicación;
 propagar la función de onda de salida para proporcionar un valor estimado de un patrón de dispersión esperado (44); y
 55 corregir al menos una característica de dicho patrón de dispersión esperado de acuerdo con una intensidad detectada.
- 60 6. El método como se reivindica en la reivindicación 3 o 5 que comprende además las etapas de:
 propagar inversamente el patrón de dispersión esperado corregido para proporcionar una función de onda de salida actualizada (43); y
 actualizar el valor estimado de funcionamiento de la función objetivo en respuesta a dicha función de onda de salida actualizada de acuerdo con la función:
- 65

$$O_{g,n+1}(r) = O_{g,n}(r) + U(r)(\Psi_{c,n}(r,R) - \Psi_{g,n}(r,R))$$

5

donde $O_{g,n+1}(r)$ es un valor estimado de funcionamiento de la función objetivo, $O_{g,n}(r)$ es un valor estimado anterior de la función objetivo o es la unidad cuando no hay un valor estimado anterior, $U(r)$ representa una función de actualización, $\Psi_{c,n}(r,R)$ es una suposición corregida en una función de onda de salida y $\Psi_{g,n}(r,R)$ es la función de onda de salida supuesta actual para una iteración.

10

7. El método como se reivindica en la reivindicación 6 en donde dicha función de actualización $U(r)$ es:

15

$$U(r) = \frac{\beta |P(r-R)|^\ell P^*(r-R)}{|P_{max}(r-R)|^\ell (|P(r-R)|^2 + \delta)}$$

20

donde β es una constante de retroalimentación, $P(r-R)$ es una función de sonda en una posición R , $P^*(r-R)$ es el conjugado de la función de sonda $P(r-R)$, $P_{max}(r-R)$ es el valor máximo de la amplitud de $P(r)$, δ es un parámetro que puede seleccionarse y ℓ es un parámetro que puede seleccionarse.

25

8. El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 3 o 5 en donde dicha etapa de propagar comprende una transformación de Fourier cuando se detecta la intensidad detectada en el campo lejano.

30

9. El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 3 o 5 en donde dicha etapa de propagar es una propagación de Fresnel cuando el al menos un detector está a una distancia de dicho objeto destino donde predomina la difracción de Fresnel.

35

10. El método como se reivindica en cualquier reivindicación anterior en donde dicha segunda área de la región del objeto destino solapa al menos 20% de dicha primera área.

40

11. El método como se reivindica en cualquier reivindicación anterior en donde dicha segunda área solapa más del 50% de dicha primera área.

45

12. El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 3 o 5 en donde dicho patrón de dispersión esperado corregido (44) se corrige de acuerdo con:

$$\Psi_{c,n}(k,R) = |\Psi(k,R)| e^{i\theta_{g,n}(k,R)}$$

50

donde $\Psi_{c,n}(k,R)$ es una función de onda corregida, $|\Psi(k,R)|$ es la amplitud conocida en un segundo plano y $\theta_{g,n}(k,R)$ es la fase supuesta en el segundo plano.

55

13. El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 3 o 5 en donde se calcula la propagación de acuerdo con:

60

$$\Psi_{g,n}(k,R) = T[\Psi_{c,n}(r,R)]$$

65

5 donde $\Psi_{g,n} k, R$ es la función de onda supuesta en un segundo plano, T indica una transformación y $\Psi_{g,n} r, R$ es la función de onda supuesta es un primer plano.

- 10 **14.** El método como se reivindica en la reivindicación 6 en donde dicha propagación inversa se calcula de acuerdo con:

$$\Psi_{c,n} r, R = T^{-1}[\Psi_{c,n} k, R]$$

donde $\Psi_{c,n} r, R$ es una función de onda supuesta en un primer plano, T^{-1} ilustra un procedimiento de transformación inverso y $\Psi_{c,n} k, R$ es una función de onda corregida en un segundo plano.

- 15 **15.** El método como se reivindica en la reivindicación 1 que comprende además las etapas de:
terminar el proceso de iteración cuando se produce un evento predeterminado.
- 20 **16.** El método como se reivindica en la reivindicación 15 en donde dicho evento predeterminado comprende el número de iteraciones que satisfacen una condición predeterminada.
- 25 **17.** El método como se reivindica en la reivindicación 15 en donde dicho evento predeterminado comprende una suma de errores al cuadrado que satisface una condición predeterminada.
- 30 **18.** El método como se reivindica en la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:
posicionar la radiación incidente (30) con respecto al objeto destino (31) mediante la selección de una localización donde la radiación incidente cae en el objeto destino.
- 35 **19.** El método como se reivindica en la reivindicación 18, que comprende además las etapas de:
seleccionar la localización donde la radiación incidente (30) cae en el objeto destino (41) mediante la formación de un perfil de iluminación con una lente (1201) u otro componente óptico.
- 40 **20.** El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 19 en donde dicha radiación incidente (30) comprende un campo de onda sustancialmente localizado.
- 45 **21.** El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 20 en donde dichos datos de imagen tienen una resolución de longitud de onda sustancialmente limitada.
- 22.** El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 21 en donde dicho al menos un detector (33) comprende dos o más detectores.
- 50 **23.** El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 22 que comprende además las etapas de:
proporcionar dichos datos de imagen para la región de dicho objeto destino (31) en tiempo real.
- 24.** El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 23 que comprende además las etapas de:
generar la imagen de dicha región en un visualizador de usuario (1210) en base a dichos datos de imagen.
- 55 **25.** El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 24 que comprende además las etapas de:
proporcionar dicha radiación incidente (30) en dicho objeto destino (31) mediante una lente débil o un cáustico desde una superficie reflectante (1005).
- 60

26. El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 25 que comprende además las etapas de:
- 5 (31). localizar cada uno de dicho al menos un detector (33) en el campo lejano con respecto a dicho objeto destino
27. El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 26 que comprende además las etapas de:
- 10 localizar cada uno de dicho al menos un detector (33) a una distancia de dicho objeto destino donde predomina la difracción de Fresnel.
28. El método como se reivindica en cualquier reivindicación anterior en donde dicha radiación se dispersa mediante la difracción de Fourier y/o difracción de Fresnel.
29. El método como se reivindica en la reivindicación 2, 3, 4 y/o 5 en donde dicha al menos una característica comprende amplitud y/o fase.
- 20 30. Un programa de computadora que comprende las instrucciones del programa para provocar que una computadora lleve a cabo el método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 29.
31. Un producto de programa de computadora que tiene en el mismo el programa de computadora de la reivindicación 30.
- 25 32. Aparato para proporcionar datos de imagen para generar una imagen de alta resolución de una región de un objeto destino (51), que comprende:
- 30 el medio de localización (1205) que localiza un objeto destino (51) en una localización predeterminada; una fuente de radiación (1200) para proporcionar radiación incidente (30) a un objeto destino (51) localizado por dicho medio de localización (1205); al menos un dispositivo detector (1204) para detectar una intensidad de la radiación dispersada por dicho objeto destino (51);
- 35 el medio de localización que localiza la radiación incidente (30) en una primera y segunda posiciones con respecto a dicho objeto destino; o el medio de localización que localiza una abertura (34), localizada posterior al objeto destino, en una primera y segunda posiciones con respecto a dicho objeto destino; y **caracterizada por:**
- 40 seleccionar dicha segunda posición de manera que una primera área de la región del objeto destino determinada en dicha primera posición se solapa al menos en parte con una segunda área de la región del objeto destino determinada en dicha segunda posición; y
- 45 el medio de procesamiento (1206) que proporciona dichos datos de imagen en respuesta a una intensidad detectada de la radiación dispersada en las primera y segunda posiciones mediante un método iterativo y mediante el uso de una función de transmitancia suavemente variable o función de iluminación, en donde la transmitancia suavemente variable o función de iluminación es una función de ancho de banda limitado no compuesta de frecuencias espaciales altas.
33. El aparato como se reivindica en la reivindicación 32, que comprende además:
- 50 una lente (1201) o componente óptico que forma una perfil de iluminación que determina dicha función de iluminación.
34. El aparato como se reivindica en la reivindicación 32 en donde dicho medio de procesamiento comprende:
- 55 un microprocesador (1207); un almacenamiento de datos (1208) que contiene los datos e instrucciones para dicho microprocesador; y el medio que proporciona las instrucciones para mover una de dicha radiación incidente o dicha abertura o un objeto destino localizado.
- 60 35. El aparato como se reivindica en la reivindicación 32 en donde dicho medio de procesamiento comprende además:
- 65 una interfaz de usuario (1209) que comprende un dispositivo de entrada de usuario para permitir a un usuario entrar los datos, y un visualizador de usuario para visualizar dichos datos de imagen o una imagen de alta resolución generada a partir de dichos datos de imagen.

- 5
- 10
- 15
- 20
- 25
- 36. El aparato como se reivindica en la reivindicación 32 en donde dicha fuente de radiación (1200) comprende una fuente de radiación coherente.
 - 37. El aparato como se reivindica en la reivindicación 32 en donde dicha fuente de radiación (1200) comprende una fuente de radiación incoherente.
 - 38. El aparato como se reivindica en la reivindicación 32 en donde dicha fuente de radiación (1200) es un generador de haz de electrones.
 - 39. El aparato como se reivindica en la reivindicación 32 en donde dicha fuente de radiación (1200) es un generador de haz de rayos X.
 - 40. El aparato como se reivindica en la reivindicación 32 en donde dicho medio para localizar (1205) comprende un microactuador piezoeléctrico.
 - 41. El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 29, en donde el objeto destino (1001) al menos es parcialmente transparente a la radiación incidente y la detección de una intensidad de la radiación dispersada por el objeto destino (1001) comprende detectar una intensidad de la radiación transmitida por el objeto destino.
 - 42. El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 29, en donde el objeto destino (1101) al menos es parcialmente reflectante a la radiación incidente y la detección de una intensidad de la radiación dispersada por el objeto destino comprende detectar una intensidad de la radiación reflejada por el objeto destino.

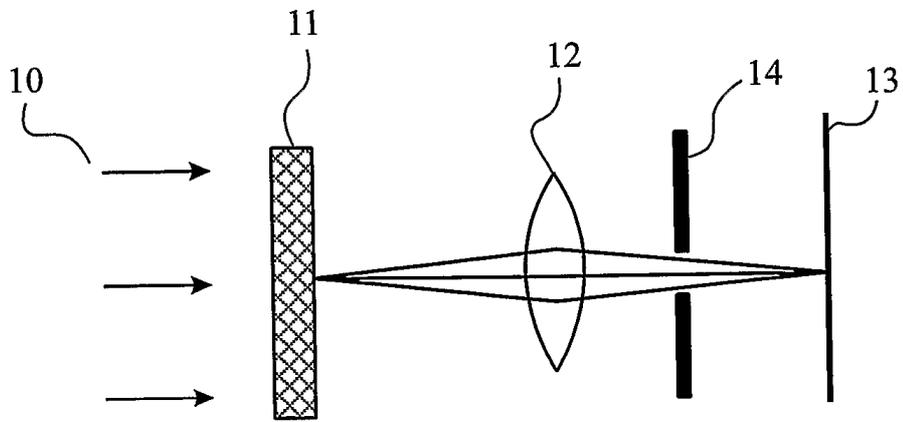


Fig. 1A
(TÉCNICA ANTERIOR)

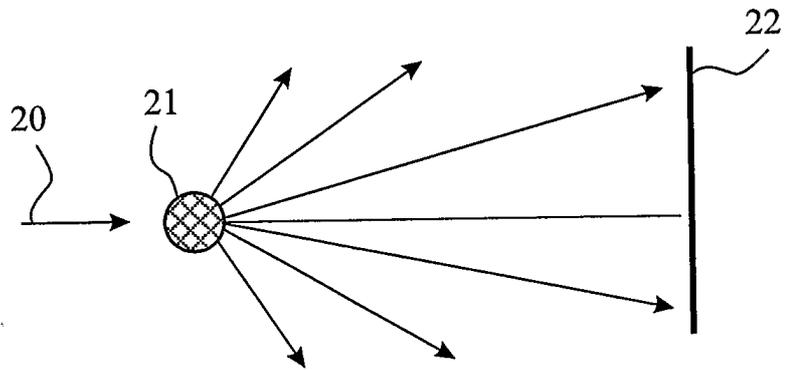


Fig. 2
(TÉCNICA ANTERIOR)

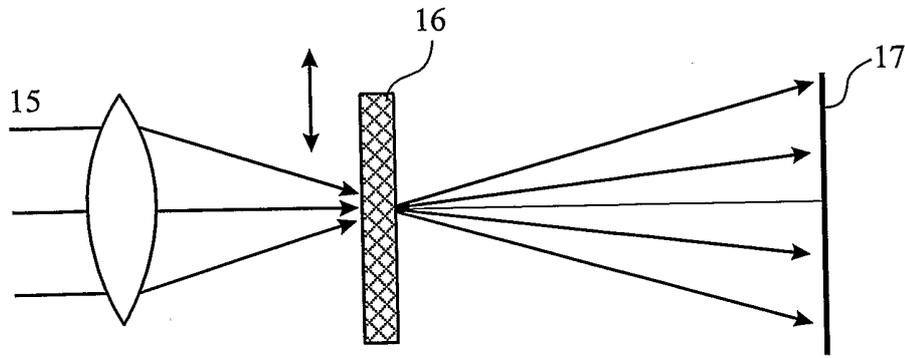


Fig. 1B

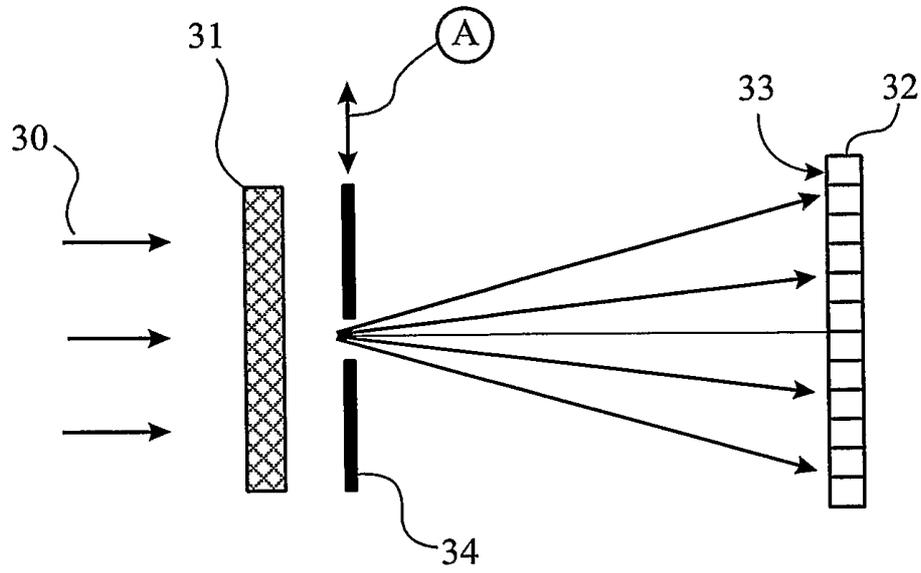


Fig. 3

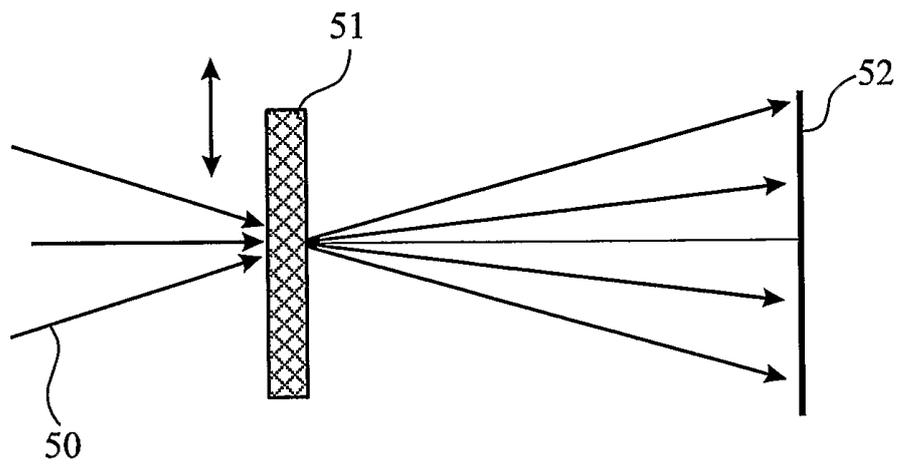


Fig. 5

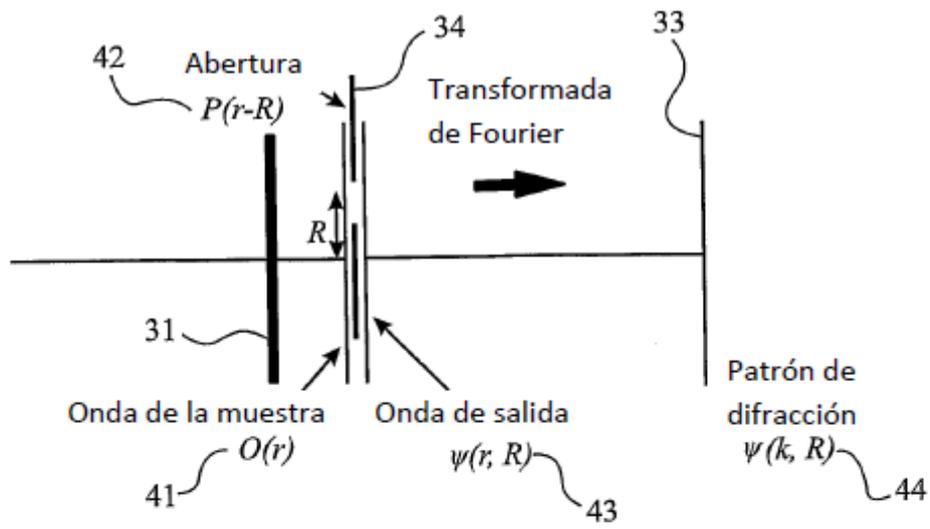


Fig. 4

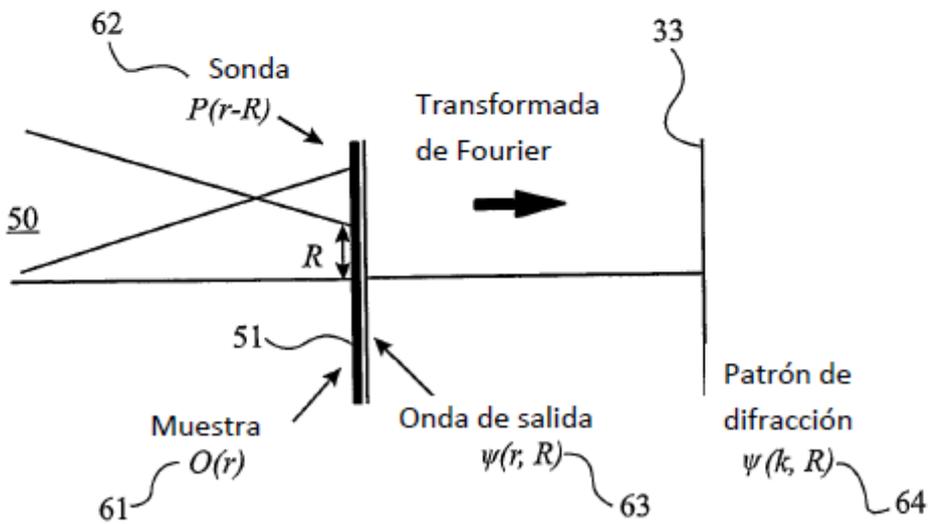


Fig. 6

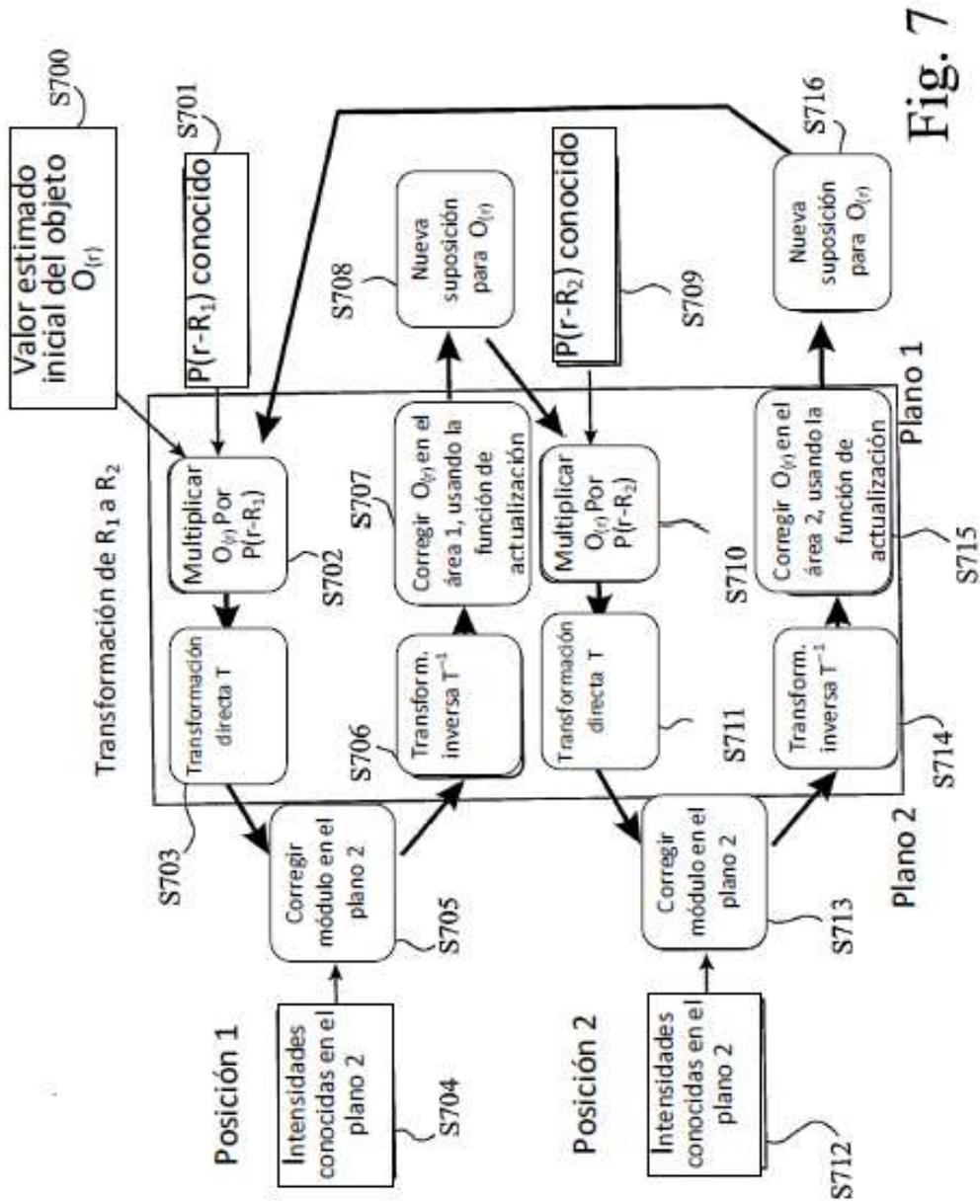


Fig. 7

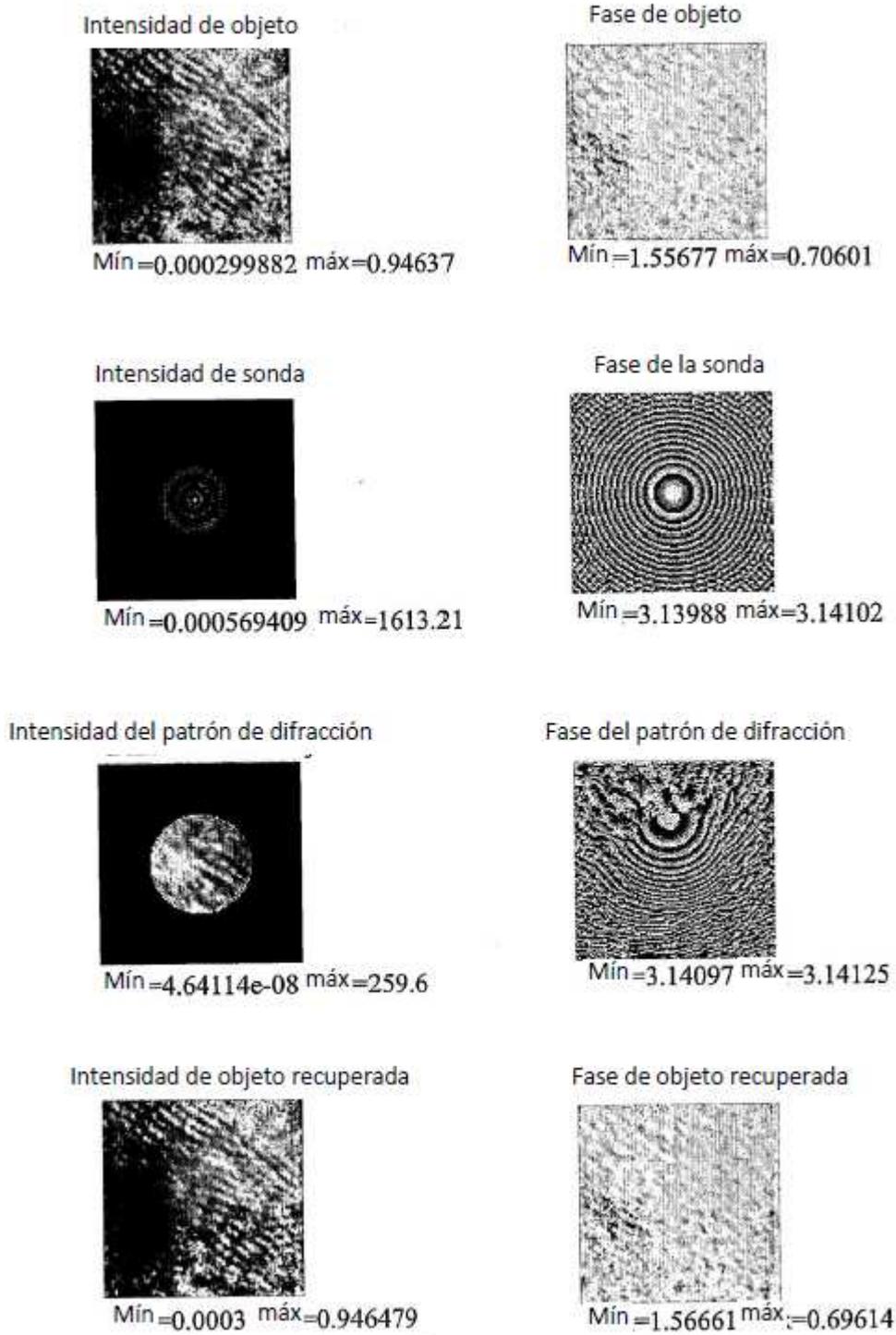
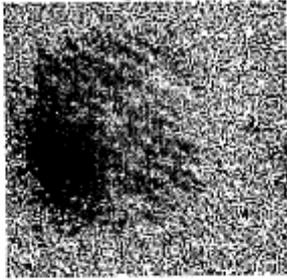


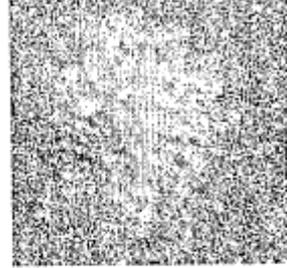
Fig. 8

Intensidad de objeto recuperada



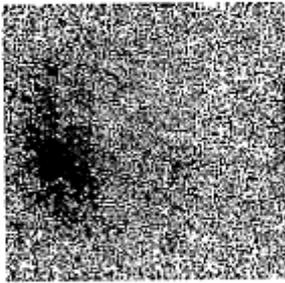
Mín =0 máx =1

Fase de objeto recuperada



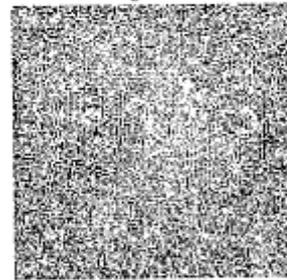
Mín =1.5 máx =0.7

Intensidad de objeto recuperada



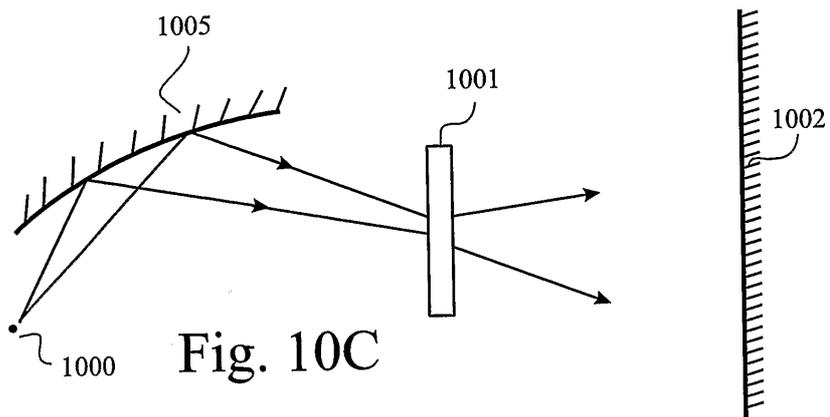
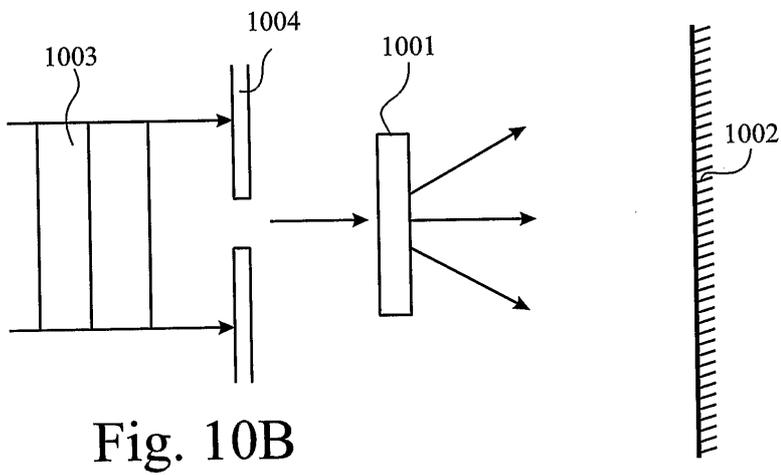
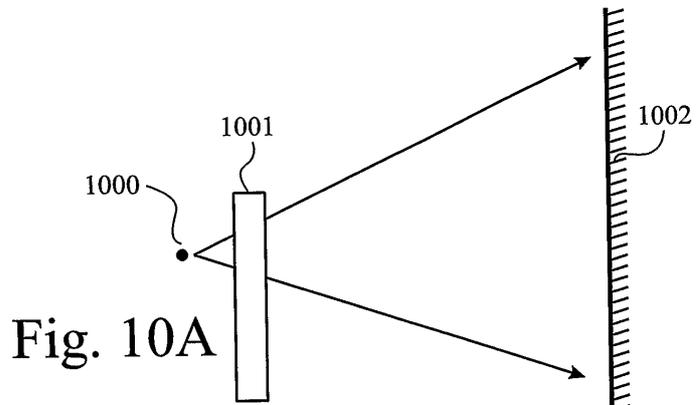
Mín =0 máx =1

Fase de objeto recuperada



Mín =1.5 máx =0.7

Fig. 9



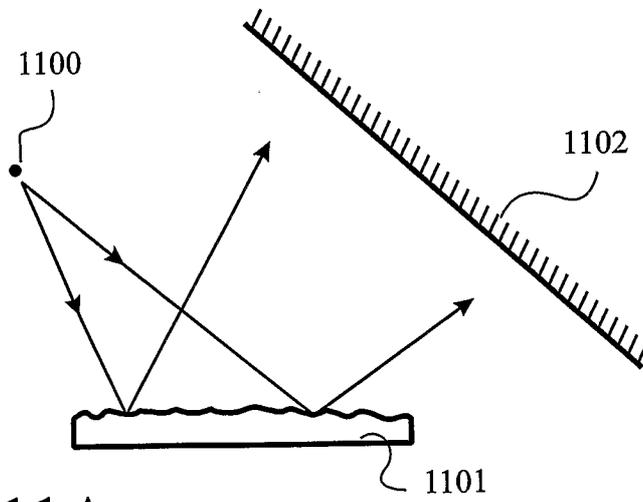


Fig. 11A

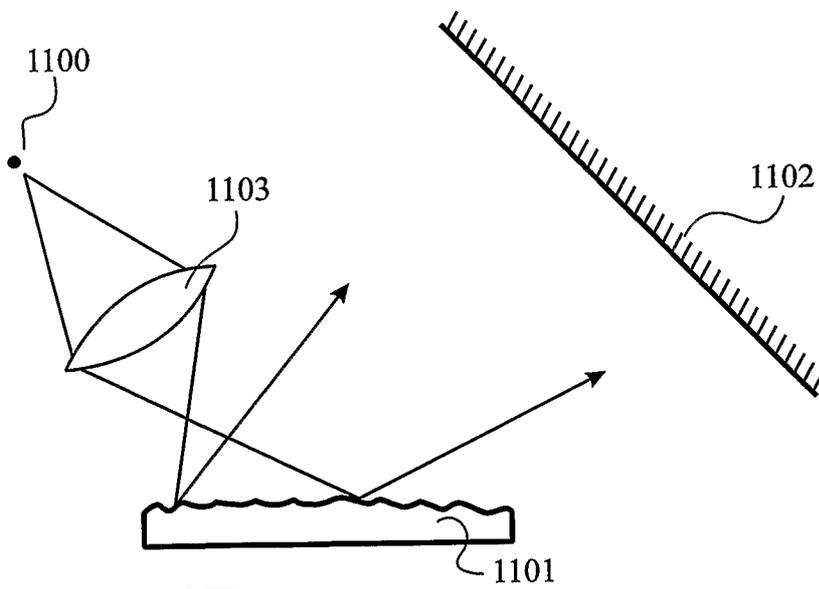


Fig. 11B

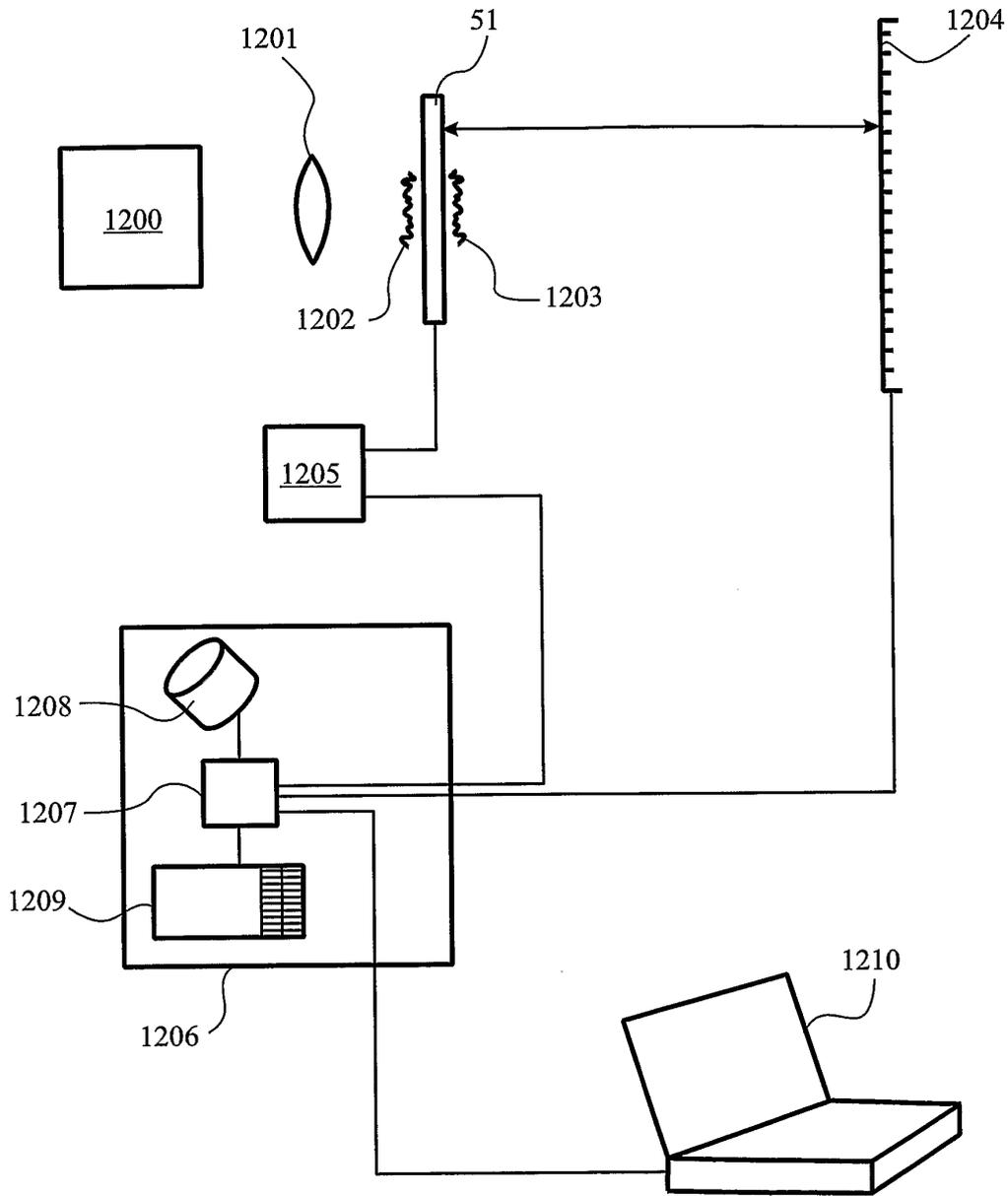


Fig. 12