

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 991 935**

51 Int. Cl.:

G04F 5/14

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.06.2019** **PCT/EP2019/066247**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.12.2020** **WO20253957**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.06.2019** **E 19734319 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.10.2024** **EP 3987362**

54 Título: **Dispositivo resonante óptico con cavidades cruzadas para capturar átomos ópticamente, y aplicaciones de los mismos en un reloj atómico óptico, un simulador cuántico o un ordenador cuántico**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
05.12.2024

73 Titular/es:

**MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DERWISSENSCHAFTEN E.V.
(100.0%)
Hofgartenstrasse 8
80539 München, DE**

72 Inventor/es:

**BLATT, SEBASTIAN;
HEINZ, ANDRE y
BLOCH, IMMANUEL**

74 Agente/Representante:

ESPIELL GÓMEZ, Ignacio

ES 2 991 935 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

Dispositivo resonante óptico con cavidades cruzadas para capturar átomos ópticamente, y aplicaciones de los mismos en un reloj atómico óptico, un simulador cuántico o un ordenador cuántico

CAMPO DE LA INVENCION

La invención se refiere a un dispositivo resonante óptico con cavidades cruzadas (resonante de cavidad cruzada), que está configurado para capturar ópticamente átomos, por ejemplo, para aplicaciones en un reloj atómico óptico que incluye una trampa de red óptica o en un simulador cuántico, en particular un microscopio de gas cuántico. Además, la invención se refiere a métodos para usar el dispositivo resonante óptico, por ejemplo, para proporcionar átomos de referencia de un reloj atómico óptico o átomos de muestra en un simulador cuántico o en un ordenador cuántico. Además, la invención se refiere a un reloj atómico óptico y a un simulador cuántico que incluye el dispositivo resonante óptico.

TÉCNICA ANTERIOR

En la presente descripción, se hace referencia a la siguiente técnica anterior que ilustra el trasfondo técnico de la invención:

- [1] A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, y P. O. Schmidt. Optical atomic clocks, Review of Modern Physics 87, 637 (2015);
- [2] J. Grotti y otros. Geodesy and metrology with a transportable optical clock, Nature Physics 14, 437 (2018);
- [3] S. B. Koller, J. Grotti, S. Vogt, A. Al-Masoudi, S. Dörscher, S. Häfner, U. Sterr, y C. Lisdat. Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{-17} Uncertainty, Physical Review Letters 118, 073601 (2017);
- [4] S. Origlia y otros. Towards an optical clock for space: Compact, high-performance optical lattice clock based on bosonic atoms, Physical Review A 98, 053443 (2018);
- [5] S. Campbell y otros. A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock, Science 358, 90 (2017);
- [6] E. Oelker y otros. Optical clock intercomparison with 6×10^{-19} precision in one hour, arXiv:1902.02741 (2019);
- [7] R. P. Feynman. Simulating physics with computers, International Journal of Theoretical Physics 21, 467 (1982);
- [8] I. Bloch, J. Dalibard, y W. Zwerger. Many-body physics with ultracold gases, Review of Modern Physics 80, 885 (2008);
- [9] I. Bloch y C. Gross. Quantum simulations with ultracold atoms in optical lattices, Science 357, 995 (2017);
- [10] I. Bloch, J. Dalibard, y S. Nascimbène. Quantum simulations with ultracold quantum gases, Nature Physics 8, 267 (2012);
- [11] I. M. Georgescu, S. Ashhab, y F. Nori. Quantum simulation, Reviews of Modern Physics 86, 153 (2014);
- [12] W. S. Bakr, J. I. Gillen, A. Peng, S. Fölling, y M. Greiner. A quantum gas microscope for detecting single atoms in a Hubbard-regime optical lattice, Nature 462, 74 (2009);
- [13] J. F. Sherson, C. Weitenberg, M. Endres, M. Cheneau, I. Bloch, y S. Kuhr. Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator, Nature 467, 68 (2010);
- [14] A. Mazurenko, C. S. Chiu, G. Ji, M. F. Parsons, M. Kanász-Nagy, R. Schmidt, F. Grusdt, E. Derner, D. Greif, y M. Greiner. A cold-atom Fermi-Hubbard antiferromagnet, Nature 545, 462 (2017);
- [15] M. Boll, T. A. Hilker, G. Salomon, A. Omran, J. Nespolo, L. Pollet, I. Bloch, y C. Gross. Spin and Charge Resolved Quantum Gas Microscopy of Antiferromagnetic Order in Hubbard Chains, Science 353, 1257 (2016);
- [16] C. K. Hong, Z. Y. Ou, y L. Mandel. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference, Physical Review Letters 59, 2044 (1987);
- [17] R. Islam, R. Ma, P. M. Preiss, A. Lukin, M. Rispoli, y M. Greiner. Measuring entanglement entropy in a quantum many-body system, Nature 528, 77 (2015);
- [18] Julian Leonard, Andrea Morales, Philip Zupancic, Tilman Esslinger, y Tobias Donner "Supersolid formation in a quantum gas breaking continuous translational symmetry", Nature 543, 87 (2017)
- [19] S. Blatt, A. Mazurenko, M. F. Parsons, C. S. Chiu, F. Huber, y M. Greiner. Low-noise optical lattices for ultracold ^6Li , Physical Review A 92, 021402 (2015);
- [20] A. Mazurenko, S. Blatt, F. Huber, M. F. Parsons, C. S. Chiu, G. Ji, D. Greif, y M. Greiner. Implementation of a stable, high-power optical lattice for quantum gas microscopy, Review of Scientific Instruments 90, 033101 (2019);
- [21] J. Léonard, M. Lee, A. Morales, T. M. Karg, T. Esslinger, y T. Donner. Optical transport and manipulation of an ultracold atomic cloud using focus-tunable lenses, New Journal of Physics 16, 093028 (2014);
- [22] R. J. Lewis-Swan, M. A. Norcia, J. R. K. Cline, J. K. Thompson, y A. M. Rey. Robust Spin Squeezing via Photon-Mediated Interactions on an Optical Clock Transition, Physical Review Letters 121, 070403 (2018); y
- [23] N. Poli y otros. Optical atomic clocks in RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO, 10 de enero 2014, arxiv.org/pdf/1401.2378.pdf.

Es conocido generalmente que las unidades de medición en el sistema internacional de unidades y mediciones, codificadas en el Système International (SI), ha sido definido recientemente por combinaciones de constantes físicas fundamentales. La siguiente actualización al sistema SI será un cambio en la definición del segundo. El segundo del SI está definido como un cierto número de oscilaciones de una transición de microondas entre dos estados hiperfinos del átomo de cesio, medido en un tal llamado reloj de fuente de cesio. En los últimos quince años, un nuevo tipo de estándar de frecuencias basado en transiciones ópticas de átomos de estroncio capturados en redes ópticas, llamados relojes de red óptica, ha superado la estabilidad y precisión del estándar de la fuente de cesio en dos órdenes de magnitud ([1], véase también [23]). Por esta razón, el segundo del SI es programado para su

redefinición en términos de un estándar óptico dentro de los próximos pocos años.

Los relojes de red óptica se han vuelto tan precisos que los efectos de la relatividad general pueden ser observados directamente al elevar el reloj en unos pocos centímetros en el campo gravitacional de la Tierra [1]. Esta capacidad abre posibilidades completamente nuevas para mediciones directas del potencial gravitacional con aplicaciones en la geodesia [2]. Las mediciones más precisas del tiempo también mejorarán drásticamente la precisión de la navegación global basada en satélites. Los estándares de frecuencia óptica ya están siendo enlazados en redes cuánticas a través de redes de fibra óptica basadas en tierra. Estas redes proporcionarán enlaces coherentes de fase entre laboratorios remotos en toda Europa e internacionalmente [1]. En el futuro, tales enlaces permitirán detectar ondas gravitacionales en escalas del tamaño de la Tierra y permitirán interferometría de línea de base muy larga para otras observaciones astronómicas o de espacio profundo.

Todas estas aplicaciones de relojes atómicos ópticos de un futuro cercano tendrán que basarse en estándares ópticos eficientes y robustos que sean compatibles con el funcionamiento sin intervención manual, por ejemplo, en una nave espacial, un satélite, un avión o un vehículo en movimiento. Los sistemas basados en el espacio en particular necesitarán ser resistentes a fuertes aceleraciones durante la fase de lanzamiento, y no podrán realinearse manualmente después del lanzamiento. En consecuencia, existe un interés en eliminar los relojes atómicos ópticos que están configurados como relojes atómicos de red óptica del entorno altamente controlado en un laboratorio de metrología cuántica basado en la Tierra y proporcionar relojes atómicos ópticos robustos y/o transportables para aplicaciones de rutina.

Un reloj de red óptica transportable ha sido realizado en la Referencia. [2, 3]. Este reloj usa átomos de estroncio en una red óptica unidimensional que está formado al reflejar un haz láser inicial una vez y superponer el haz de láser reflejado con el haz de láser inicial. El reloj utiliza un retroreflector fijo, pero de cualquier otra manera montajes cinemáticos estándar que están sujetos a desviaciones de temperatura, vibraciones y que requieren reajuste después de ser sometidos a fuertes aceleraciones. Aunque el reloj de Referencia [2, 3] está contenido en un camión, no es posible hacerlo funcionar mientras está moviéndose. El proyecto ISOC tiene como objetivo específico construir un reloj de red óptica compatible con el espacio [4]. La colaboración tiene como objetivo reducir el peso y el consumo de energía, y mejorar la estabilidad a largo plazo. Sin embargo, actualmente está usándose la red unidimensional estándar mediante el uso del haz de láser retroreflejado.

La última generación de relojes de red óptica [5, 6] usa redes ópticas bidimensionales y un gas degenerado de Fermi de átomos de estroncio en el foco de un objetivo de microscopio de alta resolución. La configuración es casi idéntica a los microscopios de gas cuántico usados para la simulación cuántica (ver más abajo). Sin embargo, este laboratorio base estándar aún usa redes ópticas que utilizan haces retroreflejados y se ve limitado por los requisitos de potencia óptica a las cinturas del haz de red óptica (el $1/e^2$ radio del haz) de aproximadamente 100 μm , lo que limita el número de átomos de referencia y la relación señal-ruido del reloj de red óptica de la red.

Otra aplicación principal de las redes ópticas es el campo relacionado de la simulación cuántica [7] con átomos ultrafríos en redes ópticas [8, 9]. Así como en un estándar de frecuencia óptica, siendo los átomos capturados y manipulados por luz láser en dicho simulador cuántico. Para contener los átomos, están confinados dentro de los máximos de intensidad de los haces láser retroreflejados que forman una trampa de red óptica. En lugar de simplemente sondear la transición de reloj de los átomos capturados, se utilizan simuladores cuánticos para investigar la dinámica cuántica de muchos cuerpos que se produce cuando los átomos hacen túnel e interactúan en la red óptica [8]. A temperaturas por debajo de una millonésima de un Kelvin por encima del cero absoluto, el movimiento de los átomos y su interacción debe ser descrita cuántica-mecánicamente.

Los simuladores cuánticos basados en átomos ultrafríos son usados para obtener una comprensión mucho más profunda de la dinámica de los modelos cuántico-mecánicos, tal como el modelo de Hubbard [9] que describe el movimiento de los electrones en los cristales en la física de la materia condensada. El progreso en este campo, por ejemplo, en la investigación de la física de los sistemas cuánticos de giro y muchos otros fenómenos exóticos más allá del alcance de los dispositivos de estado sólido o los métodos computacionales son descritos en [9, 10, 11]. Una gran parte del progreso dentro de la última década ha sido habilitado por técnicas de microscopía novedosas que permiten observar y controlar cada átomo individual en el plano de un sistema de imágenes de alta resolución [12,13]. Sin embargo, incluso con estas nuevas técnicas, sigue siendo muy desafiante crear sistemas cuánticos de baja temperatura de más de unas pocas decenas de átomos, mientras se mantiene un control total sobre cada uno individual.

Uno de los principales desafíos de la simulación cuántica con átomos ultrafríos en redes ópticas es hacer que las condiciones de captura sean más homogéneas. Como se ha mencionado anteriormente, las redes ópticas normalmente están formadas por haces láser retroreflejados. Cualquier haz de este tipo debe tener una extensión finita transversal a su dirección de propagación. El perfil de intensidad transversal de un haz de láser da como resultado una variación transversal de la profundidad de la red óptica que forma. Esta variación de profundidad conduce entonces a una variación de las tasas de perforación y los parámetros de interacción. Debido a que los parámetros del sistema cambian como una función de la posición, no se pueden realizar sistemas cuánticos completamente homogéneos en redes ópticas. La inhomogeneidad se traduce en una extensión finita de fases cuánticas convenientes, tales como el aislante de Mott, en donde los átomos están dispuestos de tal manera que un único átomo ocupa cada sitio de la red. La fase cuántica de aislamiento de Mott es la fase cuántica de menor entropía que puede realizarse actualmente y a menudo sirve como la inicialización de un simulador cuántico. La fidelidad de tales simulaciones está limitada por el tamaño finito y las imperfecciones del aislante de Mott inicial. Por

esta razón, es conveniente disminuir la inhomogeneidad de la red óptica e incrementar los tamaños del aislante de Mott alcanzables.

Los sistemas de red óptica más homogéneos han sido demostrados en configuraciones de microscopio de gas cuántico [9]. Aquí, la elevada resolución espacial permite modificar la red óptica localmente y puede compensarse parte de la falta de homogeneidad debida a la forma transversal de los haces láser de la red. Esta compensación es particularmente importante para los átomos de tipo fermiónico [14], la cual (debido al principio de exclusión de Pauli) se esparcen por regiones más grandes de la red óptica que los átomos de tipo bosón. Los microscopios cuánticos de gas de última generación con átomos de tipo fermión pueden producir patrones de tablero de ajedrez casi sin defectos de átomos con aproximadamente 30×30 átomos (esta es la fase de aislamiento de Mott del modelo de Hubbard) [14,15]. Estos tamaños están limitados por la extensión transversal de los haces de láser que generan el potencial de la red óptica, la cual está limitada por la potencia del láser disponible de láseres de estado sólido de alta potencia a 1064 nm (aproximadamente 50 W). Las simulaciones cuánticas del estado de la técnica de última generación que utilizan estos aislantes de Mott como punto de partida ya están limitadas por lo idénticos que pueden hacerse los sitios de la red. El método estándar de óptica cuántica para cuantificar cuán idénticas son las partículas es el efecto Hong-Ou-Mandel [16]. Con este fin, son traídos dos fotones idénticos a un divisor de haz. Si los fotones son perfectamente idénticos, siempre saldrán de uno de los puertos del divisor de haz juntos. Entonces nunca se encuentra un fotón en un puerto y el otro fotón en el otro puerto. Este efecto puede ser traducido a partículas masivas, y ya ha sido medido en un microscopio de gas cuántico con bosones [17]. Esta medición se limitó a interferir dos muestras de cuatro átomos cada una, porque fue imposible encontrar más sitios de la red que fueran lo suficientemente idénticos. En consecuencia, existe un interés en crear trampas de red óptica más grandes con una homogeneidad mejorada también para aplicaciones de simulación cuántica.

El enfoque más simple para lograr los objetivos anteriores podría basarse en simplemente aumentar la extensión transversal de los haces de láser de red. Sin embargo, tanto la metrología cuántica como la simulación cuántica requieren redes que sean extremadamente estables en amplitud y frecuencia. Aumentar el tamaño del haz es un desafío porque los laboratorios de simulación cuántica de última generación ya usan los tamaños de haz más grandes posibles alcanzables por los láseres de mayor potencia con los criterios de estabilidad requeridos.

Los problemas anteriores son aún más desafiantes si, como alternativa a los haces de láser retrorreflejados, se usa la mejora del campo de luz resonante para crear la trampa óptica. En este caso, la trampa óptica está dispuesta en un resonante óptico, en particular en una cintura de un modo de resonante del resonante óptico. Para crear una trampa óptica bidimensional, es usado un resonante óptico con cavidades cruzadas tal como se ha descrito, por ejemplo, en la Referencia. [18]. El resonante óptico convencional con cavidades cruzadas comprende dos pares de espejos resonantes que se apoyan en un sustrato común. Para obtener una estabilidad de captura suficiente, esta configuración está restringida a diámetros de cintura de modo pequeños de aproximadamente 200 μm en la trampa, limitando así la cantidad de átomos y la relación de señal a ruido de la aplicación de simulación cuántica. Además, como el resonante óptico se hace funcionar al vacío, la geometría del resonante puede desviarse como resultado de la creación del vacío o los procesos de calentamiento después de crear el vacío.

OBJETIVO DE LA INVENCION

El objetivo de la invención es proporcionar un dispositivo de resonante óptico mejorado para capturar ópticamente átomos evitando las desventajas de las técnicas convencionales. En particular, el objetivo de la invención es proporcionar un dispositivo resonante óptico mejorado que tenga una configuración robusta, que permita una operación móvil, que mantenga la estabilidad incluso a una fuerte aceleración, que proporcione condiciones de captura homogéneas, que permita la creación de una trampa de red en más de una dimensión y/o que permita la creación de una trampa de red con mayor tamaño y número de partículas capturadas. Además, el objetivo de la invención es proporcionar un método mejorado para capturar ópticamente átomos mediante el uso del dispositivo resonante óptico. Además, el objetivo de la invención es proporcionar un aparato de trampa de átomos mejorado para crear una disposición bidimensional de átomos y las aplicaciones de la misma en un reloj atómico óptico, un simulador cuántico o un ordenador cuántico.

BREVE RESUMEN DE LA INVENCION

Estos objetivos son correspondientemente resueltos por un dispositivo resonante óptico que presenta las características de la reivindicación principal y por un método de captura óptica de átomos que emplea el dispositivo resonante óptico, y un aparato de trampa de átomos, tal como un reloj atómico óptico, un simulador cuántico y/o un ordenador cuántico que emplea el dispositivo resonante óptico. Las modalidades y aplicaciones preferidas de la invención están definidas en las reivindicaciones dependientes.

De acuerdo con un primer aspecto general de la invención, el objetivo anterior es solucionado mediante un dispositivo resonante óptico con cavidades cruzadas, que comprende un primer resonante óptico lineal (primera cavidad) que se extiende entre los primeros espejos resonantes a lo largo de una primera trayectoria de luz del resonante recta y que soporta al menos un primer modo resonante, y un segundo resonante óptico lineal (segunda cavidad) que se extiende entre los segundos espejos resonantes a lo largo de una segunda trayectoria de luz del resonante recta y que soporta al menos un segundo modo resonante. Cada uno del primer y segundo resonantes ópticos comprenden un par de espejos resonantes. Cada espejo resonante comprende un sustrato de espejo y un recubrimiento reflectante orientado hacia el otro espejo resonante de los resonantes ópticos relacionados. Los recubrimientos reflectantes comprenden preferiblemente pilas de capas dieléctricas que están seleccionadas de tal

manera que se obtiene una cierta reflectividad para una longitud de onda de operación. El primer y segundo resonantes ópticos se cruzan entre sí, es decir, la primera y segunda trayectorias de luz del resonante se entrecruzan entre sí. El primer y segundo modos de resonante se cruzan entre sí. El plano que contiene la primera y segunda trayectorias de luz del resonante se indica aquí como el plano principal del resonante.

Además, el dispositivo resonante óptico incluye un dispositivo portador que soporta el primer y segundo espejos resonantes. El primer y segundo espejos resonantes están posicionados de forma fija en el dispositivo portador. Debido a la configuración de cruce de la primera y segunda cavidades, puede ser proporcionada una trampa de red óptica en el plano principal del resonante, donde el primer y segundo modos del resonante (haz de láser de red) se cruzan entre sí. El dispositivo portador y el primer y segundo espejos resonantes conectados con el dispositivo portador están ajustados de tal manera que en una condición donde los campos de luz están acoplados en el primer y segundo resonantes ópticos, los campos de luz son superpuestos y se crean los extremos de campo que proporcionan la trampa de red óptica. La trampa de red óptica es una sección de la cavidad de cruce donde pueden crearse extremos de campo de luz de captura de átomos mediante luz láser que viaja dentro de los resonante. Preferiblemente, tanto el primer como el segundo resonante óptico tienen geometría igual en términos de longitudes de resonantes y formas de espejos, de manera que los modos de resonante idénticos o al menos suficientemente similares pueden ser soportados por el primer y segundo resonantes ópticos.

De acuerdo con la invención, el dispositivo portador comprende un cuerpo del separador monolítico, el cual está fabricado de un material sólido de expansión ultrabaja y que comprende unas primeras superficies portadoras (es decir, un primer par de superficies portadoras) que alojan los primeros espejos resonantes y segundas superficies portadoras (es decir, un segundo par de superficies portadoras) que alojan los segundos espejos resonantes. El cuerpo del separador es un cuerpo monolítico, es decir, está fabricado de un único bloque de material integral. El cuerpo del separador monolítico comprende material de expansión ultrabaja, es decir, un material que no tiene expansión térmica o un coeficiente de expansión térmica mínimo. Preferiblemente, el material del cuerpo del separador monolítico tiene una función de expansión térmica con cruce cero a la temperatura de funcionamiento del dispositivo resonante óptico, preferiblemente a temperatura ambiente o a temperaturas criogénicas. Las superficies portadoras comprenden secciones superficiales del cuerpo del separador. Preferiblemente, las superficies portadoras son secciones de superficie plana que se extienden perpendiculares al plano principal del resonante. Las superficies portadoras son superficies laterales externas del cuerpo del separador. Los sustratos de espejo de los espejos resonantes preferiblemente están fabricados de materiales transparentes, lo que permite así el acoplamiento de la luz en los resonantes, y materiales que tienen simultáneamente un coeficiente de expansión térmica que es igual a o se encuentra emparejado con el coeficiente de expansión térmica del material del cuerpo separador.

Además, de acuerdo con la invención, la primera trayectoria de luz resonante se extiende a través de un primer cuerpo de separación en el cuerpo de separación entre las primeras superficies portadoras, y la segunda trayectoria de luz del resonante se extiende a través de un segundo cuerpo de separación en el cuerpo de separación entre las segundas superficies portadoras. El primer cuerpo del separador y el segundo cuerpo del separador son canales huecos a través del cuerpo del separador, que se bisectan por su intersección. Cada uno del primer y segundo orificios del cuerpo del separador presentan un diámetro interno mayor que el diámetro modal de al menos un primer modo resonante y al menos un segundo modo resonante, respectivamente. Los orificios del cuerpo del separador generalmente también pueden entenderse como agujeros o canales a través del cuerpo del separador, y están completamente encerrados radialmente por el material del cuerpo del separador.

Preferiblemente, el cuerpo del separador presenta una forma de placa que se extiende a lo largo del plano principal del resonante. La dimensión del cuerpo del separador perpendicular al plano principal del resonante es indicado como el grosor del cuerpo del separador. El grosor del cuerpo del separador es seleccionado de manera que el cuerpo del separador tenga suficiente estabilidad mecánica y las superficies portadoras tengan un tamaño suficiente para unir los espejos del resonante.

De acuerdo con un segundo aspecto general de la invención, el objetivo anterior es solucionado mediante un método de captura de átomos para crear una disposición bidimensional de átomos, en donde se usa el dispositivo resonante óptico de acuerdo con el primer aspecto general de la invención anterior. El método de captura de átomos comprende las etapas de crear la trampa de red óptica en una región donde el primer y segundo modos del resonante se cruzan entre sí. La trampa de red óptica es creada al acoplar haces láser en el primer y segundo resonantes. Debido a la geometría resonante de cada uno de los resonante, se soportan los modos del resonante que se superponen en la intersección de los resonantes, de manera que se forma la trampa de red óptica. Una nube de átomos en el dispositivo del resonante óptico se captura en la trampa de red óptica. Los átomos pueden ser introducidos en el dispositivo resonador óptico antes o después de crear la trampa de red óptica. Cuando los átomos se posicionan en los extremos del campo de la trampa de red óptica, las aplicaciones de metrología y/o simulación de los átomos capturados pueden implementarse tal como se describe a continuación.

Preferiblemente, la etapa de crear la trampa de red óptica comprende acoplar el primer y segundo haz de láser de onda continua (cw) en el primer y segundo resonantes ópticos, respectivamente, de tal manera que la trampa de red óptica está formada por el solapamiento del primer y segundo modos del resonante en la intersección de primer y segundo cuerpos de separación. Con la aplicación preferida de la invención, se puede proporcionar la obtención de imágenes de los átomos capturados en la trampa de red óptica con un dispositivo de obtención de imágenes, excitación y detección de las transiciones entre los estados de energía de los átomos capturados y/o la explotación de las interacciones entre los átomos con propósitos de simulación cuántica y/o cálculo cuántico.

Ventajosamente, el dispositivo resonante óptico de la invención permite la provisión de dos modos de campo de luz óptica bien superpuestos con un gran diámetro de modo. El dispositivo resonante óptico es adecuado para el funcionamiento en vacío, y presenta una estabilidad extremadamente elevada lo cual no existe hasta ahora en el campo de las trampas de red óptica. El empleo del cuerpo del separador facilita el ajuste de los resonantes ópticos (un único ajuste, ajuste inicial por resonante) y proporciona estabilidad y durabilidad después del ajuste inicial. A diferencia de las técnicas convencionales, por ejemplo, la Ref. [18], los espejos resonantes no están montados en soportes de espejo, sino que están fijados directamente de manera plana bidimensional al cuerpo del separador. La invención utiliza el cuerpo del separador como un único soporte de espejo sin partes móviles que transportan todos los espejos del primer y segundo resonantes ópticos. Se evitan todas las inestabilidades introducidas por múltiples soportes de espejos.

En particular, la invención aborda los desafíos que enfrenta tanto la metrología cuántica como la simulación cuántica con átomos ultrafríos en redes ópticas. Estos desafíos son resueltos al reflejar los haces de láser de la red entre los espejos de alta reflectividad muchas veces. Este resonante óptico mejora por lo tanto la intensidad de la red óptica y permite usar grandes haces. Tanto los estándares de frecuencia óptica como los simuladores cuánticos se benefician en gran medida del uso de redes ópticas en más de una dimensión. Por esta razón, la invención proporciona dos de tales cavidades ópticas con ejes diferentes, preferiblemente ortogonales, de manera que las ondas estacionarias resultantes se superponen perfectamente.

La creación de dos grandes haces resonantes, por ejemplo, a longitudes de onda visibles y/o cercanas al infrarrojo pone requisitos extremos en la precisión mecánica de la estructura de soporte para los espejos resonantes. La invención supera este desafío técnico como lo han demostrado los inventores. La invención usa un diseño completamente pasivo de los componentes resonantes, es decir, los resonantes están libres de materiales mutuamente móviles. Todos los componentes del dispositivo resonador preferentemente son sólidos térmicamente estables, en particular vidrios, que se unen ópticamente sin ningún adhesivo. El vidrio de expansión ultra bajo garantiza que la alineación de las redes ópticas sea estable frente a las influencias térmicas. Esta construcción también hace que la invención sea resistente a grandes aceleraciones y la hace compatible con los requisitos de vacío extremo alto (XHV). Al cambiar los parámetros del recubrimiento reflectante en los sustratos de espejo de los espejos resonante, en particular los materiales y grosores de las capas dieléctricas de los mismos, la invención puede adaptarse a cualquier longitud de onda óptica compatible con la tecnología de película delgada de alta calidad. Estas características resuelven muchos de los problemas técnicos en la simulación cuántica convencional. Sin embargo, también hacen que la invención sea única para su inclusión en cualquier reloj de red óptica transportable, particularmente para misiones espaciales.

De acuerdo con una modalidad preferida de la invención, los primeros espejos resonantes están unidos a las primeras superficies portadoras y los segundos espejos resonantes están unidos a las segundas superficies portadoras sin el uso de adhesivos. Ventajosamente, cualquier inestabilidad mecánica o térmica del dispositivo resonante óptico están minimizados al omitir adhesivos. Particularmente preferido, el primer y segundo espejos resonantes están unidos ópticamente a la primera y segunda superficies portadoras, respectivamente. La unión óptica tiene ventajas en términos del simple proceso de implementación.

De acuerdo con una modalidad preferida adicional de la invención, al menos un espejo del primer par de espejos resonante comprende un espejo curvado (primer espejo curvado) y al menos un espejo del segundo par de espejos resonante comprende un espejo curvado (segundo espejo curvado). Preferiblemente, los espejos curvados son espejos esféricos. Proporcionar los espejos curvados proporciona un diseño que soporta todos los modos de Hermite-Gauss TEM_{ij} (modos de resonantes que son descritos con funciones de Hermite-Gauss) de los resonantes. Para crear la trampa de red óptica, el TEM de modo Hermite-Gauss de orden más bajo₀₀ es usado, es decir, el primer y segundo espejos resonantes soportan haces de láser del resonante Gaussiano. Preferiblemente, el primer y segundo resonantes ópticos son diseñados de manera que el primer y segundo modos del resonante se intersectan entre sí en una sección central donde ambos modos tienen diámetros iguales o suficientemente grandes.

De acuerdo con una modalidad particularmente preferida de la invención, el primer y segundo espejos curvados tienen un radio de curvatura que es seleccionado de manera que la trampa de red óptica tenga una dimensión de $2^* w_0$ en el plano del resonante principal de al menos 300 μm , en particular al menos 400 μm , en donde w_0 es el $1/e^2$ radio de la cintura del primer y segundo modos del resonante.

Ventajosamente, la invención puede proporcionar cinturas de, por ejemplo, aproximadamente 400 μm a la longitud de onda requerida. La implementación de la invención proporciona un factor de mejora de 16 en el tamaño del sistema. Usar 16 veces más átomos mejora directamente la relación señal a ruido de un estándar de frecuencia por un factor de 4 mediante el uso de promediado clásico solo. Aprovechar las técnicas metrológicas cuánticas [22] podría mejorar la relación señal-ruido por el factor completo de 16. La invención puede ser usada directamente para mejorar la homogeneidad y por lo tanto el número de sitios idénticos por el mismo factor de 16 mencionado anteriormente. Este factor mejora entonces directamente la fidelidad de cualquier simulación cuántica de vanguardia con átomos de tipo bosón o de tipo fermión porque hace que las partículas sean mucho más idénticas.

Si cada resonante es una combinación de uno de los espejos curvados y los espejos planos, es decir, si los primeros espejos resonantes comprenden el primer espejo curvado y un primer espejo plano y los segundos espejos resonante comprenden el segundo espejo curvado y un segundo espejo plano, son obtenidas ventajas en términos de superposición los modos del resonante y crear la trampa de red óptica.

Preferiblemente, el material de ultrabaja expansión tiene una expansión térmica como el vidrio de ultrabaja expansión (nombre comercial). Particularmente preferido, el cuerpo del separador monolítico está fabricado de una pieza de vidrio de expansión ultrabaja. Alternativamente, el cuerpo del separador monolítico puede estar hecho de otros materiales de vidrio que no tienen o tienen una expansión térmica insignificante tal como el vidrio de ultrabaja expansión. Como alternativa adicional, el cuerpo del separador puede estar fabricada de silicio cristalino. Como la última modalidad requiere sustratos de espejo de silicio, de manera que no existe ninguna expansión térmica diferencial entre el espejo y el separador y el silicio no es transparente a la luz visible, sino a longitudes de onda de telecomunicaciones (por ejemplo, 1550 nm) esta modalidad está adaptada para aplicaciones de intervalo de longitud de onda infrarroja. Además, la modalidad del espacio de silicio cristalino está operado a 100 K, donde es obtenido un cruce cero de la expansión térmica del silicio.

Si, de acuerdo con una modalidad adicional preferida de la invención, los primer y segundo orificios del cuerpo del separador son ortogonales entre sí en el plano principal del resonante, son obtenidas ventajas en términos de una distribución homogénea de los extremos del campo local de la trampa de red óptica. Por otro lado, si el primer y segundo cuerpos de separador no son ortogonales entre sí, puede crearse otra distribución deformada de extremos de campo local de la trampa de red óptica si se requiere para una aplicación particular del dispositivo resonante óptico.

Particularmente preferido, los primer y segundo orificios del cuerpo del separador están dispuestos en el cuerpo del separador con simetría especular con relación a un plano normal orientado perpendicular al plano principal del resonante. Ventajosamente, la estabilidad del cuerpo del separador aumenta con la simetría de los orificios del cuerpo del separador. Además, las posibles vibraciones mecánicas del cuerpo tienen simetría con relación al plano normal también, de manera que es minimizada una influencia de las vibraciones mecánicas en la creación de la trampa de red óptica.

De acuerdo con una modalidad ventajosa adicional de la invención, el cuerpo del separador monolítico tiene un tercer orificio del cuerpo del separador que se extiende perpendicular al plano principal del resonante y que atraviesa el primer y segundo orificios del cuerpo del separador en su intersección. Ventajosamente, el tercer orificio del cuerpo del separador cumple una doble función. En primer lugar, es facilitada la evacuación del espacio interno del cuerpo del separador. La evacuación puede acelerarse y/o puede evitarse una evacuación inhomogénea. En segundo lugar, el tercer cuerpo del separador ofrece un acceso óptico adicional a la trampa de red óptica. Por lo tanto, de acuerdo con una modalidad particularmente preferida de la invención, el dispositivo resonante óptico comprende además un dispositivo de obtención de imágenes, como por ejemplo un microscopio óptico que está dispuesto para obtener imágenes de la trampa de red óptica a lo largo del tercer cuerpo del separador del orificio. El tercer orificio del cuerpo del separador tiene preferiblemente un diámetro mayor que el diámetro del primer y segundo orificios del cuerpo del separador, en particular un diámetro que permite la posición de la lente delantera de la óptica del dispositivo de obtención de imágenes justo adyacente a la trampa de red óptica. Ventajosamente, esto permite un monitoreo óptico y/o una investigación espectroscópica de la trampa de red óptica con una gran apertura numérica y alta resolución.

Adicional o alternativamente, puede disponerse el tercer cuerpo del separador para alojar una tercera trayectoria de luz con una dirección que se desvía del plano principal del resonador y un espejo retrorreflector puede disponerse para crear un campo de luz de captura a lo largo de la tercera trayectoria de luz. En este caso, el tercer cuerpo del separador se interseca preferentemente con todo el cuerpo del separador, de manera que la luz láser para confinar la trampa de red óptica perpendicular al plano principal del resonante puede introducirse desde un lado opuesto al dispositivo de obtención de imágenes. El espejo retrorreflector puede estar proporcionado por una sección de la lente delantera de la óptica del dispositivo de formación de imágenes.

Si el cuerpo del separador monolítico tiene al menos un cuerpo del separador adicional que se extiende paralelo al plano del resonante principal y que atraviesa el primer y segundo cuerpos separadores en su intersección, se obtienen ventajas adicionales en términos de acoplamiento de haces de luz de medición adicionales en la trampa de red óptica, por ejemplo, para interrogar los átomos capturados o sus interacciones. Con un ejemplo particularmente preferido, el cuerpo del separador monolítico presenta dos orificios del cuerpo del separador adicionales que se disponen simétricamente con relación a la disposición del primer y segundo orificios del cuerpo del separador. De nuevo, las ventajas del comportamiento mecánico del cuerpo del separador son obtenidos con la simetría de los dos orificios del cuerpo del separador adicionales.

Otra ventaja particular de la invención resulta del hecho de que no existen restricciones particulares con respecto a la forma externa del cuerpo del separador del dispositivo del resonante óptico. La forma externa del cuerpo del separador puede seleccionarse dependiendo de las condiciones de aplicación particulares del dispositivo del resonante óptico, por ejemplo, una forma de separador cúbica, una forma de separador poligonal o una forma de separador cilíndrica, es decir, un área de huella de la placa del cuerpo del separador paralela al plano principal del resonante puede tener, por ejemplo, una forma circular, elíptica, rectangular o poligonal u otra forma.

De acuerdo con una modalidad particularmente preferida de la invención, el cuerpo del separador monolítico presenta una forma de un octágono que se extiende paralelo al plano del resonante principal, en donde la primera y segunda superficies portadoras son superficies laterales del octágono. El octágono tiene ventajas particulares en términos de proporcionar múltiples orificios de cuerpo de separador, simetría de orificio y simetría de posibles vibraciones corporales.

De acuerdo con una variante preferida adicional de la invención, los primer y segundo espejos resonadores tienen recubrimientos dieléctricos que proporcionan una reflectividad de al menos 99 %. Este límite permite un acoplamiento eficiente de los haces láser en las cavidades cruzadas y simultáneamente una mejora resonante de los haces láser, por ejemplo, con una finura de al menos 300 y una mejora de al menos 100. Particularmente preferido, los recubrimientos dieléctricos son diseñados para proporcionar la reflectividad de al menos 99 % para múltiples longitudes de onda resonantes del primer y segundo resonantes ópticos.

Preferiblemente, las medidas geométricas del dispositivo resonante óptico son seleccionadas con al menos uno de los siguientes intervalos. El cuerpo del separador tiene preferiblemente una dimensión, por ejemplo, diámetro (longitud) a lo largo del plano principal del resonante en un intervalo de 3 cm a 20 cm. Adicional o alternativamente, los primer y segundo espejos resonadores pueden tener un diámetro en un intervalo de 10 mm a 30 mm. Este intervalo de diámetro es preferido en términos de diámetros de modo grande en la intersección del primer y segundo resonantes ópticos y la capacidad de pulir el(los) espejo(s) resonante(es) curvado(s). Adicional o alternativamente, cada uno del primer y segundo pares de espejos resonantes comprende un espejo curvado que tiene un radio de curvatura en un intervalo de 1 m a 20 m. Adicional o alternativamente, cada uno del primer y segundo pares de espejos resonantes puede disponerse con una alineación de tal manera que los haces de láser reflejados dentro del primer y segundo resonantes ópticos son desplazados del centro del orificio por menos del 25 % del diámetro del orificio. Adicional o alternativamente, los haces de láser dentro de los resonantes cruzados no se desvían de los ejes centrales del resonante en más de 1 mm.

De acuerdo con un tercer aspecto general de la invención, el objetivo anterior es solucionado mediante un aparato de trampa de átomos, que está adaptado para crear una disposición bidimensional de átomos y que comprende el dispositivo resonante óptico de acuerdo con el primer aspecto general de la invención. El aparato de trampa de átomos incluye además un dispositivo láser que está siendo adaptado para acoplar haces de láser de onda continua en el primer y segundo resonantes ópticos, una fuente de átomos y un dispositivo de suministro que está siendo conectado con el dispositivo resonante óptico que es adaptado para crear una nube de átomos e introducir los átomos, por ejemplo, con trampas ópticas y/o magnéticas en el dispositivo resonante óptico, y un dispositivo de obtención de imágenes que se adapta para obtener imágenes de la red de trampa óptica en el dispositivo resonante óptico.

De acuerdo con una primera aplicación principal de la invención, el aparato de trampa de átomos es un reloj atómico óptico. Con esta modalidad, el dispositivo de obtención de imágenes está dispuesto para sondear las transiciones ópticas en los átomos capturados, como, por ejemplo, los átomos de Sr. De acuerdo con una aplicación principal adicional de la invención, el aparato de trampa de átomos está configurado como un dispositivo de simulación cuántica o cálculo cuántico.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Se describen a continuación más detalles y ventajas de la invención con referencia a los dibujos adjuntos, los cuales muestran esquemáticamente en:

Figura 1: una primera modalidad del dispositivo resonante óptico de acuerdo con la invención;

Figura 2: características adicionales de una modalidad del dispositivo resonante óptico de acuerdo con la invención;

Figuras 3 y 4: ilustraciones del modo de ajuste en el dispositivo resonante óptico,

Figura 5: características de la modalidad de un aparato de trampa de átomos de acuerdo con la invención;

Figura 6: una modalidad de un aparato para fabricar el dispositivo resonante óptico de acuerdo con la invención; y

Figura 7: un ejemplo de una medición de superposición después de ensamblar el dispositivo resonante óptico.

REALIZACIONES PREFERENTES DE LA INVENCION

Las características de las modalidades preferidas de la invención son descritas a continuación con referencia a la configuración del dispositivo de resonante óptico y la estructura del aparato de trampa de átomos. Los detalles de las aplicaciones de la invención, como los detalles de la operación de un reloj atómico óptico o un simulador cuántico no se describen ya que son implementados como son conocidos por sí mismos a partir de técnicas de la técnica anterior. La implementación de la invención no se limita a las modalidades ilustradas, por ejemplo, con respecto a la forma de octágono y/o dimensiones del cuerpo del separador y características de los espejos, sino que corresponde de manera posible con características modificadas cubiertas por las presentes reivindicaciones.

DISEÑO DE CAVIDAD CRUZADA DEL DISPOSITIVO RESONANTE ÓPTICO

Las Figuras 1 y 2 muestran una vista lateral (Figura 1) y múltiples vistas fantasma (Figuras 2A a 2E) de modalidades del dispositivo resonante óptico inventivo 100 con el primer y segundo resonantes ópticos cruzados 10, 20 y el cuerpo de separación 30 de los mismos. La Figura 2A muestra una vista superior del cuerpo del separador 30 con

ES 2 991 935 T3

espejos resonantes unidos, mientras que las Figuras 2B a 2D muestran vistas laterales ilustrativas del cuerpo del separador 30 (sin los espejos).

Las cavidades cruzadas, o "cavidad cruzada", del primer y segundo resonantes ópticos 10, 20 son proporcionados por el cuerpo del separador en forma de octágono de expansión ultrabaja de vidrio 30, dos espejos curvados 11A, 21A, y dos espejos planos 11B, 21B. Los espejos resonantes 11A, 11B, 21A, 21B están fijados a la primera y segunda superficies portadoras 31, 32 proporcionadas por cuatro de las ocho superficies laterales del cuerpo del separador del octágono 30.

Las propiedades del material del cuerpo del separador octagonal determinan ventajosamente la estabilidad y robustez del diseño del resonante de cavidad cruzada. Con una modalidad preferida, el material del cuerpo del separador es vidrio Corning 7972 de expansión ultrabaja (ULE) (nombre comercial), pero pueden usarse vidrios de otros fabricantes, siempre que presenten una expansión térmica igualmente pequeña. El coeficiente de expansión térmica (CTE) para el vidrio ULE se especifica en (0 ± 30) ppb/K para las temperaturas de operación en el intervalo de 5 a 35 °C. Incluso para un intervalo mucho mayor de temperaturas de operación concebibles de -100 a +160 °C, el CTE permanece por debajo de 1 ppm/K. El CTE determina la estabilidad de la longitud del cuerpo del separador octagonal 30 y, por lo tanto, la estabilidad de frecuencia de las cavidades ópticas resultantes. Además, las inhomogeneidades de temperatura podrían inducir tensión en el cuerpo del separador, crear un ángulo efectivo y por lo tanto influir en la superposición del modo. Además de la compatibilidad con el vacío, esta es otra razón por la cual la invención se basa en el contacto sin adhesivo con los espejos. Cualquier adhesivo tiene propiedades de expansión térmica mucho peores que el vidrio ULE, lo cual introduciría una fuerte sensibilidad de la superposición de modos a las fluctuaciones de temperatura.

La Figura 1 ilustra esquemáticamente un ejemplo de una estructura de montaje (abrazadera) 50, que puede ser usada para montar el dispositivo resonante óptico 100 dentro de una cámara de vacío 60. La estructura de montaje 50 comprende cuatro tornillos 51 que conectan una placa de sujeción 53 a una pared 61 de la cámara de vacío 60. Las bolas de acero inoxidable 52 son proporcionadas para transmitir la fuerza entre el cuerpo de separación 30 y la estructura de montaje 50 simétricamente en cuatro puntos diferentes en el cuerpo de separación 30. El cuerpo separador 30 está alineado con una ventana de vacío 62 dentro de la pared 61. El puerto de vacío 62 se fabrica de vidrio, mientras que la pared 61 se fabrica de acero.

Una primera trayectoria de luz del resonante 12 se extiende a través de un primer orificio del cuerpo del separador 33 en el cuerpo del separador 30 entre las primeras superficies portadoras 31, y una segunda trayectoria de luz del resonante 22 se extiende a través de un segundo orificio del cuerpo del separador 34 entre las segundas superficies portadoras 32. La primera y segunda trayectorias de luz del resonante 12, 22 definen un plano resonante principal (plano x-y), y se cruzan entre sí en un centro de simetría del cuerpo de separación 30, donde se forma la trampa de red óptica 1 (Figura 2). Un tercer orificio del cuerpo del separador 35 con una tercera trayectoria de luz del resonante 36 se extiende perpendicular al plano principal del resonador (x-y) y atraviesa el primer y segundo orificios del cuerpo del separador 33, 34 en su intersección. El cuerpo del separador 30 presenta dos orificios del cuerpo del separador 37 adicionales que se extienden paralelos al plano principal del resonante (x-y) y cruzan ortogonalmente los primer y segundo orificios del cuerpo del separador 33, 34 en su intersección.

Cada combinación de espejos curvados (11A, 21A) y planos (11B, 21B) forma un resonador óptico con modos de Hermite-Gaussiano, como se muestra en la Figura 3. Los espejos 11A, 11B, 21A, 21B están fijados al cuerpo del separador 30 de tal manera que los modos de Hermite-Gaussian de orden más bajo (el TEM₀₀ modos) para cada eje se cruzan entre sí en el cuerpo del tercer separador central 35 del cuerpo de forma octagonal.

Cada espejo resonante 11A, 11B, 21A, 21B comprende un sustrato de espejo de sílice fundido de 12,7 mm de diámetro, por ejemplo, y un recubrimiento de espejo que se aplica a una superficie frontal del espejo orientada hacia el primer y segundo resonantes ópticos 10, 20, respectivamente. Para unir los espejos 11A, 11B, 21A, 21B a la primera y segunda superficies portadoras 31, 32, todos los sustratos de espejo tienen un espacio anular sin recubrir alrededor del recubrimiento de espejo. Este espacio anular es una superficie de anillo plana interferométricamente que permite unir el espejo al cuerpo de separación 30 sin ningún adhesivo. En su lugar, los espejos están unidos al cuerpo del separador 30 con fuerzas de van der Waals, mediante un proceso llamado contacto óptico. La forma adecuada de la superficie frontal del espejo, que incluye el espacio anular no recubierto y el recubrimiento del espejo, puede ser fabricado mediante técnicas de pulido y deposición disponibles y probarse con un interferómetro óptico (por ejemplo, Zygo PTI250).

La superficie curva de los espejos curvados 11A, 21A tiene un radio de curvatura R muy grande de aproximadamente 10 m. Se prefiere un radio tan grande, porque la $1/e^2$ diámetro $2w_0$ del TEM₀₀ modos de las cavidades se determinan por

$$2w_0 = 2\sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left(\frac{R - L}{L} \right)^{1/4} \quad (1)$$

donde es la longitud de onda de la luz láser acoplada en los resonantes ópticos y $L = 50$ mm es la longitud de la cavidad de los resonantes ópticos. Para una longitud de onda cercana al infrarrojo típica de $\lambda = 813$ nm usada en relojes de red óptica de estroncio, la Ecuación (1) predice un diámetro de modo en la región de intersección de los orificios 33, 34 de 850 μ m. Tales diámetros de modo grandes se logran con espejos con un radio de curvatura de 10

m. Pulir el espacio anular en sustratos de espejo de 12,7 mm con tales radios es técnicamente desafiante. La razón de esta dificultad puede entenderse al calcular la profundidad de la región central curvada de la superficie curvada. Suponiendo que el diámetro de la región curva es D , la profundidad d de la región esférica puede calcularse a partir

$$d = \frac{D^2}{8R} \quad (2)$$

Para el sustrato de espejo de 12,7 mm de diámetro y un espacio anular de contacto de 2 mm de ancho, la Ecuación (2) da como resultado una profundidad de menos de un micrómetro. Tal pequeña profundidad es obtenida con extremo cuidado al pulir el espacio anular en un sustrato curvado, mientras se evita degradar la calidad de la superficie de la superficie curvada en el proceso. Para la comparación, un sustrato típico de una pulgada con un radio de curvatura de 50 cm, el cual es usado para las cavidades de referencia láser típicas, puede ser aplanado en aproximadamente 160 μm para lograr una región esférica uniformemente grande y un espacio anular mucho más grande. Reducir R a 50 cm para la geometría presente daría como resultado un diámetro de modo de 360 μm para una longitud de onda de 689 nm. Esta reducción en más de un factor de dos en modo diámetro podría ser aceptable si se puede tolerar una reducción en la homogeneidad de la red óptica en una aplicación particular de la invención.

El radio de curvatura preferiblemente grande conduce a estrictos requisitos para la precisión de fabricación del cuerpo del separador de octágono 30 para asegurarse de que tanto el TEM_{00} modos se superponen bien. Para radios de curvatura de más de un metro, cada modo es proporcionado con un ángulo relativo entre los espejos menor que unos pocos segundos de arco, de tal manera que un modo puede generarse en el centro del espejo sin que se corte por el orificio de 4 mm de diámetro en el separador. Como se ilustra en la Figura 3, el cambio de modo es dado por

$$\Delta h = R \sin \beta \quad (3)$$

A partir de la Ecuación (3), puede observarse que el cambio de modo se da por el ángulo relativo β entre las superficies de espejo y el radio de curvatura R . Esta relación es independiente de la longitud del cuerpo del separador 30 a lo largo del resonante óptico. Debido a que se emplea un R grande, por ejemplo, hasta 10,2 m y para minimizar los cambios de modo residuales, el ángulo relativo especificado se restringe preferiblemente a 1 arco segundo en los planos opuestos del cuerpo del separador 30 con los orificios de 4 mm 33, 34.

Además, se especifica que un ángulo entre una superficie de referencia superior 38 (ver Figura 2) y los pares de superficies 31, 32 asignados para los espejos sea inferior a 30 segundos de arco para proporcionar modos ortogonales a las superficies cuando el separador de octágono entra en contacto ópticamente con ellos. Esta restricción de ortogonalidad es determinada a partir de

$$\Delta h = L/2 \tan \gamma \quad (4)$$

donde γ parametriza la desviación de la ortogonalidad perfecta entre las superficies de espejo y la superficie de referencia superior 38. Con la presente descripción, los cambios de modo resultantes pueden ser limitados a menos de 4 μm .

Otra característica preferida del diseño del cuerpo del separador 30 es la simetría y el tamaño de los orificios 33, 34, 35 y 37. Los agujeros más grandes reducen la estabilidad mecánica y por lo tanto del material contra la deformación, y en consecuencia reducen las frecuencias propias vibracionales del cuerpo de separación 30. Los tamaños de orificio son elegidos de manera que son obtenidos de un modo propio vibracional más bajo con una frecuencia de vibración por encima de las escalas de energía típicas en los sistemas cuánticos que se forman cuando se capturan átomos en redes ópticas, con la presente modalidad, es obtenido, por ejemplo, 20 kHz. Esto es preferido porque las vibraciones del cuerpo del separador 30 a las frecuencias correspondientes a estas escalas de energía de cualquier otra manera pueden provocar un fuerte calentamiento que conduce a una pérdida de fidelidad [19, 20]. Basado en simulaciones numéricas, el diseño del separador puede ser adaptado a otros requisitos de frecuencia de vibración al cambiar los tamaños de orificio o el grosor del separador.

Las características preferidas del grosor del cuerpo del separador 30 en la dirección z (perpendicular al plano principal del resonante) y el diámetro del orificio central son seleccionados de manera que las trampas de la red óptica final en la intersección de los orificios 33, 34 sean accesibles mediante ópticas de imagen de alta resolución del dispositivo de obtención de imágenes 40 (ver la Figura 1). La resolución de cualquier sistema de obtención de imágenes es directamente proporcional a su apertura numérica. La apertura numérica está limitada por el grosor del cuerpo del separador y el diámetro del tercer orificio del cuerpo del separador 35. Por otra parte, el separador es lo suficientemente grueso como para permitir el contacto de los sustratos de espejo con su primera y segunda superficies portadoras laterales 31, 32. Además, la velocidad de bombeo al vacío fuera del centro del cuerpo del separador 30 se da por las mismas consideraciones de apertura numérica. Por estas razones, el grosor del cuerpo del separador y el diámetro del orificio central 35 son determinadas preferiblemente como un compromiso entre todas las consideraciones anteriores.

La tolerancia angular dada por la Ecuación (3) también se traduce en una restricción sobre las tolerancias de los

sustratos de los espejos curvados 11B, 21B. Un ángulo de error entre la región curvada y la región anular conduce al mismo cambio de modo que en la Ecuación. (3). La Figura 4 visualiza cómo tal error de "cuña" puede surgir a través de un pulido imperfecto. Cuando el espejo es paralelo a la superficie del separador (primer y segunda superficies portadoras 31, 32) o está en contacto ópticamente, el punto más profundo de la superficie curva determina la posición del modo. Por esta razón, el error de cuña preferiblemente está limitado a la misma tolerancia angular que el paralelismo de la superficie del separador.

También es preferido aplicar el recubrimiento reflectante al sustrato de espejo curvado después de que se haya terminado el pulido. Durante el proceso de recubrimiento, se enmascara la región anular, de manera que no se aplica material de recubrimiento al espacio anular. La razón principal de esta medida es que los inventores han descubierto que la resistencia de unión entre una superficie recubierta y el separador es significativamente menor que la de una superficie no recubierta. La aplicación del recubrimiento de espejo después del pulido tiene dos ventajas adicionales: Primero, evita que el proceso de pulido rasgue el recubrimiento reflectante. En segundo lugar, sin el recubrimiento de espejo, la región esférica puede pulirse nuevamente para mantener las proporciones de espacio anular y radio de curvatura.

MODALIDADES DE UN APARATO DE TRAMPA DE ÁTOMOS

Las modalidades de un aparato de trampa de átomos 200 son descritas a continuación con referencia a la Figura 5 que muestra esquemáticamente aplicaciones tales como un reloj de red óptica transportable o una óptica de red en simulación cuántica. Generalmente, el aparato de trampa de átomos 200 comprende el dispositivo resonante óptico 100 de acuerdo con la invención, un dispositivo láser con dos fuentes láser 210, 220 que se disponen y adaptan para acoplar haces láser de onda continua en el primer y segundo resonantes ópticos del dispositivo de resonancia óptico 100, una fuente de átomos y un dispositivo de suministro 230 conectado con el dispositivo resonante óptico 100, el dispositivo de formación de imágenes 240 que es adaptado para formar imágenes de la red de trampa óptica en el dispositivo resonante óptico 100, y un láser de interrogación 250. En lugar de las dos fuentes de láser 210, 220, puede usarse una única fuente de láser, si su ajuste es suficiente. Además, se proporciona un dispositivo de control y medición 260, que está dispuesto para controlar los componentes 210, 220, 230 y 240 y/o para recolectar y analizar los datos de medición. Preferiblemente, el dispositivo de control y medición 260 comprende una unidad de ordenador. Se pueden proporcionar dispositivos láser adicionales para manipular y/o detectar los átomos en la red de trampa óptica en el dispositivo resonante óptico 100.

El diseño de cavidad cruzada inventivo del dispositivo resonante óptico 100 es especialmente adecuado para su implementación en relojes de red óptica transportables como se ha descrito anteriormente. Dado que la invención emplea una pieza monolítica de material, por ejemplo, vidrio altamente estable, el solapamiento de los modos de la cavidad será estable durante una cantidad de tiempo ilimitada. La cavidad en sí, así como también el solapamiento, son inmunes al choque, la agitación o cualquier influencia mecánica a corto plazo que no dañe el vidrio. Solo la tensión mecánica a largo plazo puede cambiar el solapamiento, cuando es aplicado de manera no simétrica. Este efecto puede ser suprimido fuertemente por una estructura de montaje adecuada 50 (ver la Figura 1), como se hace para cualquier cavidad de referencia de láser. Más abajo se ha descrito un ejemplo detallado de cómo montar la cavidad cruzada.

En los satélites o estaciones espaciales se puede esperar que las fluctuaciones de temperatura sean mayores que en un laboratorio en la Tierra. El separador de cavidad está hecho de, por ejemplo, vidrio de expansión ultrabaja (ULE) que presenta un coeficiente de expansión térmica muy pequeño. Para temperaturas particulares, este coeficiente incluso cruza cero, un efecto que es explotado en las cavidades de referencia láser. Por esta razón, incluso los gradientes térmicos que cambiarían el ángulo relativo de los espejos conducen a cambios insignificantes en la superposición de modos.

El resonante también sirve como una cavidad de acumulación para mejorar la potencia que se acopla en él. Esto permite usar diámetros de haz más grandes que dan como resultado tamaños de sistema más grandes como se ha descrito anteriormente. Además de tamaños de sistema más grandes, la cavidad cruzada de acumulación también reduce la energía necesaria para crear estructuras de malla lo suficientemente profundas. Por esta razón, la invención puede ser usada con láseres de diodo de baja potencia en lugar de láseres de estado sólido de alta potencia, la cual es una característica preferida para las aplicaciones de sistemas basados en el espacio.

Como se ha descrito anteriormente, en los campos de la simulación cuántica y la metrología cuántica, las redes ópticas unidimensionales son generadas por un haz de luz incidente enfocado y un retrorreflector. Las cavidades por diseño tienen un solapamiento perfecto del haz incidente y retrorreflejado. Para obtener una red tridimensional, tres redes unidimensionales tienen que superponerse. Para los haces retrorreflejados, esto da como resultado muchos grados de libertad los cuales son sensibles cuando se trata de $1/e^2$ radios de haz de aproximadamente 100 μm . Incluso los experimentos de laboratorio de vanguardia con redes retrorreflejadas muestran derivas a lo largo de un único día [20].

La invención solo utiliza un procedimiento de alineación simple de los haces de entrada al resonante óptico, porque el dispositivo resonante óptico 100 en sí mismo es estable y no cambia. La alineación de los haces de entrada al dispositivo resonante óptico 100 es tan simple como maximizar la transmisión de un modo eléctrico transversal gaussiano (TEM_{00}) modo a través del dispositivo resonante óptico 100. Este procedimiento es mucho más rápido que el alineamiento de una red óptica de espacio libre, lo cual requiere realizar un experimento completo con átomos capturados para cada prueba de alineación.

Los haces de láser no son necesariamente de la misma intensidad gaussiana, especialmente cuando se emiten directamente por láser de diodo. La calidad del haz de láser es degradada aún más cuanto más componentes ópticos atraviesa en su camino hacia la muestra atómica, principalmente debido a las aberraciones de la lente o la dispersión de partículas de polvo. A diferencia, la cavidad cruzada inventiva es capaz de filtrar y limpiar el modo en la posición de los átomos, y sus espejos en vacío son protegidos de la contaminación.

Como se ha descrito anteriormente, la mejora en la homogeneidad de la red y el diámetro del haz conducirá a mejores fidelidades para los simuladores cuánticos y los relojes de red óptica.

MODALIDADES DE UN MÉTODO DE CAPTURA DE ÁTOMOS

Se crean dos redes ópticas estables, de gran diámetro, bien superpuestas de la siguiente manera. Se hace referencia a una modalidad que es adecuada como un simulador cuántico de átomos ultrafríos o un reloj de red óptica y que se muestra en la Figura 1.

En la Figura 1, se muestra una vista esquemática de la configuración, que incluye el ancho del separador a de aproximadamente 50 mm, el ancho b del orificio central 35 de aproximadamente 20 mm, la altura del cuerpo del separador c de aproximadamente 15 mm y el grosor d de la ventana de vacío 62 de aproximadamente 5 mm. El dispositivo resonante óptico de cavidad cruzada 100 está montado en un lado de vacío de una cámara de vacío extremo (XHV) 60 con presiones por debajo de 10^{-11} mbar. Este intervalo de presión no es necesario para la funcionalidad del dispositivo resonante óptico 100 (funciona bien en condiciones de laboratorio), pero es preferido para maximizar la vida útil de los átomos capturados en la trampa de red óptica 1 creada. Alcanzar tiempos de vida atómicos muy por encima de las escalas de tiempo experimentales típicas de hasta decenas de segundos es usado para lograr una alta fidelidad en las simulaciones cuánticas y la metrología cuántica.

De acuerdo con la Figura 1, el dispositivo resonante óptico de cavidad cruzada 100 es sujetado al puerto de vacío 62, por ejemplo, con un grosor de 5 mm. En este ejemplo, el dispositivo resonante óptico 100 se sujeta al vidrio con cuatro tornillos 51. Las bolas de acero inoxidable 52 transmiten la fuerza entre el cuerpo de separación 30 y la estructura de montaje 50 simétricamente en cuatro puntos diferentes en el cuerpo de separación 30. Al aplicar la presión de sujeción de manera uniforme y simétrica al cuerpo del separador 30, el solapamiento del modo permanece sin cambios, lo cual puede ser verificado durante el ensamblaje con técnicas de medición del modo de solapamiento.

Un objetivo de microscopio de alta resolución 41 del dispositivo de obtención de imágenes 40 (microscopio de alta resolución) está montado lo más cerca posible del centro del dispositivo resonante óptico 100 para usar la abertura óptica más grande posible. El objetivo 41 tiene un diseño personalizado que corrige las aberraciones esféricas debido a la presencia del puerto de vista.

Las redes ópticas en el plano de objeto del dispositivo de obtención de imágenes 40 son generadas entonces al acoplar luz láser en los dos modos del resonante de la cavidad cruzada. La frecuencia del láser preferiblemente estabilizada a un modo de la cavidad correspondiente (resonantes ópticos 10, 20) mediante el uso de, por ejemplo, el método estándar de Pound-Drever-Hall. Para mejorar la calidad de las imágenes ópticas recolectadas con el dispositivo de imágenes 40, los átomos pueden confinarse aún más en la dirección vertical. El confinamiento adicional puede ser implementado al propagar una tercera red óptica desde la parte inferior a través del orificio del cuerpo del separador 35 del cuerpo del separador 30. Para mejorar aún más la insensibilidad del sistema de obtención de imágenes 40 al movimiento diferencial residual entre la cavidad cruzada y la óptica de obtención de imágenes, el haz vertical debe retroreflejarse de la superficie óptica final del objetivo del microscopio 41. Esto se obtiene mediante recubrimientos ópticos personalizados tanto para la ventana de vacío 61 como para la lente delantera del objetivo del microscopio 41.

Los átomos ultrafríos son cargados en la red óptica tridimensional resultante al transportarlos al centro de la cavidad cruzada de dos maneras (representadas esquemáticamente por 230 en la Figura 7). La primera opción es transportar los átomos hacia dentro de la cavidad con otra trampa óptica de dipolo horizontal que es generada por un láser no retroreflejado, por ejemplo, a través de orificios de cuerpo de separador 37 (ver la Figura 2). Al propagar este haz de láser a través de uno de los cuatro orificios horizontales de 5 mm, y desplazar su enfoque [21] desde una región de preparación al centro de la cavidad cruzada, los átomos pueden ser transportados a la región donde se forma la red óptica. La segunda opción es crear una trampa magnetoóptica (MOT) por debajo de la cavidad cruzada, y luego desplazarla hacia arriba al cambiar el cero del campo magnético de la trampa. En cualquier caso, la profundidad de las redes ópticas debe aumentarse lentamente mientras la trampa de transporte se apaga para transferir los átomos de manera óptima. Para reducir la temperatura atómica al transferir directamente desde un MOT, puede usarse una etapa de enfriamiento evaporativo intermedia. Si se usa una red vertical opcional, una única capa en el plano de objeto puede aislarse al usar un gradiente de campo magnético vertical. Este gradiente permite eliminar capas individuales de átomos al calentarlos con luz láser resonante hasta que se expulsan de la red óptica.

Una vez que se aísla una única capa, se pueden realizar experimentos en la red bidimensional horizontal. Para una simulación cuántica, se pueden usar rayos láser y campos magnéticos adicionales para controlar la evolución de los átomos a medida que atraviesan la red e interactúan entre sí. Para un estándar de frecuencia óptica, los átomos se evitarían que se produjera el túnel al aumentar la profundidad de la red horizontal, y luego se interrogarían con un láser de espectroscopia, por ejemplo, a través de los orificios del cuerpo del separador 37. Preferiblemente, se toma

una imagen de fluorescencia de los átomos en una cámara durante y/o al final del procedimiento. En un estándar de frecuencia óptica, resolver sitios de red individuales podría no ser tan importante como para un simulador cuántico, y podría usarse un tubo fotomultiplicador para detectar una señal atómica integrada espacialmente en su lugar. La alta resolución óptica sigue siendo beneficiosa incluso en este caso, porque maximiza la relación señal-ruido de la señal atómica. Una vez que se ha realizado un experimento, los átomos se eliminarían al apagar las redes ópticas, y se prepararía una nueva muestra como se ha explicado anteriormente.

La invención maximiza el acceso óptico disponible para los haces de control al proporcionar el gran orificio central 35 así como los cuatro orificios horizontales de 5 mm 33, 34, 37. El diámetro de 35 20 mm del orificio central es determinado como un compromiso entre la estabilidad mecánica (y las altas frecuencias propias acústicas) y la necesidad de un acceso óptico y una velocidad de bombeo de vacío en el centro de la cavidad cruzada.

MONTAJE Y ENSAMBLAJE DEL DISPOSITIVO RESONANTE ÓPTICO

El dispositivo resonante óptico 100 es ensamblado y la calidad de la superposición de modos se verifica al emplear un dispositivo de montaje 300 como se muestra en la Figura 6. Con el dispositivo de montaje 300, los espejos son unidos al cuerpo del separador de octágono 30 de manera determinística mientras se monitorea la calidad de la superposición de modos.

Preferiblemente, tanto el cuerpo del separador como los espejos son limpiados antes del montaje para hacer posible la unión entre las dos superficies. Aunque existen agentes de repulido especiales que facilitan el contacto óptico entre dos superficies de vidrio planas y lisas, preferiblemente no se usan debido a sus propiedades de desorción desconocidas bajo condiciones de XHV. Por esta razón, se usa un procedimiento de limpieza similar a los usados en la fabricación de semiconductores.

El cuerpo del separador es limpiado al suspenderlo en un alambre de acero inoxidable en un vaso de solución de limpieza RCA1 que consiste en peróxido de hidrógeno no estabilizado (30 %), hidróxido de amonio (28-30 %) y agua de grado HPLC o de grado semiconductor con una relación de mezcla de 1:1:5. La solución es hervida durante 15 minutos a 80 °C en una campana de extracción. El amoniaco residual es eliminado luego al suspender el vaso en un baño ultrasónico mediante el uso de agua de grado HPLC durante tres minutos. Finalmente, el cuerpo del separador es almacenado suspendido en otro vaso de precipitados precalentado con agua de grado HPLC. En este vaso, el cuerpo del separador puede ser transportado sin exponerlo al polvo. Una vez que el separador está listo para usarse, se retira del vaso y las gotas de agua residuales son sopladadas con nitrógeno seco filtrado por partículas.

Después de la limpieza, el conjunto descrito se realiza como se describe a continuación en un "recinto limpio" construido por separado. En este recinto, el flujo de aire laminar está garantizado mediante el uso de un filtro HEPA.

Antes de que los espejos se unan al cuerpo del separador, también se limpian. Para este propósito, cada espejo es colocado en un revestidor giratorio, el cual gira el espejo a 8000 rpm. Mientras el espejo gira, es pulverizado el isopropanol de grado HPLC sobre su superficie y simultáneamente es limpiado desde el centro hacia el borde con un hisopo sin pelusa. Posteriormente, es pulverizada agua de grado HPLC sobre el espejo para eliminar cualquier residuo de isopropanol. Cuando el sustrato ha dejado de girar, las gotas de agua restantes son sopladadas con nitrógeno seco. El espejo es colocado entonces en el soporte del espejo y el procedimiento de contacto comienza como se describe a continuación.

Para ensamblar el dispositivo del resonante óptico 100, el dispositivo de montaje 300 de la Figura 6 proporciona una etapa de contacto que permite unir los espejos al cuerpo del separador de manera controlada con precisión. El dispositivo de montaje 300 comprende un contenedor 310 para el cuerpo del separador (no se muestra en la Figura 6) y una plataforma de cuatro ejes 320 que contiene el espejo con el que se va a entrar en contacto.

El contenedor 310 es unido a una plataforma de traducción vertical la cual a su vez descansa sobre un riel óptico. Esta combinación permite mover el cuerpo del separador a lo largo de una dirección vertical sobre una gran distancia con alta precisión. Al mover el cuerpo del separador hacia arriba, la superficie orientada hacia arriba se acerca a un primer espejo que se unirá a él.

El espejo en sí es sostenido en un soporte de espejo cilíndrico que solo sujeta ligeramente el espejo alrededor de su circunferencia para evitar la deformación del espejo. El soporte de espejo está unido al escenario de cuatro ejes 320 que permite tanto mover el espejo horizontalmente como inclinarlo en dos ejes con respecto a la superficie del cuerpo espacial. Una vez que el espejo se ha llevado a su posición final, se usa un perforador con punta de PTFE para liberar el espejo de su contenedor y empujarlo hacia el cuerpo del separador, donde se une a través de contacto óptico directo.

En la parte superior de la plataforma de inclinación y giro 320, se construye un interferómetro y un sistema de obtención de imágenes de interferómetro que obtiene imágenes del interferograma entre la superficie frontal del espejo y la superficie superior del cuerpo espacial. Al observar este interferograma, la etapa de inclinación y punta 320 es usada para hacer que el espacio anular de contacto del espejo sea paralelo a la superficie del octágono. Este procedimiento de alineación simula una situación del espejo contactado.

Con más detalles de interferometría, el alineamiento de los espejos con el cuerpo del separador, en particular el centrado de los espejos en uno de los orificios del cuerpo del separador y asegurarse de que el espejo sea lo más

paralelo posible a la superficie portadora del cuerpo del separador se prueba mediante interferometría. Un interferograma típico presenta una región brillante en el centro, que resulta de una reflexión directa de la luz del interferómetro del recubrimiento del espejo. La región brillante está rodeada por un pequeño anillo oscuro el cual representa el bisel en el orificio del cuerpo del separador. El bisel refleja la luz del interferómetro fuera del campo de visión del sistema de obtención de imágenes del interferómetro, lo que da como resultado el anillo oscuro. Como primera etapa de alineación, el espejo está gruesamente centrado en el orificio al centrar la región brillante en el anillo oscuro.

Una característica principal del interferograma son sus bordes curvos y rectos. Los bordes curvos son el resultado de la interferencia entre la superficie portadora del cuerpo del separador de octágono y la región curvada del espejo. Las franjas verticales rectas son el resultado de la interferencia entre la superficie portadora y el espacio anular de contacto del espejo. Estos bordes se hacen desaparecer para garantizar que el espacio anular sea paralelo a la superficie del portador. Prácticamente puede alcanzarse el paralelismo correspondiente a un cuarto de una franja para la luz del interferómetro a 633 nm. Este paralelismo corresponde a un ángulo relativo residual de 1,4 segundos de arco, lo cual daría como resultado un desplazamiento de modo residual de 69 μm para $R = 10,2 \text{ m}$. Por esta razón, el procedimiento de contacto es repetido para el espejo final unas pocas veces, hasta que se optimiza el solapado medido final.

Ambos espejos planos son puestos en contacto ópticamente con el cuerpo del separador al alinear su centro con los orificios 33, 34 en el cuerpo del separador (ver Figura 2) lo cual puede observarse en el interferograma medido tal como se describió. Para la primera de los espejos curvados se asegura interferométricamente que está centrado y paralelo a la superficie del cuerpo del separador. En esta situación, el primero de los espejos curvados se pone en contacto ópticamente con el cuerpo del separador. Posteriormente, el cuerpo del separador octagonal es girado 90° en su montaje 310 y el interferograma es alineado nuevamente después de montar el segundo espejo curvado. La luz láser es acoplada a las cavidades formadas por los espejos curvados y los espejos planos orientados. La frecuencia del láser es escaneada y las transmisiones de la cavidad son medidas mediante dos fotodetectores. Con este método, está asegurado que la luz se acople solo en el TEM₀₀ modos de ambas cavidades.

Para alinear el segundo de los espejos curvados, es usada una hendidura (o un borde de cuchilla) montada en otra etapa de traducción de tres ejes 330 para determinar la posición del modo de la segunda cavidad con relación al modo de la primera cavidad. Esto se hace al mover la hendidura hacia el orificio central 35 del cuerpo del separador 30 (ver Figura 2) y obstruir parcialmente el TEM₀₀ modos con la hendidura. Como una función de la posición de la hendidura, la altura del pico de transmisión asociado con el TEM₀₀ modos es observado. Al maximizar la transmisión, la hendidura está centrada en la posición de los modos y se asegura que los modos se superpongan entre sí con un desplazamiento cero o mínimo. Si no lo hacen, el segundo espejo curvado es trasladada horizontalmente mientras se asegura que permanece paralelo a la superficie del cuerpo del espacio octagonal hasta que los modos sean suficientemente superpuestos. Cuando los modos están superpuestos, el segundo espejo curvado está puesto en contacto ópticamente usando el método descrito anteriormente.

Con más detalles, una vez que el segundo espejo curvado es alineado interferométricamente con el separador de octágono, la luz láser es acoplada en la cavidad formada entre este espejo curvado y el espejo plano ya unido. La luz láser a 689 nm es usada para todas esas mediciones, lo cual da como resultado un diámetro de modo de $2w_0 = 791 \mu\text{m}$ de acuerdo con la Ecuación. (1). Preferiblemente, es acoplado a la TEM₀₀ modo con al menos 95 % de eficiencia para obtener datos de transmisión utilizables para las siguientes etapas. La frecuencia del láser es escaneada sobre más de un intervalo espectral libre de la cavidad, y la transmisión es medida en un fotodiodo, y la traza de voltaje resultante es observada en un osciloscopio. Lo mismo se hace con la segunda cavidad, ya terminada. Como se analizó anteriormente, el solapamiento de ambos modos de cavidad se determina al insertar la hendidura en el orificio central 35 del cuerpo del separador de octágono 30. La hendidura es mecanizada en una lámina delgada de acero inoxidable. Esta lámina presenta dos hendiduras ortogonales con un ancho de 700 μm y una rugosidad de hendidura de 20 μm . La hendidura corta es usada para determinar la posición en el plano donde cruza la proyección de ambos modos. Esta posición está determinada por la posición de la etapa de traducción donde ambos modos transmiten simultáneamente al máximo. Una vez que se encuentra esta posición, la hendidura larga es usada para determinar la superposición fuera del plano de ambos haces.

Al representar gráficamente la transmisión de ambos modos de la cavidad frente a la posición fuera del plano de la etapa de traducción, se encuentran los resultados típicos tal como se muestra en la Figura 7. La Figura 7 muestra un resultado de una medición de superposición típica realizada con una hendidura. La frecuencia del láser es escaneada mientras la hendidura es movida a través de la cavidad. La transmisión de cada uno de los modos es más alta cuando la hendidura está centrada en el modo. Los picos pueden estar ajustados con una parábola para determinar el desplazamiento de los modos. Por lo tanto, una forma simple de determinar el desplazamiento residual fuera del plano entre los modos de la cavidad es ajustar la parábola a cada pico. En este caso, este procedimiento da como resultado un desplazamiento residual de 16(5) μm , o 2 % del diámetro del modo.

Debido a las estrictas especificaciones de paralelismo del cuerpo del separador, el desplazamiento del modo puede ser corroborado al tomar una imagen del haz láser transmitido a medida que sale de la cavidad, lo cual muestra directamente el desplazamiento del modo con respecto al espejo y al orificio de la cavidad.

En mediciones separadas, se ha verificado la finura (y por lo tanto la mejora de la potencia) de las cavidades generadas por los espejos de cavidad. Con un recubrimiento reflectante multibanda apropiado para los experimentos particulares, se ha encontrado que se pueden lograr finuras que están por encima de la especificación para todas las

ES 2 991 935 T3

longitudes de onda bajo consideración. Para el caso considerado, los factores de amplificación de energía de 100 - 1000 pueden ser suficientes. Al adaptar el recubrimiento, la invención puede ser adaptada a cualquier longitud de onda donde estén disponibles recubrimientos ópticos de alta calidad. Para un menor número de longitudes de onda de interés, se pueden lograr fácilmente factores de amplificación aún mayores.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo resonante óptico (100) con cavidades cruzadas, que está configurado para capturar ópticamente átomos, que comprende
 - 5 – un primer resonante óptico lineal (10) que se extiende entre los primeros espejos resonantes (11A, 11B) a lo largo de una primera trayectoria de luz del resonante (12) y que soporta un primer modo del resonante,
 - un segundo resonador óptico lineal (20) que se extiende entre los segundos espejos resonadores (21A, 21B) a lo largo de una segunda trayectoria de luz del resonante (22) y que soporta un segundo modo resonante, en donde la primera y segunda trayectorias de luz del resonante (12, 22) abarcan un plano resonante principal, y
 - 10 – un dispositivo portador que lleva el primer y segundo espejos resonantes (11A, 11B, 21A, 21B), en donde el primer y segundo espejos resonantes (11, 21) están dispuestos de manera que el primer y segundo modos del resonante se cruzan entre sí para proporcionar una trampa de red óptica (1) en el plano principal del resonante,
caracterizado porque
 - el dispositivo portador comprende un cuerpo del separador monolítico (30) hecho de un material de expansión ultrabaja y que comprende primeras superficies portadoras (31) que alojan los primeros espejos resonantes (11A, 11B) y segundas superficies portadoras (32) que alojan los segundos espejos resonantes (21A, 21B), en donde
 - 15 – la primera trayectoria de luz del resonante (12) se extiende a través de un primer orificio del cuerpo del separador (33) en el cuerpo del separador (30) entre las primeras superficies portadoras (31), y la segunda trayectoria de luz del resonante (22) se extiende a través de un segundo orificio del cuerpo del separador (34) en el cuerpo del separador (30) entre las segundas superficies portadoras (32).
- 25 2. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con la reivindicación 1, en donde
 - el primer y segundo espejos resonantes (11A, 11B, 21A, 21B) están unidos a la primera y segunda superficies portadoras (31, 32) respectivamente sin el uso de adhesivo.
- 30 3. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con la reivindicación 2, en donde
 - el primer y segundo espejos resonantes (11A, 11B, 21A, 21B) están unidos ópticamente a la primera y segunda superficies portadoras (31, 32), respectivamente.
- 35 4. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en donde
 - los primeros espejos resonantes comprenden un primer espejo curvado (11A), y
 - los espejos resonantes secundarios comprenden un segundo espejo curvado (21A), en donde
 - el primer y segundo espejos resonantes (11A, 11B, 21A, 21B) están diseñados de tal manera que el primer y segundo modos del resonante incluyen los modos de orden más bajo de Hermite-Gaussianos del primer y segundo resonantes, respectivamente.
- 40 5. Dispositivo resonador óptico de acuerdo con la reivindicación 4, que comprende al menos una de las características
 - el primer y segundo espejos curvados (11A, 21A) presentan un radio de curvatura que está seleccionado de tal manera que la trampa de red óptica tenga una dimensión de $2 \cdot w_0$ en el plano del resonante principal de al menos 300 μm , en particular al menos 400 μm , en donde w_0 es el $1/e^2$ radio del primer y segundo modos del resonante, y
 - los primeros espejos resonantes comprenden el primer espejo curvado (11A) y un primer espejo plano (11B), y los segundos espejos resonantes comprenden el segundo espejo curvado (21A) y un segundo espejo plano (21B).
- 45 6. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que comprende al menos una de las características
 - el cuerpo separador monolítico (30) está fabricado de vidrio de expansión ultrabaja o silicio cristalino,
 - el primer y segundo orificios del cuerpo del separador (33, 34) son ortogonales entre sí en el plano principal del resonante,
 - 50 – el primer y segundo orificios del cuerpo del separador (33, 34) están dispuestas con simetría especular con relación a un plano perpendicular al plano principal del resonante, y
 - el cuerpo del separador monolítico (30) presenta una forma de un octágono que se extiende paralelo al plano del resonante principal, en donde la primera y segunda superficies portadoras (32) son superficies laterales del octágono.
- 55 7. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en donde
 - el cuerpo del separador monolítico (30) presenta un tercer orificio del cuerpo del separador (35) que se extiende perpendicular al plano principal del resonante y que atraviesa el primer y segundo orificios del cuerpo del separador (33, 34) en su intersección.
- 60 8. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con la reivindicación 7, que comprende además al menos una de las características
 - un dispositivo de obtención de imágenes (40) está dispuesto para obtener imágenes de la trampa de red óptica a lo largo del tercer orificio del cuerpo del separador (35), y
 - 65 – el tercer orificio del cuerpo del separador (35) está dispuesto para alojar una tercera trayectoria de luz (36) con una dirección que se desvía del plano principal del resonante, en donde está dispuesto un espejo retrorreflector para crear un campo de luz de captura a lo largo de la tercera trayectoria de luz (36).
9. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en donde

ES 2 991 935 T3

- el cuerpo del separador monolítico (30) presenta al menos un orificio del cuerpo del separador adicional (37) que se extiende paralelo al plano del resonante principal y que atraviesa el primer y segundo orificios del cuerpo del separador (33, 34) en su intersección.
- 5 10. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con la reivindicación 9, en donde
- el cuerpo del separador monolítico (30) presenta dos orificios del cuerpo del separador adicionales (30) que están dispuestos simétricamente con relación a la disposición del primer y segundo orificios del cuerpo del separador (33, 34).
- 10 11. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en donde
- el primer y segundo espejos resonantes (11A, 11B, 21A, 21B) presentan recubrimientos dieléctricos que proporcionan una reflectividad de al menos 99 %.
- 15 12. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con la reivindicación 11, en donde
- los recubrimientos dieléctricos están diseñados de tal manera que se proporciona una reflectividad de al menos 99 % para múltiples longitudes de onda resonantes del primer y segundo resonantes ópticos.
- 20 13. Dispositivo resonante óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que presenta al menos una de las siguientes medidas:
- el cuerpo del separador (30) posee una dimensión en el plano del resonante principal en un intervalo de 3 cm a 20 cm,
 - el primer y segundo espejos resonantes (11A, 11B, 21A, 21B) presentan un diámetro en un intervalo de 10 mm a 30 mm,
 - cada uno del primer y segundo espejos resonantes (11A, 11B, 21A, 21B) comprende un espejo curvado que
- 25 presenta un radio de curvatura en un intervalo de 1 m a 20 m, y
- el primer y segundo espejos resonantes (11A, 11B, 21A, 21B) están dispuestos con un alineación de tal manera que los haces de láser reflejados dentro del primer y segundo resonantes ópticos son desplazados del centro del orificio por menos del 25 % del diámetro del orificio.
- 30 14. Método de captura de átomos para crear una disposición bidimensional de átomos, en donde se usa el dispositivo resonante óptico (100) de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que comprende las etapas de
- crear la trampa de red óptica (1) en una región donde el primer y segundo modos del resonante se cruzan entre sí,
- 35 – introducir una nube de átomos en el dispositivo del resonante óptico (100), y
- capturar los átomos en la trampa de red óptica (1).
- 40 15. El método de captura de átomos de acuerdo con la reivindicación 14, que comprende al menos una de las características
- la etapa de crear la trampa de red óptica comprende acoplar el primer y segundo haces de láser de onda continua (cw) en el primer y segundo resonantes ópticos, respectivamente, y hacer que se superpongan el primer y segundo modos del resonante en la intersección del primer y segundo orificios del cuerpo separador (33, 34),
 - obtener imágenes de los átomos capturados en la trampa de red óptica (1) con un dispositivo de obtención de imágenes (40),
- 45 – excitar y detectar transiciones entre los estados de energía de los átomos capturados, y
- explotar las interacciones entre los átomos con fines de simulación cuántica y/o cálculo cuántico.
- 50 16. Aparato de trampa de átomos (200), que está adaptado para crear una disposición bidimensional de átomos, que comprende
- el dispositivo resonante óptico (100) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 13,
 - un dispositivo láser (210, 220) que está adaptado para acoplar haces de láser de onda continua en el primer y segundo resonantes ópticos,
 - una fuente de átomos y un dispositivo de suministro (230) que están siendo conectados con el dispositivo del resonante óptico, y
- 55 – un dispositivo de obtención de imágenes (240) que está siendo adaptado para obtener imágenes de la trampa de red óptica en el dispositivo resonante óptico.
- 60 17. Aparato de trampa de átomos de acuerdo con la reivindicación 16, que está siendo configurado como un reloj atómico óptico, un dispositivo de simulación cuántica o un dispositivo de cálculo cuántico.

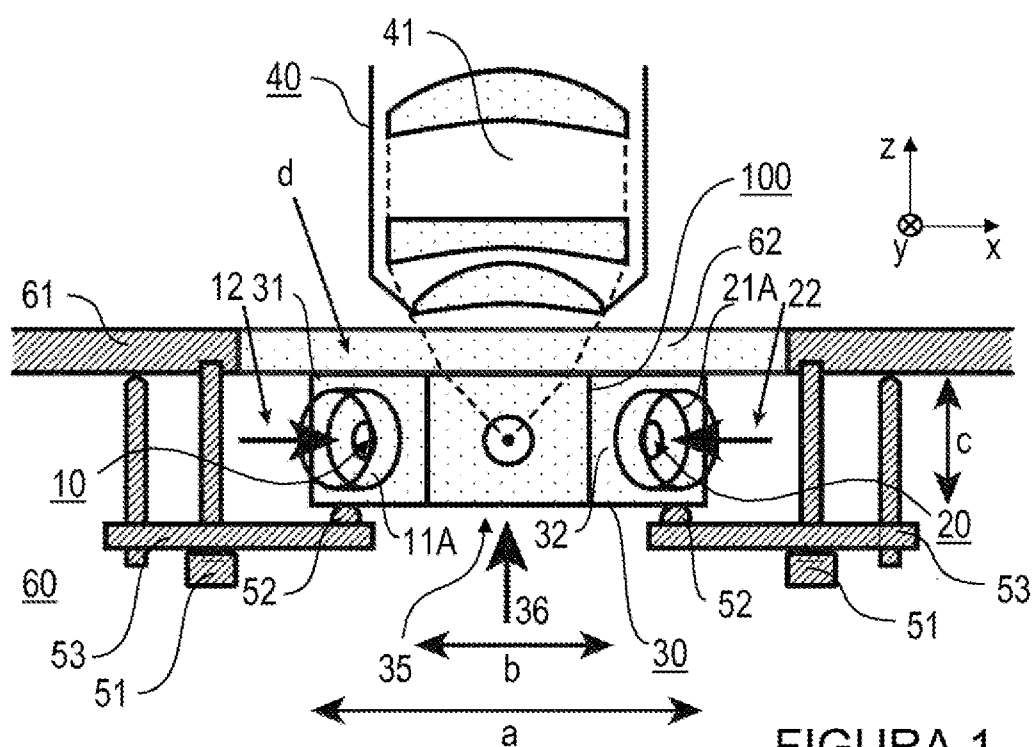


FIGURA 1

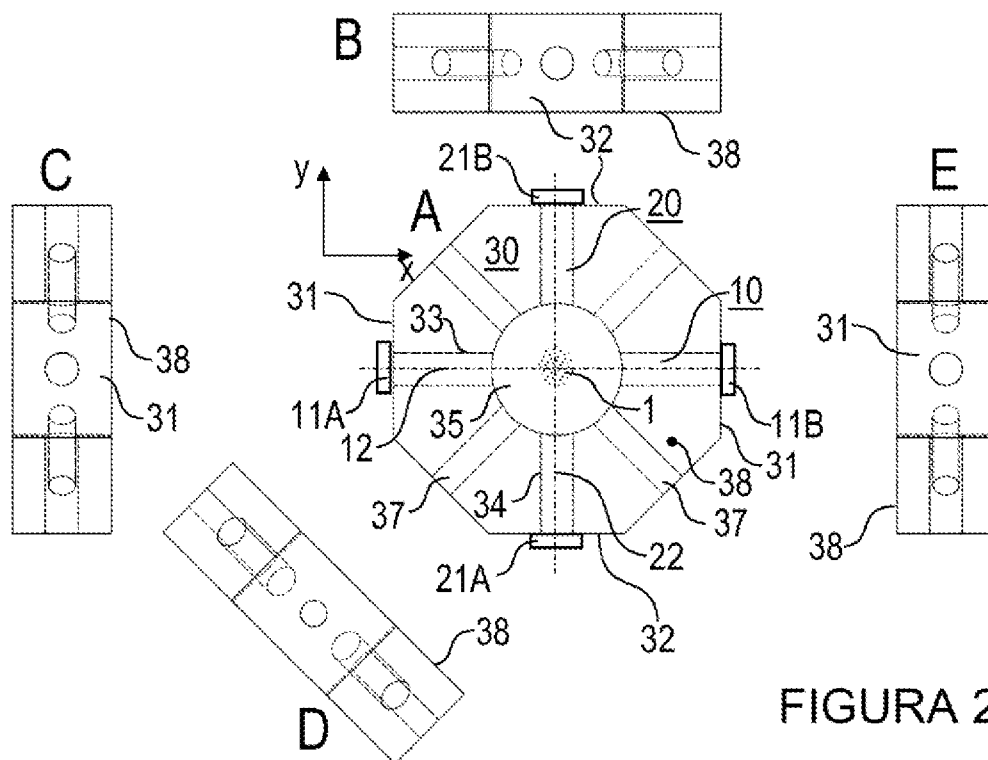


FIGURA 2

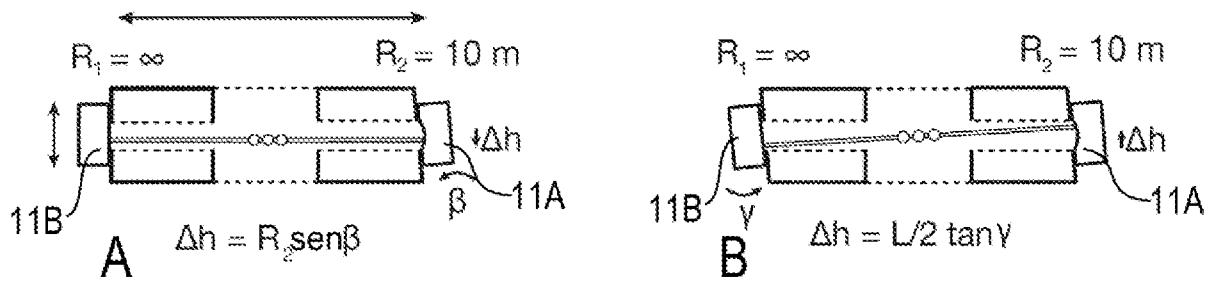


FIGURA 3

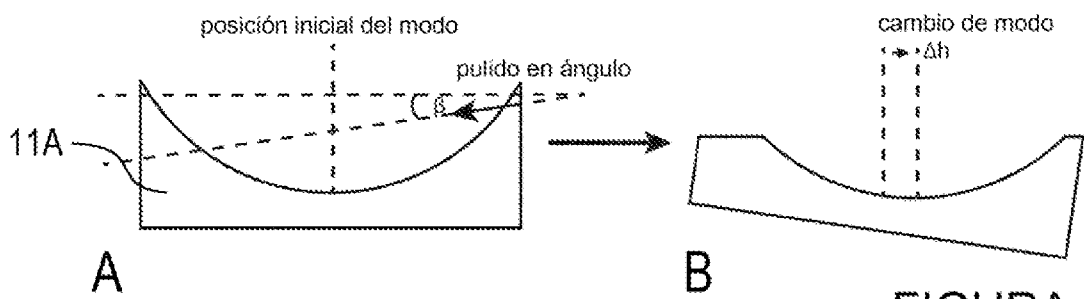


FIGURA 4

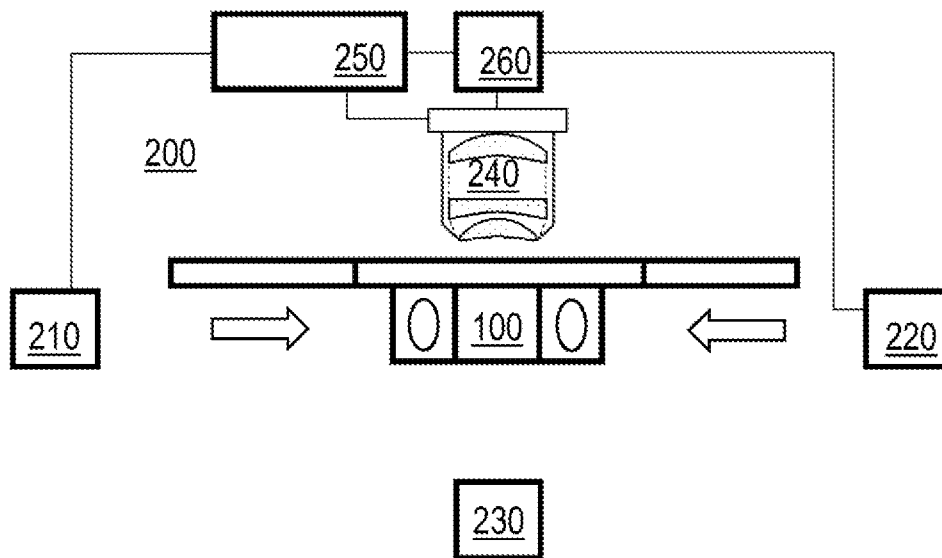


FIGURA 5

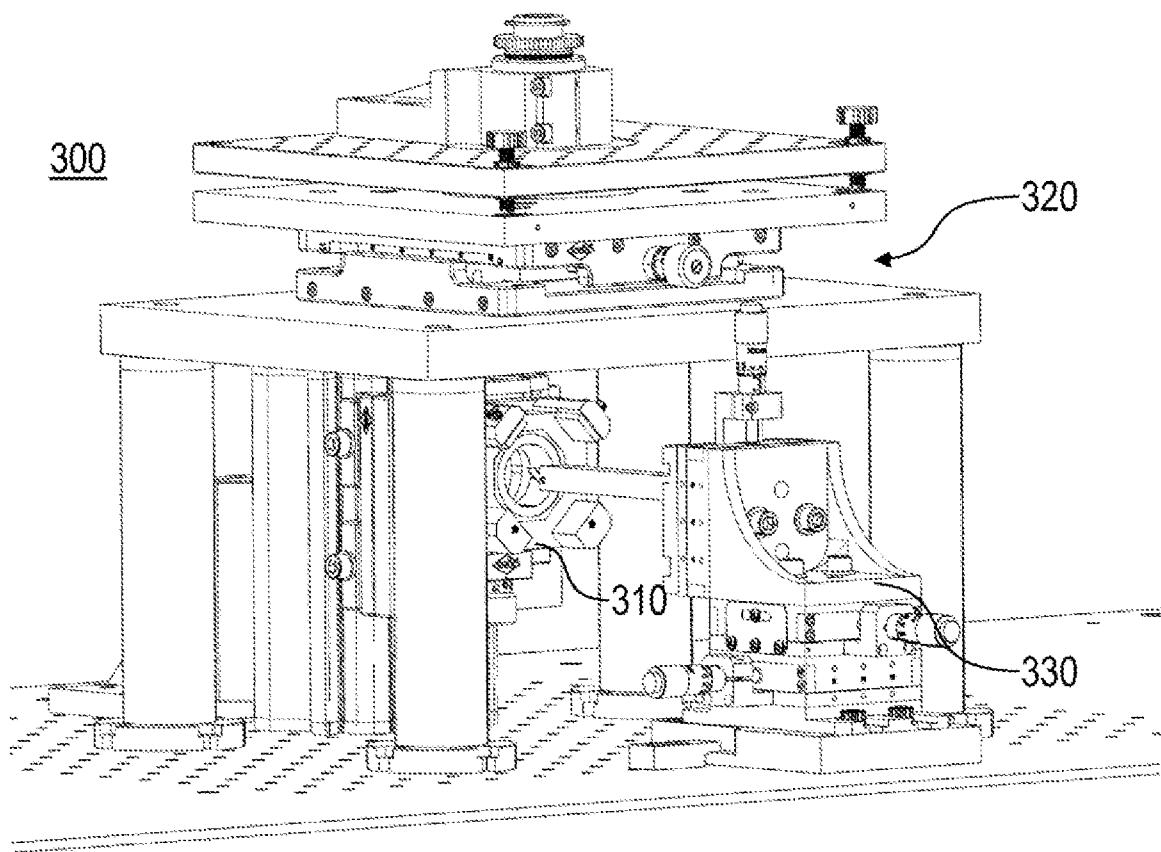


FIGURA 6

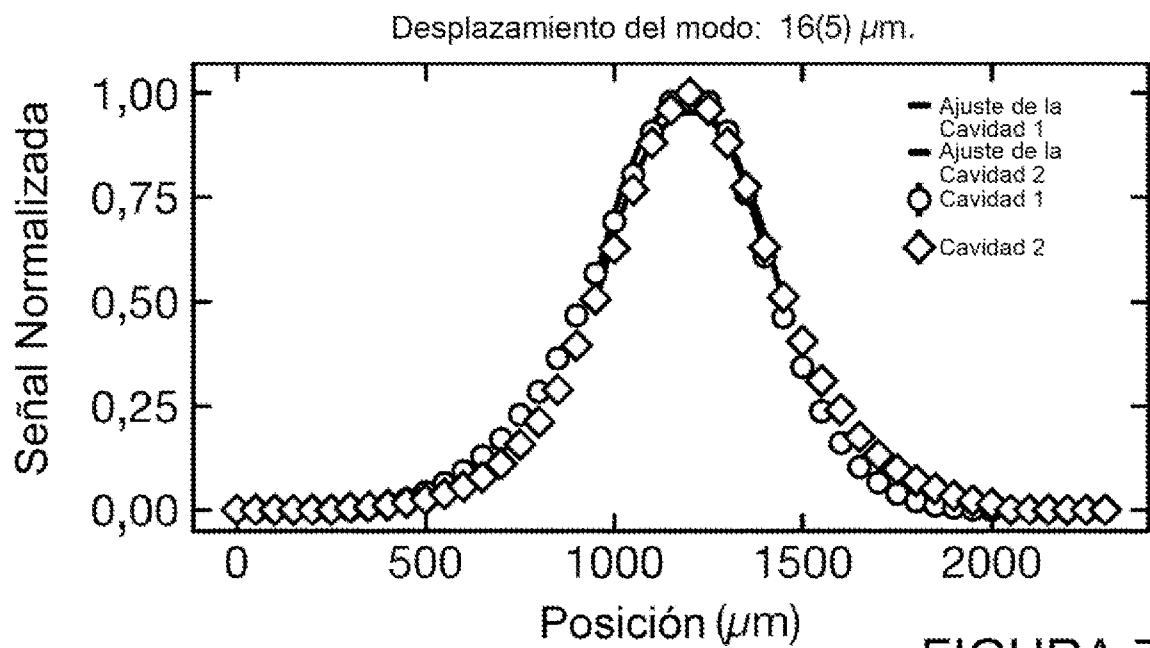


FIGURA 7

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

Este listado de referencias citadas por el solicitante tiene como único fin la conveniencia del lector. No forma parte del documento de la Patente Europea. Aunque se ha puesto gran cuidado en la compilación de las referencias, no pueden excluirse errores u omisiones y la EPO rechaza cualquier responsabilidad en este sentido.

Bibliografía no especificada en la descripción de la patente

- A. D. LUDLOW ; M. M. BOYD ; J. YE ; E. PEIK ; P. O. SCHMIDT. Optical atomic clocks. *Review of Modern Physics*, 2015, vol. 87, 637 [0002]
- J. GROTTI et al. Geodesy and metrology with a transportable optical clock. *Nature Physics*, 2018, vol. 14, 437 [0002]
- S. B. KOLLER ; J. GROTTI ; S. VOGT ; A. AL-MASOUDI ; S. DÖRSCHER ; S. HÄFNER ; U. STERR ; C. LISDAT. Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{-17} Uncertainty. *Physical Review Letters*, 2017, vol. 118, 073601 [0002]
- S. ORIGLIA et al. Towards an optical clock for space: Compact, high-performance optical lattice clock based on bosonic atoms. *Physical Review*, 2018, vol. A 98, 053443 [0002]
- S. CAMPBELL et al. A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock. *Science*, 2017, vol. 358, 90 [0002]
- E. OELKER et al. Optical clock intercomparison with 6×10^{-19} precision in one hour. *arXiv:1902.02741*, 2019 [0002]
- R. P. FEYNMAN. Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 1962, vol. 21, 467 [0002]
- I. BLOCH ; J. DALIBARD ; W. ZWERGER. Many-body physics with ultracold gases. *Review of Modern Physics*, 2008, vol. 80, 885 [0002]
- I. BLOCH ; C. GROSS. Quantum simulations with ultracold atoms in optical lattices. *Science*, 2017, vol. 357, 995 [0002]
- I. BLOCH ; J. DALIBARD ; S. NASCIMBÈNE. Quantum simulations with ultracold quantum gases. *Nature Physics*, 2012, vol. 8, 267 [0002]
- I. M. GEORGESCU ; S. ASHHAB ; F. NORI. Quantum simulation. *Reviews of Modern Physics*, 2014, vol. 86, 153 [0002]
- W. S. BAKR ; J. I. GILLEN ; A. PENG ; S. FÖLLING ; M. GREINER. A quantum gas microscope for detecting single atoms in a Hubbard-regime optical lattice. *Nature*, 2009, vol. 462, 74 [0002]
- J. F. SHERSON ; C. WEITENBERG ; M. ENDRES ; M. CHENEAU ; I. BLOCH ; S. KUHR. Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator. *Nature*, 2010, vol. 467, 68 [0002]
- A. MAZURENKO ; C. S. CHIU ; G. JI ; M. F. PARSONS ; M. KANÁSZ-NAGY ; R. SCHMIDT ; F. GRUSDT ; E. DEMLER ; D. GREIF ; M. GREINER. A cold-atom Fermi-Hubbard antiferromagnet. *Nature*, 2017, vol. 545, 462 [0002]
- M. BOLL ; T. A. HILKER ; G. SALOMON ; A. OMRAN ; J. NESPOLO ; L. POLLET ; I. BLOCH ; C. GROSS. Spin and Charge Resolved Quantum Gas Microscopy of Antiferromagnetic Order in Hubbard Chains. *Science*, 2018, vol. 363, 1257 [0002]
- C. K. HONG ; Z. Y. OU ; L. MANDEL. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference. *Physical Review Letters*, 1987, vol. 59, 2044 [0002]
- R. ISLAM ; R. MA ; P. M. PREISS ; A. LUKIN ; M. RISPOLI ; M. GREINER. Measuring entanglement entropy in a quantum many-body system. *Nature*, 2015, vol. 528, 77 [0002]
- JULIAN LEONARD ; ANDREA MORALES ; PHILIP ZUPANCIC ; TILMAN ESSLINGER ; TOBIAS DONNER. Supersolid formation in a quantum gas breaking continuous translational symmetry. *Nature*, 2017, vol. 543, 87 [0002]
- S. BLATT ; A. MAZURENKO ; M. F. PARSONS ; C. S. CHIU ; F. HUBER ; M. GREINER. Low-noise optical lattices for ultracold Li. *Physical Review*, 2015, vol. A 92, 021402 [0002]
- A. MAZURENKO ; S. BLATT ; F. HUBER ; M. F. PARSONS ; C. S. CHIU ; G. JI ; D. GREIF ; M. GREINER. Implementation of a stable, high-power optical lattice for quantum gas microscopy. *Review of Scientific Instruments*, 2019, vol. 90, 033101 [0002]
- J. LÉONARD ; M. LEE ; A. MORALES ; T. M. KARG ; T. ESSLINGER ; T. DONNER. Optical transport and manipulation of an ultracold atomic cloud using focus-tunable lenses. *New Journal of Physics*, 2014, vol. 16, 093028 [0002]
- R. J. LEWIS-SWAN ; M. A. NORCIA ; J. R. K. CLINE ; J. K. THOMPSON ; A. M. REY. Robust Spin Squeezing via Photon-Mediated Interactions on an Optical Clock Transition. *Physical Review Letters*, 2018, vol. 121, 070403 [0002]
- N. POLI et al. Optical atomic clocks. *RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO*, 10 January 2014 [0002]