

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 936 244**

51 Int. Cl.:

G06N 10/00 (2012.01)

G02F 1/33 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.07.2019 PCT/US2019/042841**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.02.2020 WO20036707**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.07.2019 E 19749525 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.12.2022 EP 3785185**

54 Título: **Configuraciones de modulador acústico-óptico para procesamiento cuántico**

30 Prioridad:

23.07.2018 US 201862702111 P
18.07.2019 US 201916515508

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.03.2023

73 Titular/es:

UNIVERSITY OF MARYLAND, COLLEGE PARK
(50.0%)
UM Ventures, 0134 Lee Building, 7809 Regents
Drive
College Park, MD 20742, US y
IONQ, INC. (50.0%)

72 Inventor/es:

AMINI, JASON MADJDI;
MIZRAHI, JONATHAN;
HUDEK, KAI;
GOLDMAN, MICHAEL y
SU, YUAN

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 936 244 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

Configuraciones de modulador acústico-óptico para procesamiento cuántico

5 Referencia cruzada con una solicitud relacionada

La presente solicitud de patente reivindica la prioridad a la solicitud no provisional de los Estados Unidos No. 16/515.508 titulada "ACOUSTO-OPTIC MODULATOR CONFIGURATIONS FOR QUANTUM PROCESSING" presentada el 18 de julio de 2019 y la solicitud provisional de patente de los Estados Unidos. No. 62/702.111, titulada "ACOUSTO-OPTIC MODULATOR CONFIGURATIONS FOR QUANTUM PROCESSING", y presentada el 23 de julio de 2018.

Derechos de licencia del gobierno

15 Esta invención se realizó con el apoyo del gobierno de los Estados Unidos con la adjudicación No. W911NF1610082 por IARPA. El gobierno tiene ciertos derechos en la invención.

Antecedentes de la divulgación

20 Los aspectos de la presente divulgación generalmente se relacionan con los sistemas cuánticos y, más específicamente, con las configuraciones del modulador acústico-óptico (AOM) para el procesamiento cuántico en los sistemas cuánticos.

25 Los átomos atrapados son una de las principales implementaciones para el procesamiento de información cuántica. Los bits cuánticos atómicos se pueden utilizar como memorias cuánticas, como puertas cuánticas en ordenadores y simuladores cuánticos, y pueden actuar como nodos para redes de comunicación cuántica.

La computación cuántica basada en átomos y iones, sin embargo, necesitan un control preciso de las fases, frecuencias, amplitudes y/o polaridades del láser para manipular la información cuántica almacenada en los bits cuánticos. Los AOM se utilizan a menudo para proporcionar control de fase, frecuencia y amplitud. Una de las características de los AOM es que el haz láser controlado es desviado de la porción no controlada, permitiendo que los dos se separen. Una desventaja es que esta desviación es dependiente de la frecuencia. Por ejemplo, si dos o más frecuencias se aplican a un AOM, los haces resultantes divergen unos de otros. El reenfoque de este abanico de haces sobre un átomo o ion requiere una óptica compleja y los haces resultantes no se propagan conjuntamente (por ejemplo, no están alineados o sustancialmente paralelos en el punto donde alcanzan el átomo). Este último limita el aislamiento de grados de libertad no deseados durante las operaciones cuánticas. Eliminar o reducir esta dependencia de la frecuencia permitiría mejorar el control de operaciones cuánticas.

40 Además, el control fino y rápido de la polarización de la luz puede permitir una sistematización reducida en las operaciones cuánticas. El método principal para dicho control son los moduladores electro-ópticos (EOM), que sufren de deriva de polarización. Una alternativa a las EOM que reduciría o eliminaría esta deriva proporcionaría una poderosa herramienta para la calidad de las operaciones cuánticas.

45 En consecuencia, son deseables las técnicas que permiten un mejor reenfoque de haces sobre un átomo o ion y alternativas a los EOM que reducen o eliminan la deriva.

50 Sangtaek Kim et al., Applied Optics, 47, 1816 - 1831, 2008, divulgan deflector acústico-óptico de múltiples longitudes de onda sin Doppler para matrices de direccionamiento de dos fotones de átomos de Rb en un procesador de información cuántica. El documento US 6.800.837 describe un procesador de información cuántica. Akerman et al., New Journal of Physics, 17, 2015, informan sobre la implementación de un conjunto de compuertas universales de alta fidelidad en bits cuánticos ópticos basados en iones $^{88}\text{Sr}^+$ atrapados para el propósito del procesamiento de información cuántica.

Resumen de la divulgación

55 La invención proporciona un método para controlar la propagación del haz láser en el procesamiento cuántico como conjunto en la reivindicación 1, y un sistema de procesamiento de información cuántica para controlar la propagación del haz láser en procesamiento cuántico como se establece en la reivindicación 11.

60 A continuación se presenta un resumen simplificado de uno o más aspectos para proporcionar una comprensión básica de tales aspectos. Este resumen no es una visión general extensiva a todos los aspectos contemplados, y se pretende no identificar elementos clave o críticos de todos los aspectos ni delinear el alcance de todos o cada uno de los aspectos. Su propósito es presentar algunos conceptos de uno o más aspectos en una forma simplificada como preludio a la descripción más detallada que se presenta más adelante.

65

La divulgación describe configuraciones de pares de AOM que reducen o eliminan la dependencia de la frecuencia de los AOM manteniendo el control de la fase, frecuencia, y amplitud. También se describen configuraciones que se aprovechan de la dependencia de la polarización de los AOM para controlar la polarización de la luz transmitida.

En un aspecto de la divulgación, se describe un método para controlar la propagación del haz láser en procesamiento de cuantos. El método incluye generar, mediante un primer AOM de un haz láser incidente, un primer haz láser difractado basado en un primer tono de radiofrecuencia (RF) y un segundo haz láser difractado basado en un segundo tono de RF, en el que el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado se difractan a diferentes ángulos; enfocando, a través de un componente óptico, el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado en un segundo AOM; generando, mediante el segundo AOM a partir del primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado, al menos un tercer haz láser difractado basado en el primer tono de RF y un tercer tono de RF y un cuarto haz láser difractado basado en el segundo tono de RF y un cuarto tono de RF, en el que el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado se difractan para ser sustancialmente paralelos cuando inciden sobre un ion respectivo en una cadena de iones en una trampa; y controlando la información cuántica en el ion para realizar el procesamiento cuántico basado en el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado.

En otro aspecto de la divulgación, que no es como se menciona en las reivindicaciones, se describe un método para controlar la propagación del haz láser en el procesamiento cuántico. El método incluye la generación, por un primer AOM de un haz láser incidente, un primer haz láser difractado basado en un primer tono de RF y un segundo haz láser difractado basado en un segundo tono de RF, en el que el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado se difractan en diferentes ángulos; enfocando, a través de un componente óptico, el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado en trayectorias opuestas del ángulo de Bragg en un segundo AOM; generando, por el segundo AOM del primero haz láser difractado y el segundo haz láser difractado, al menos un tercer haz láser difractado basado en el primer tono de RF y un tercer tono de RF y un cuarto difractado haz láser basado en el segundo tono de RF y el tercero Tono de RF, en el que el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado se difractan para ser sustancialmente paralelos cuando inciden en un ion respectivo en una cadena de iones en una trampa; y controlar la información cuántica en el ion para realizar el procesamiento cuántico basado en la tercera haz láser difractado y el cuarto láser difractado haz.

En otro aspecto de la divulgación, se describe un sistema de procesamiento de información cuántica (QIP) para controlar la propagación del haz láser en el procesamiento cuántico. El sistema QIP incluye una o más fuentes ópticas configuradas para generar un haz láser; un primer AOM configurado para generar, a partir del haz láser, un primer haz láser difractado basado en un primer tono de RF y un segundo haz láser difractado basado en un segundo tono de RF, en el que el primer haz láser difractado y el segundo el haz láser difractado se difractan en diferentes ángulos; un componente óptico configurado para enfocar el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado en un segundo AOM; un segundo AOM configurado para generar, a partir del primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado, al menos un tercer haz láser difractado basado en el primer tono de RF y un tercer tono de RF y un cuarto haz láser difractado basado en el segundo tono de RF y un cuarto tono de RF, en el que el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado se difractan para ser sustancialmente paralelos cuando inciden en un ion respectivo en una cadena de iones en una trampa; y un controlador de haces configurado para controlar la información cuántica en el ion para realizar procesamiento cuántico basado en el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado.

En otro aspecto más de la divulgación, que no se menciona en las reivindicaciones se describe un sistema método para control de polarización en procesamiento cuántico. El método incluye proporcionar un haz láser incidente en un AOM; generado por el AOM a partir del haz láser y basado en una señal de RF de control aplicada al AOM, un haz láser no difractado, un haz láser difractado, una polarización del haz láser no difractado girado con respecto a una polarización del haz láser incidente; y aplicando el haz láser no difractado a un ion en una cadena de iones en una trampa para realizar procesamiento cuántico controlando información cuántica en el ion.

Cada uno de los métodos descritos en este documento también puede implementarse en un sistema o aparato QIP, y como parte de un medio legible por ordenador.

Breve descripción de los dibujos

Los dibujos adjuntos ilustran solo algunas implementaciones y, por lo tanto, no deben considerarse limitantes del alcance.

La Fig. 1A ilustra un diagrama que representa una trampa de iones atómicos que forman un cristal lineal o red de acuerdo con aspectos de la divulgación.

La Fig. 1B es un diagrama que ilustra un ejemplo de un diagrama de nivel de energía reducido que muestra la aplicación de radiación láser para inicialización de estado de acuerdo con aspectos de la divulgación.

La Fig. 1C es un diagrama que ilustra un ejemplo de un diagrama de nivel de energía reducido que muestra la aplicación de radiación láser para la detección del estado de un bit cuántico a través de fluorescencia de acuerdo con aspectos de la divulgación.

La Fig. 2 es un diagrama que ilustra un ejemplo de dependencia de la frecuencia de los haces láser difractados.

La Fig. 3 es un diagrama que ilustra un ejemplo de una configuración AOM desplegada para un solo canal de acuerdo con los aspectos de esta divulgación.

La Fig. 4 es un diagrama que ilustra un ejemplo de una configuración AOM desplegada usando AOM multicanal de acuerdo con aspectos de esta divulgación.

Las Figs. 5A y 5B son diagramas que ilustran ejemplos de una configuración AOM desplegada en la que un AOM es un AOM multicanal y el otro AOM es un AOM de gran apertura de acuerdo con aspectos de esta divulgación.

La Fig. 6 es un diagrama que ilustra otro ejemplo de una configuración AOM desplegada de acuerdo con aspectos de esta divulgación que no se mencionan en las reivindicaciones.

Las Figs. 7A, 7B y 7C son diagramas que ilustran un ejemplo de control de polarización usando un AOM de acuerdo con aspectos de esta divulgación que no se mencionan en las reivindicaciones.

La Fig. 8 es un diagrama que ilustra un ejemplo de un dispositivo informático de acuerdo con aspectos de esta divulgación.

La Fig. 9 es un diagrama de flujo que ilustra ejemplos de métodos de acuerdo con aspectos de esta divulgación.

Las Figs. 10 y 11 son diagramas de flujo que ilustran ejemplos de métodos de acuerdo con aspectos de esta divulgación que no se enumeran en las reivindicaciones.

La Fig. 12A es un diagrama de bloques que ilustra un ejemplo de un sistema de procesamiento de información cuántica (QIP) de acuerdo con aspectos de esta divulgación.

La Fig. 12B es un diagrama de bloques que ilustra un ejemplo de un controlador óptico utilizado en conexión con enfriamiento de banda lateral paralelizada de acuerdo con aspectos de esta divulgación.

Descripción detallada

La descripción detallada que se establece a continuación en relación con los dibujos adjuntos pretende ser una descripción de varias configuraciones y no pretende representar las únicas configuraciones en las que los conceptos descritos en este documento pueden ser practicados. La descripción detallada incluye detalles específicos con el fin de proporcionar una comprensión profunda de varios conceptos. Sin embargo, será evidente para los expertos en la materia que estos conceptos pueden practicarse sin estos detalles específicos. En algunos casos, se muestran componentes bien conocidos en forma de diagrama de bloques para evitar oscurecer tales conceptos.

Como se describió anteriormente, los átomos atrapados pueden ser utilizados para implementar el procesamiento de información cuántica. Los bits cuánticos atómicos se pueden usar como diferentes tipos de dispositivos, incluyendo pero no limitado a memorias cuánticas, puertas cuánticas en ordenadores y simuladores cuánticos, y nodos para redes de comunicación cuántica. Los bit cuánticos basados en iones atómicos atrapados pueden tener muy buenas propiedades de coherencia, se pueden preparar y medir con casi el 100% de eficiencia, y se pueden entrelazar fácilmente entre sí mediante la modulación de su interacción de Coulomb con campos de control externos adecuados, tales como campos ópticos o de microondas. Como se usa en esta divulgación, los términos "iones atómicos", "átomos", "átomos ionizados" e "iones" pueden ser usados indistintamente para describir las partículas que van a ser confinadas, o están realmente confinadas, en una trampa para formar un cristal, un enrejado o disposición o configuración similar. Esta divulgación describe técnicas en forma de métodos o procesos y equipos o aparatos para usar AOM en procesamiento cuántico en ciertas configuraciones que ayudan a reducir la dependencia de la frecuencia de los AOM manteniendo el control de fase, frecuencia y amplitud. Esta divulgación también describe técnicas en forma de métodos o procesos y equipos o aparatos para usar la dependencia de polarización de los AOM para controlar la polarización de la luz transmitida.

La geometría o estructura típica de la trampa de iones utilizada para fines de metrología e información cuántica es la Trampa de Paul de radiofrecuencia (RF) lineal (también denominada una trampa de RF o simplemente una trampa de Paul), donde los electrodos cercanos mantienen potenciales eléctricos estáticos y dinámicos que conducen a un confinamiento armónico no homogéneo eficaz de los iones. La trampa de RF de Paul es un tipo de trampa que utiliza campos eléctricos para atrapar o confinar partículas cargadas en una región, posición o ubicación en particular. Cuando los iones atómicos se enfrían con láser a temperaturas muy bajas en tal trampa, los iones atómicos forman un cristal estacionario de bits cuánticos (por ejemplo, una disposición estructurada de bits cuánticos), con repulsión de Coulomb que equilibra la fuerza de confinamiento exterior. Para suficiente anisotropía de trampa, los iones pueden formar un cristal lineal a lo largo de la dirección débil del confinamiento, y esto es el arreglo típicamente empleado para aplicaciones en información cuántica y metrología.

La computación cuántica de átomos y iones necesita control preciso de fases, frecuencias, amplitudes y polaridades (por ejemplo, polarización) láser para manipular la información cuántica almacenada en los bits cuánticos en un cristal o red. Por ejemplo, las características de los haces láser utilizados para habilitar o implementar diferentes puertas cuánticas usando los bits cuánticos, generalmente denominados haces de puerta, deben ser controlados con precisión para realizar con eficacia las operaciones cuánticas apropiadas. A continuación hay detalles adicionales sobre varias técnicas para usar configuraciones AOM para mejorar el procesamiento cuántico usando tales bits cuánticos.

La Fig. 1A ilustra un diagrama 100 que representa la captura de iones atómicos en un cristal 110 lineal usando, por ejemplo, una trampa de RF lineal de Paul (mediante el uso de electrodos dentro de una cámara de vacío). En el ejemplo mostrado en la FIG. 1A, una cámara de vacío en un sistema cuántico puede incluir un conjunto de electrodos para atrapar N ($N \geq 1$) iones de iterbio atómicos (por ejemplo, iones $^{171}\text{Yb}^+$) que están confinados en el cristal 110 lineal y se pueden enfriar con láser para estar casi en reposo. El número de iones atómicos atrapados puede configurarse. Los átomos se iluminan con radiación láser sintonizada a una resonancia en $^{171}\text{Yb}^+$ y se obtiene la imagen de fluorescencia de los iones atómicos en una cámara. En un ejemplo, los iones atómicos pueden estar separados por una distancia 115 de unas 5 micras (μm) entre sí (por ejemplo, en un intervalo de 3-7 μm), que se puede verificar por fluorescencia. La separación de los iones atómicos está determinada por un equilibrio entre la fuerza de confinamiento externo y la repulsión de Coulomb.

La fluorescencia fuerte de iones atómicos atrapados individuales se basa en el ciclo eficiente de los fotones, por lo que la estructura atómica del ion debe tener una fuerte transición óptica cerrada que permite el enfriamiento con láser del movimiento, la inicialización del estado de un bit cuántico y la lectura eficiente de un bit cuántico. Esto puede descartar muchas especies de iones atómicos, aparte de iones atómicos simples con un solo electrón externo, tales como los alcalinotérreos (Be^+ , Mg^+ , Ca^+ , Sr^+ , Ba^+) y en particular metales de transición (Zn^+ , Hg^+ , Cd^+ e Yb^+). Dentro de estos iones atómicos, los bits cuánticos se pueden representar por dos niveles electrónicos estables, a menudo caracterizados por un giro efectivo con los dos estados $|\uparrow\rangle$ y $|\downarrow\rangle$, o de manera equivalente $|1\rangle$ y $|0\rangle$. La Fig. 1B y la Figura. 1C muestran los diagramas 120 y 150 de nivel de energía reducida, respectivamente, para el ion atómico $^{171}\text{Yb}^+$, donde los niveles de un bit cuántico $|\uparrow\rangle$ y $|\downarrow\rangle$ 130 están representados por los niveles hiperfinos estables en el estado electrónico fundamental, y están separados por una frecuencia $\omega_0/2\pi = 12,642812$ GHz. Los estados electrónicos excitados $|e\rangle$ y $|e'\rangle$ 140 en $^{171}\text{Yb}^+$ están ellos mismos divididos por un acoplamiento hiperfino y están separados de los estados basales por un intervalo óptico que tiene una energía correspondiente a una longitud de onda óptica de 369,53 nm.

La radiación láser sintonizada justo por debajo de la resonancia en estas transiciones ópticas permite el enfriamiento del láser Doppler para confinar los iones atómicos cerca del fondo de la trampa. Otras formas más sofisticadas de enfriamiento láser pueden traer los iones atómicos para estar casi en reposo en la trampa.

Cuando un haz láser dicromático (por ejemplo, un haz con dos tonos producidos por bandas laterales resultantes de la modulación óptica) resonante con transiciones $|\uparrow\rangle \leftrightarrow |e'\rangle$ y $|\downarrow\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ se aplica al átomo, rápidamente cae en el estado $|\downarrow\rangle$ y ya no interactúa con el campo de luz, lo que permite la inicialización del bit cuántico con esencialmente 100% de fidelidad (vease, por ejemplo, la FIG. 1B).

Cuando se aplica un solo haz láser resonante con la transición $|\uparrow\rangle \leftrightarrow |e\rangle$, una transición óptica de ciclo cerrado hace que un ion en el estado $|\uparrow\rangle$ flúorezca fuertemente mientras que un ion en el estado $|\downarrow\rangle$ permanece oscuro porque la frecuencia láser está lejos de su resonancia (vease, por ejemplo, la FIG. 1C). La colección de incluso una pequeña fracción de esta fluorescencia permite la detección del estado del un bit cuántico atómico con casi perfecta eficiencia o precisión. Otras especies atómicas pueden tener esquemas de inicialización/detección similares.

En las Figs. 1B y 1C, todas las transiciones permitidas desde los estados electrónicos excitados $|e\rangle$ y $|e'\rangle$ 140 se ilustran como flechas onduladas hacia abajo. Por otra parte, la radiación láser aplicada (que se muestra como flechas rectas, hacia arriba) impulsan estas transiciones para la inicialización al estado $|\downarrow\rangle$ como se muestra en la Fig. 1B, y para la detección de fluorescencia del estado de un bit cuántico ($|\uparrow\rangle$ = fluorescencia, $|\downarrow\rangle$ = sin fluorescencia) como se muestra en la Fig. 1C.

Realizar el procesamiento cuántico usando los tipos de bits cuánticos descritos en las FIGS. 1A-1C requiere el uso de haces láser para controlar la fase, frecuencia, amplitud, y/o polarización de la información cuántica en los bits cuánticos. Para hacerlo de manera eficiente, es importante superar algunas limitaciones existentes en la forma en que se manipulan los haces láser. En esta divulgación, los términos "láser", "haz láser", "haz óptico" y "haz" pueden ser usados indistintamente.

Los AOM son dispositivos que se pueden utilizar en aplicaciones informáticas cuánticas basadas en átomos y átomos ionizados para manipular o controlar la frecuencia, fase, amplitud, y/o polarización de láseres, que a su vez son utilizados para manipular la información cuántica en el átomo o átomos. Se aplican una señal de RF y un haz láser al AOM y la señal de RF se imprime ("modula") en una porción del haz láser. Esa porción del haz láser es desviada ("difractada") por el AOM de una porción no afectada del haz láser y se pueden separar espacialmente.

A menudo es necesario aplicar pares de haces modulados simultáneamente al mismo átomo o átomos para generar la manipulación requerida de la información cuántica. Un AOM puede generar múltiples haces láser manipulados aplicando la suma de dos o más señales de RF (en lugar de una sola señal de RF como se describe mas arriba), donde cada señal de RF está asociada con una frecuencia particular (por ejemplo, f_1 , f_2 , etc.). Sin embargo, si los dos o más haces láser tienen diferentes frecuencias, entonces los dos haces modulados no se superponen después de que son difractados por el AOM. Los haces láser se pueden "reenfocar" (o volver a generar imágenes) en el átomo o ion de modo que ambos haces se superpongan en el átomo o ion, pero las direcciones en las que los dos

haces láser llegan al átomo o ion no es probable que coincidan (por ejemplo, los haces láser no se propagan conjuntamente). Esta desalineación entre la dirección de propagación de los dos haces láser pueden causar errores en las manipulaciones del estado cuántico.

La Fig. 2 muestra un diagrama 200 que ilustra un ejemplo de dependencia de frecuencia de haces láser difractados como se describió anteriormente. En este ejemplo, una primera señal de RF (por ejemplo, una señal modulada) es generada por un generador 210a de RF basado en la frecuencia o tono f_1 y una segunda señal de RF es generada por el generador 210b de RF con base en la frecuencia o tono f_2 . Estas dos señales se combinan por el sumador 215 y se aplica a AOM 220a.

El AOM 220a recibe un haz 225 láser incidente, parte del cual no se difracta (por ejemplo, haz 230 láser no difractado producido por difracción de orden 0). Por otro lado, la parte del haz 225 láser incidente que es difractado por el AOM 220a produce dos haces láser modulados (p. ej., haz 235a láser difractado para el tono f_1 y el haz 235b láser difractado para el tono f_2 , ambos producidos por difracción de primer orden - haces difractados de orden superior pueden filtrarse espacialmente). Los dos haces láser difractados se difractan en diferentes ángulos debido a los diferentes tonos y no se propagan conjuntamente. En consecuencia, los dos haces láser difractados deben ser enfocados por un elemento 240 óptico (por ejemplo, haz 245a láser enfocado para f_1 y haz 245b láser enfocado para f_2) sobre un ion respectivo o átomo 250 en una red o cristal formada en una trampa de iones para procesamiento cuántico. Los haces láser reenfocados no llegan al ión o átomo 250 en la misma dirección de propagación (por ejemplo, no se propagan conjuntamente), como se ilustra por el ángulo θ , y esto puede causar errores en las manipulaciones de estado cuántico.

Para abordar algunas de las limitaciones en la configuración mostrada en el diagrama 200 de la Fig. 2, dos configuraciones para reducir o eliminar la dependencia de la frecuencia del ángulo del haz difractado y teniendo en cuenta haces superpuestos o casi superpuestos con dos o más frecuencias de cambio se describen a continuación. Estas configuraciones se puede aplicar tanto a escenarios de un solo haz como a escenarios múltiples haces. Reducir o eliminar la dependencia de la frecuencia del ángulo del haz difractado puede implicar tener haces láser que alcanzan un determinado ion o átomo tengan una dirección de propagación igual o sustancialmente la misma dirección (por ejemplo, se propagan conjuntamente).

La Fig. 3 muestra un diagrama 300 que ilustra un ejemplo de una configuración de AOM desplegada para un solo canal de acuerdo con los aspectos de esta divulgación. La configuración en el diagrama 300 se basa en una versión "desplegada" de la configuración de AOM común de doble paso. En la configuración desplegada, una lente o elemento óptico reenfoca los haces divergentes de un primer AOM en un segundo AOM. El diagrama 300 muestra dos tonos aplicados a cada uno de los AOM, aunque se puede seguir un enfoque similar cuando se utilizan más de dos tonos o frecuencias.

En la configuración plegada, se usa un solo AOM y se necesita una óptica para pasar los haces láser difractados de regreso a través del mismo AOM para un segundo paso. Separar el haz láser difractado del segundo paso del haz láser entrante original requiere desalinearse los haces láser de la ruta de difracción óptima para separar espacialmente los haces láser o rotar la polarización del haz láser difractado del primer paso y luego usar la selección de polarización para separar los haces láser. En ambos métodos, puede haber luz residual no difractada que se filtre en el haz láser de difracción nominal solamente debido a la separación espacial imperfecta en el primer caso y al control de polarización imperfecto en el segundo. Esto conduce a una fuga sin desplazamiento de frecuencia en el haz de láser nominalmente difractado. También hace que la luz salga de la configuración AOM de doble paso cuando el AOM está apagado. En consecuencia, uno de los beneficios de usar una configuración AOM desplegada es evitar la transferencia no deseada de señales causada por la fuga de luz y un mejor aislamiento de encendido y apagado. Además, en ambos métodos, el segundo paso a través del AOM no es óptimo debido a la desalineación del haz láser en el primer método y debido a la dependencia de la polarización del AOM en el segundo método. En consecuencia, otro beneficio o ventaja de la configuración de AOM desplegada es la mayor eficiencia energética en comparación con el enfoque de AOM único. Es decir, al tener dos AOM, es posible realizar optimizaciones que mejoran la eficiencia energética general de la operación.

En el ejemplo de la Fig. 3, se generan dos señales de RF (por ejemplo, señales moduladas) basadas en tonos f_1 y f_2 y proporcionadas a AOM1 320a, mientras que se generan otras dos señales de RF basadas en tonos f_1' y f_2' y proporcionadas a AOM2 320b.

El AOM 320a recibe un haz 325 láser incidente en un ángulo de Bragg (θ_B), parte del cual no se difracta (por ejemplo, haz 330 láser no difractado). Por otro lado, la parte del haz láser incidente 325 que se difracta en el AOM 320a produce dos haces láser modulados (por ejemplo, haz 335a láser difractado para el tono f_1 y haz 335b láser difractado para el tono f_2). Los dos haces láser difractados se difractan en diferentes ángulos y no se propagan conjuntamente. En consecuencia, los dos haces láser difractados necesitan ser enfocados por el elemento 340 óptico (por ejemplo, el haz 345a láser enfocado para f_1 y el haz 345b láser enfocado para f_2) en AOM2 320b para que coincida con los ángulos de Bragg de haces láser con respecto a AOM2 320b.

El AOM2 320b produce vías de salida múltiples, es decir, el AOM2 320b produce múltiples haces láser difractados en diferentes direcciones de propagación desde los dos haces láser incidentes (por ejemplo, haz 345a láser enfocado y haz 345b láser enfocado) junto con la porción 355a y 355b no difractada de los haces 345a y 245b láser incidentes. Por ejemplo, un haz 360a láser difractado se produce con base en la combinación de tonos $f_2 + f_1'$ y se produce un haz 360b láser difractado con base en la combinación de tonos $f_1 + f_2'$, donde cada uno de estos haces láser difractados se difractan en un ángulo diferente. También producidos por AOM2 320b son el haz 365a láser difractado basado en la combinación de tonos $f_1 + f_1'$ y haz 365b láser difractado con base en la combinación de tonos $f_2 + f_2'$ (ilustrado como "365a, b" en la Fig. 3), que se difractan a diferente ángulo de los otros haces láser difractados, y donde ambos tienen la misma o sustancialmente la misma dirección de propagación (por ejemplo, son haces láser superpuestos). En esta divulgación, los términos sustancialmente, aproximadamente, alrededor de, y lo mismo puede referirse a un valor de dos o más números o de dos o más parámetros que se encuentran dentro del 0,1 %, 0,25 %, 0,5 %, 1 %, 2 %, 3 %, 5 % o 10 % entre sí, o dentro de un intervalo de 1-10 % uno del otro. Es posible aislar o separar los haces 365a y 365b láser difractados de los otros haces láser difractados producidos por AOM2 320b para utilizar los haces 365a y 365b láser difractados para manipular la información cuántica de un bit cuántico 370 (por ejemplo, átomo o ion en una trampa de iones). Es decir, los haces 365a y 365b láser difractados son haces de puerta que se propagan conjuntamente o sustancialmente conjuntamente para permitir o implementar operaciones de puertas cuánticas.

En este ejemplo, si $f_1' = f_1$ y $f_2' = f_2$, una de las vías de salida del AOM2 320b tiene dos haces superpuestos con cambios de frecuencia $2 \cdot f_1$ y $2 \cdot f_2$ (p. ej., los haces 365a y 365b láser difractados). Los haces láser difractados generados por el "termino-cruzado" $f_2 + f_1$ se difractan en ángulo diferente y los haces láser $f_1 + f_1' = 2 \cdot f_1$ y $f_2 + f_2' = 2 \cdot f_2$ (365a y 365b) se pueden aislar a través de filtración espacial. Si f_1' y f_1 (f_2' y f_2) difieren ligeramente pero $|f_1' - f_1|$ ($|f_2' - f_2|$) es una fracción de $|f_1 - f_2|$, entonces los haces láser $f_1' + f_1$ y $f_2' + f_2$ solo se superponen casi por completo, pero permanecen lo suficientemente separados angularmente de los términos cruzados (haces 360a y 360b láser difractados) que los haces láser $f_1' + f_1$ y $f_2' + f_2$ (365a y 365b) se pueden aislar.

En un ejemplo, los valores de f_1 y f_1' (f_2 y f_2') son aproximadamente 185 MHz (215 MHz), con las diferencias $|f_1 - f_1'|$ y $|f_2 - f_2'|$ son aproximadamente 1 MHz.

Una variación del ejemplo mostrado en la Fig. 3 incluye una implementación en la que ambos AOM en las configuraciones desplegadas son AOM multicanal, con cada canal recibiendo su conjunto independiente de f_1 , f_2 , f_1' , y f_2' . Esta configuración permite que cada canal tenga la condición $f_1 = f_1'$ y $f_2 = f_2'$ y, por lo tanto, los haces de salida completamente superpuestos para los dos (o más) tonos de cada canal.

En el caso de que f_1 y f_2 no sean los mismos que f_1' y f_2' , respectivamente, puede ser posible tener un situación en la que AOM1 320a o AOM2 320b pueden ser un AOM multicanal mientras que el otro puede ser un AOM de un solo canal, tal como un AOM de gran apertura. Por ejemplo, una implementación puede incluir que tener el primer AOM en la configuración desplegada sea un AOM de gran apertura y el segundo AOM sea un AOM multicanal. En esta implementación, f_1 y f_2 son comunes entre todos los canales de salida del primer AOM y f_1' y f_2' es individual para cada canal del segundo AOM. Una implementación similar puede tener el primer AOM en la configuración desplegada que es un AOM multicanal y el segundo AOM que es un AOM de gran apertura. En esta implementación, f_1 y f_2 son individuales a cada canal de salida del primer AOM y f_1' y f_2' son comunes entre todos los canales en el segundo AOM. Se proporcionan ejemplos de estas implementaciones a continuación en relación con las Figs. 4-6.

La Fig. 4 muestra un diagrama 400 que ilustra un ejemplo de una configuración AOM desplegada utilizando AOM multicanal de acuerdo con aspectos de esta divulgación. En este ejemplo, se proporciona un haz 405 láser incidente a un elemento 410 óptico difractivo (DOE) para generar un abanico de haces 415 láser. Los haces 415 láser son colimados por un elemento 417 óptico y los haces 425 láser colimado se proporcionan a un primer AOM en la configuración desplegado, AOM1 420a. El AOM1 420a es un AOM multicanal con N canales (p. ej., $N > 30$), donde N es un número entero que es igual o posiblemente mayor que un número de iones en un conjunto de iones 470 que se van a manipular o controlar.

Cada canal de AOM1 420a puede tener un respectivo par de señales de RF aplicadas (por ejemplo, par de señales de RF impartidas en un canal y basadas en tonos f_1 y f_2 individuales para ese canal). Cada canal del AOM1 420a puede producir un par de haces 435 láser difractados basado en f_1 , f_2 que son enfocados por un elemento 440 óptico para producir haces 445 láser enfocados, que se proporcionan a un segundo AOM en la configuración desplegada, AOM2 420b.

El AOM2 420b puede entonces, para cada canal, generar múltiples rutas de salida, una de las cuales incluye un par de haces 465 láser difractados que se propagan conjuntamente o propagan sustancialmente conjuntamente en su respectivo ion en el conjunto de iones 470. Estos haces láser pueden ser espacialmente aislados de otros que también son generados por el AOM2 420b. Al igual que el AOM1 420a, cada canal del AOM2 420b puede tener un par respectivo de señales de RF aplicadas (por ejemplo, un par de señales de RF impartidas en un canal y basado en tonos individuales f_1' y f_2' para ese canal).

Los elementos 417 y 440 ópticos pueden ser cada uno un solo componente óptico (por ejemplo, una lente) o una combinación de múltiples componentes ópticos (por ejemplo, múltiples lentes) que pueden incluir al menos una etapa óptica.

El diagrama 400 se proporciona a modo de ilustración y no de limitación. Debe entenderse que, en general, los haces láser difractados producidos por el AOM1 420a y AOM2 420b se producen en una dirección perpendicular al canal y en este ejemplo fuera del plano en la Fig. 4. En consecuencia, el diagrama 400 pretende capturar una representación conceptual o esquemática en dos dimensiones de una configuración tridimensional de AOM desplegada.

Las Figs. 5A y 5B muestran los diagramas 500a y 500b, respectivamente, que ilustran ejemplos de una configuración de AOM desplegada en la que un AOM es un AOM multicanal y el otro AOM es un AOM de gran apertura de acuerdo con los aspectos de esta divulgación. El diagrama 500a en la Fig. 5A es sustancialmente similar al diagrama 400 en la Fig. 4 con la única diferencia de que el primer AOM en la configuración desplegada, AOM1 520a, es de un solo canal, AOM de gran apertura. En este ejemplo, hay un haz 505 láser incidente, un DOE 510, un abanico de haces 515 láser, un elemento 517 óptico, haces 525 láser colimados, el AOM1 520a de gran apertura, haces 535 láser difractados, un elemento 540 óptico, haces 545 láser enfocados, un AOM2 520b multicanal, y pares de haces 465 láser difractados que se propagan conjuntamente o se propagan sustancialmente conjuntamente en su respectivo ion en el conjunto de iones 570.

El AOM1 520a de gran apertura funciona con base en tonos comunes f_1 y f_2 para todos los haces láser incidentes mientras que el AOM2 520b multicanal opera con base en tonos individuales f_1' y f_2' para cada canal.

El diagrama 500b en la Fig. 5B es sustancialmente similar al diagrama 500 en la FIG. 5A con una diferencia siendo que el segundo AOM en la configuración desplegada, AOM2 520b, es de un solo canal, AOM de gran apertura, mientras que el primer AOM, AOM520a, es un AOM multicanal. En este ejemplo, el AOM1 520a multicanal opera con base en tonos f_1 y f_2 individuales para cada canal y el AOM2 520b de gran apertura opera en tonos f comunes f_1' y f_2' para todos los haces láser incidentes.

Al igual que el diagrama 400 anterior, los diagramas 500a y 500b se proporcionan a modo de ilustración y no de limitación. Debe entenderse que, en general, haces láser difractados producidos por el AOM1 520a y el AOM2 520b se producen en una dirección perpendicular al canal y, en este ejemplo, fuera del plano en las Figs. 5A y 5B. En consecuencia, los diagramas 500a y 500b pretenden capturar una representación conceptual o esquemática en dos dimensiones de una configuración de AOM desplegada tridimensional.

La Fig. 6 muestra un diagrama 600 que ilustra otro ejemplo de una configuración de AOM desplegada de acuerdo con aspectos de esta divulgación que no se mencionan en las reivindicaciones. En este ejemplo, se generan dos señales de RF (p. ej., señales moduladas) basadas en tonos f_1 y f_2 y se proporcionan a un AOM1 620a, mientras que se genera una sola RF con base en el tono f_3 y se proporciona a un AOM2 620b. AOM 620a recibe un haz 625 láser incidente en un ángulo de Bragg (θ_B), parte del cual no se difracta (por ejemplo, un haz 630 láser no difractado). Por otro lado, la parte del haz 625 láser incidente que se difracta en el AOM 620a produce dos haces láser modulados (por ejemplo, un haz 635a láser difractado para el tono f_1 y un haz 635b láser difractado para el tono f_2). Los dos haces láser difractados se difractan en diferentes ángulos y no se propagan conjuntamente.

Los dos haces (635a, 635b) láser difractados se reenfojan en caminos de ángulo de Bragg opuestos (θ_B) en AOM2 620b por un elemento 640 óptico. Como se describió anteriormente, el AOM2 620b tiene un solo tono f_3 aplicado y produce múltiples haces láser difractados. El haz f_1 (haz 665a láser difractado) se difracta en el orden -1, adquiriendo un cambio neto f_1-f_3 , y el haz f_2 (haz 665b láser difractado) se difracta en el orden +1, adquiriendo un cambio neto de f_2+f_3 . Estos dos haces láser son haces láser que se superponen. También se producen un haz 655a láser difractados con base en el tono f_1 y un haz 655b láser difractado con base en el tono f_2 , los cuales se pueden filtrar espacialmente de los haces 665a y 665b láser que se superponen.

A diferencia de algunas de las configuraciones anteriormente descritas, esta configuración debe ajustarse físicamente para frecuencias o tonos f_1 y f_2 . Para pequeñas desviaciones en f_1 y f_2 de los valores sintonizados, los haces láser de salida que se superponen (por ejemplo, f_1-f_3 y f_2+f_3) divergirán ligeramente. El tono f_3 se puede ajustar para minimizar la divergencia. En el caso particular donde f_1 y f_2 se desplazan a $f_1 + d$ y $f_2 - d$ para una frecuencia d dada, los haces de salida de AOM1 620a se contraerán simétricamente (para $d > 0$) o se expandirán (para $d < 0$) alrededor del eje AOM2 620b y f_3 se puede ajustar para superponer completamente los haces de salida.

Similar a los ejemplos descritos anteriormente, la configuración mostrada en la FIG. 6 se puede implementar usando dos EOM multicanal, o un EOM multicanal y un EOM de gran apertura.

Otra cuestión que necesita consideración es la manipulación o control de la polarización. El control fino rápido de la polarización de la luz puede permitir un proceso sistemático reducida en las operaciones cuánticas. El método principal para tal control son los moduladores electro-ópticos (EOM), que sufren de deriva de polarización. Una alternativa a los EOM que reduciría o eliminaría esta deriva proporcionaría un poderoso herramienta para

operaciones cuánticas de calidad. A continuación se describen varios aspectos del control de la polarización del haz láser usando la dependencia de polarización de un AOM en lugar de un EOM.

Las FIG. 7A y 7B muestran los diagramas 700a y 700b, respectivamente, que ilustran un ejemplo de control de polarización usando un AOM de acuerdo con aspectos de esta descripción que no se mencionan en las reivindicaciones. Pequeños ajustes de polarización (por ejemplo, ligeras rotaciones de menos de 90°) a veces son necesarias para el control cuántico de los bits cuánticos. Sin la capacidad de realizar ajustes tan pequeños, es probable que la eficiencia del control de los bits cuánticos se reduzca. Se pueden realizar pequeñas rotaciones de polarización con moduladores electro-ópticos (EOM), pero estos tienden a la deriva y no funcionan bien con los láseres ultravioleta (UV) como los que se utilizan para el procesamiento cuántico. Las celdas de Pockels, que se basan en efectos electro-ópticos, no funcionan bien para el tipo de ajustes pequeños de polarización necesarios en el procesamiento cuántico. Las Figs. 7A y 7B describen el uso de AOM en lugar de EOM para el control de polarización.

En la Fig. 7A, la polarización de la luz incidente (por ejemplo, el haz 725 láser incidente) es lineal y en un ángulo al plano de difracción. Con AOM 720 APAGADO, el haz 730 láser no difractado que sale tiene la misma polarización que el haz 725 láser incidente (como se ilustra por la línea con el punto o círculo al final). En la Fig. 7B, con el AOM 720 ENCENDIDO (por ejemplo, con una señal de RF aplicada al AOM), parte de la luz incidente se difracta fuera del haz 725 láser incidente para producir un haz 735 láser difractado. Dependiendo del material del AOM, el AOM difractará una polarización de proyección más que la otra. Esto suprime preferentemente una de las proyecciones, provocando la polarización del haz 730 láser no difractado rote (como se ilustra por la línea con el punto o círculo al final). La cantidad de rotación se puede controlar variando la potencia de entrada de la señal de RF. El control de polarización basado en AOM se puede aplicar a un haz láser antes de que el haz láser se aplique a un ion o átomo para manipular la información cuántica almacenada en el ion o átomo. Es decir, la técnica de control de polarización descrita en el presente documento se puede aplicar con las configuraciones de AOM descritas anteriormente para proporcionar control de frecuencia, fase, amplitud y polarización. Por ejemplo, se pueden aplicar técnicas de control de polarización para propagación conjunta de haces láser que van a incidir en un ion o átomo en una trampa.

La Fig. 7C muestra un diagrama 700 en el que el AOM 720 en las FIGS. 7A y 7B es un primer AOM 720 y hay un segundo AOM 720a o más arriba también para controlar la potencia total del haz láser sin difractar. En un ejemplo, el AOM 720a más arriba puede funcionar de manera similar al AOM 720.

Los diversos aspectos descritos anteriormente para configuraciones de AOM para el procesamiento cuántico, junto con los ejemplos relacionados descritos en conexión con las Figs. 2-7C, se pueden realizar como métodos o procesos por diferentes dispositivos o sistemas. Detalles adicionales de tales los métodos, procesos, dispositivos o sistemas se describen con más detalle a continuación.

Con referencia ahora a la Fig. 8, se ilustra un ejemplo de dispositivo 800 informático de acuerdo con aspectos de la divulgación. El dispositivo 800 informático puede representar un único dispositivo informático, múltiples dispositivos informáticos, o un sistema informático distribuido, por ejemplo. El dispositivo 800 informático puede configurarse como un ordenador cuántico (por ejemplo, un sistema de procesamiento de información cuántica (QIP)), un ordenador clásico, o una combinación de funciones informáticas cuánticas y clásicas. Por ejemplo, el dispositivo 800 informático puede usarse para procesar información utilizando algoritmos cuánticos basados en tecnología de iones atrapados y por lo tanto puede implementar algunas de las técnicas descritas en las que diferentes tipos de configuraciones de AOM pueden usarse para procesamiento cuántico. Un ejemplo genérico del dispositivo 800 informático como un sistema QIP que puede implementar las técnicas descritas en el presente documento se ilustra en un ejemplo mostrado en las Figs. 12A y 12B.

En un ejemplo, el dispositivo 800 informático puede incluir un procesador 810 para llevar a cabo funciones de procesamiento asociadas con una o más de las características descritas en este documento. Por ejemplo, el procesador 810 puede ser configurado para controlar, coordinar y/o realizar aspectos de manipulación de información cuántica almacenada en un ion o átomo mediante el uso de una o más de las configuraciones de AOM o implementaciones descritas anteriormente. El procesador 810 puede incluir un conjunto único o múltiple de procesadores o procesadores de múltiples núcleos. Además, el procesador 810 puede ser implementado como un sistema de procesamiento integrado y/o un sistema de procesamiento distribuido. El procesador 810 puede incluir una unidad central de procesamiento (CPU), una unidad de procesamiento cuántico (QPU), una unidad de procesamiento de gráficos (GPU), o una combinación de esos tipos de procesadores. En un aspecto, el procesador 810 puede referirse a un procesador general del dispositivo 800 informático, que también puede incluir procesadores 810 adicionales para realizar funciones más específicas. El procesador 810 puede implicar el uso de uno o más iones atrapados para realizar operaciones, algoritmos, o simulaciones cuánticas.

En un ejemplo, el dispositivo 800 informático puede incluir una memoria 820 para almacenar instrucciones ejecutables por el procesador 810 para llevar a cabo las funciones descritas en el presente documento. En una implementación, por ejemplo, la memoria 820 puede corresponder a un medio de almacenamiento legible por ordenador que almacena códigos o instrucciones para realizar una o más de las funciones u operaciones descritas en el presente documento. En un ejemplo, la memoria 820 puede incluir instrucciones para realizar aspectos de los

métodos 900, 1000, y 1100 descritos a continuación en relación con las Figs. 9, 10 y 11. Al igual que el procesador 810, la memoria 820 puede referirse a una memoria general del dispositivo 800 informático, que también puede incluir memorias 820 adicionales para almacenar instrucciones y/o datos para funciones más específicas.

Además, el dispositivo 800 informático puede incluir un componente 830 de comunicaciones que permite establecer y mantener comunicaciones con una o más partes que utilizan hardware, software y servicios como se describe en este documento. El componente 830 de comunicaciones puede transportar comunicaciones entre componentes en el dispositivo 800 informático, así como entre el dispositivo 800 informático y dispositivos externos, tales como dispositivos ubicados a través de una red de comunicaciones y/o dispositivos conectados en serie o localmente al dispositivo 800 informático. Por ejemplo, el componente 830 de comunicaciones puede incluir uno o más buses, y puede incluir además transmitir componentes de la cadena y recibir componentes de la cadena asociados con un transmisor y un receptor, respectivamente, operable para la interfaz con dispositivos externos.

Además, el dispositivo 800 informático puede incluir un almacén 840 de datos, que puede ser cualquier combinación adecuada de hardware y/o software, que prevé almacenamiento masivo de información, bases de datos y programas empleados en relación con las implementaciones descritas en el presente documento. Por ejemplo, el almacén 840 de datos puede ser un repositorio de datos para el sistema 860 operativo (por ejemplo, OS clásico, u OS cuántico). En una implementación, el almacén 840 de datos puede incluir la memoria 820.

El dispositivo 800 informático también puede incluir un componente 850 de interfaz de usuario operable para recibir entradas de un usuario del dispositivo 800 informático y además operable para generar salidas para su presentación al usuario o para proporcionar a un sistema diferente (directa o indirectamente). El componente 850 de interfaz de usuario puede incluir uno o más dispositivos de entrada, incluidos, entre otros, un teclado, un teclado numérico, un ratón, una pantalla sensible al tacto, un digitalizador, una tecla de navegación, una tecla de función, un micrófono, un componente de reconocimiento de voz, cualquier otro mecanismo capaz de recibir una entrada de un usuario, o cualquier combinación de los mismos. Además, el componente 850 de interfaz de usuario puede incluir uno o más dispositivos de salida, incluyendo pero no limitado a una pantalla, un altavoz, un mecanismo háptico de retroalimentación, una impresora, cualquier otro mecanismo capaz de presentar una salida a un usuario, o cualquier combinación de los mismos.

En una implementación, el componente 850 de interfaz de usuario puede transmitir y/o recibir mensajes correspondientes al funcionamiento del sistema 860 operativo. Además, el procesador 810 puede ejecutar el sistema 860 la operativo y/o aplicaciones o programas, y la memoria 820 o el almacén 840 de datos pueden almacenarlos.

Cuando el dispositivo 800 informático se implementa como parte de una solución de infraestructura basada en la nube, el componente 850 de interfaz de usuario puede usarse para permitir que un usuario de la solución de infraestructura basada en la nube interactúa de forma remota con el dispositivo 800 informático.

La Fig. 9 es un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de un método 900 para controlar la propagación del haz láser en procesamiento cuántico de acuerdo con aspectos de esta divulgación. En un aspecto, el método 900 puede realizarse en un sistema informático (p. ej., como parte de las operaciones del sistema informático) tal como el dispositivo 800 informático descrito anteriormente, donde, por ejemplo, el procesador 810, la memoria 820, el almacén 840 de datos, y/o el sistema 860 operativo pueden usarse para realizar o controlar las funciones del método 900. Del mismo modo, las funciones del método 900 se pueden realizar o controlar por uno o más componentes de un sistema de QIP tal como como el sistema 1200 de QIP y sus componentes (p. ej., controlador 1220 óptico y sus subcomponentes) descritos en más detalle a continuación en relación con las Figs. 12A y 12B. Los aspectos del método 900 se pueden describir en conexión con las configuraciones o implementaciones de AOM en al menos las Figs. 3-5B.

En 910, el método 900 incluye generar, por un primer AOM de un haz láser incidente, un primer haz láser difractado basado en un primer tono de RF y un segundo haz láser difractado basado en un segundo tono de RF, en el que el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado se difractan en diferentes ángulos.

En 920, el método 900 incluye enfocar, a través de un componente óptico, el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado en un segundo AOM.

En 930, el método 900 incluye generar, por el segundo AOM del primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado, al menos un tercer haz láser difractado basado en el primer tono de RF y un tercer tono de RF y un cuarto haz láser difractado basado en el segundo tono de RF y un cuarto tono de RF, en el que el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado se difractan para ser sustancialmente paralelos cuando inciden en un ion respectivo en una cadena de iones en una trampa.

En 940, el método 900 incluye controlar información cuántica en el ion para realizar procesamiento cuántico basado en el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado.

En un aspecto del método 900, el primer tono de RF es el mismo que el tercer tono de RF, el segundo tono de RF es el mismo que el cuarto tono de RF, y el tercero haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado se están propagando conjuntamente en el ion respectivo.

- 5 En un aspecto del método 900, el primer tono de RF es diferente del tercer tono de RF, el segundo tono de RF es diferente del cuarto tono de RF, y el tercero haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado se propagan sustancialmente conjuntamente en el ion respectivo.

10 En un aspecto del método 900, el método además incluye generar una primera señal de control de RF basada en el primer tono de RF; generar una segunda señal de control de RF basada en el segundo tono de RF; generar una tercera señal de control de RF basada en el tercer tono de RF; generar una cuarta señal de control de RF basada en el cuarto tono de RF; proporcionar la primera señal de control de RF y el segundo control de RF al primer AOM para generar el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado; y proporcionar la tercera señal de control de RF y el cuarto control de RF al segundo AOM para generar el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado.

15 En un aspecto del método 900, generar al menos el tercer haz láser difractado y el cuarto difractado haz láser control incluye la generación de un quinto haz láser difractado basado en el primer tono de RF y el cuarto tono de RF y un sexto haz láser difractado basado en el segundo tono de RF y el tercer tono de RF, y el método incluye además aislar el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado del quinto haz láser difractado y el sexto haz láser difractado por filtrado espacial.

20 En un aspecto del método 900, cada uno del primer AOM y el segundo AOM es un AOM multicanal, cada canal en el primer AOM tiene un primer tono de RF respectivo y segundo tono de RF, y cada canal en el segundo AOM tiene un tercer tono de RF y un cuarto tono de RF respectivos.

25 En un aspecto del método 900, el primer AOM es un AOM multicanal y el segundo AOM es un AOM de un solo canal, o el primer AOM es un AOM de un solo canal y el segundo AOM es un AOM multicanal.

30 En un aspecto del método 900, el primer AOM es un AOM de gran apertura y el segundo AOM es un AOM multicanal, el primer tono de RF y el segundo tono de RF son comunes a todos los canales del primer AOM, y el tercer tono de RF y el cuarto tono de RF se configuran individualmente para cada uno de los canales del segundo AOM.

35 En un aspecto del método 900, el primer AOM es un AOM multicanal y el segundo AOM es un AOM de gran apertura, el primer tono de RF y el segundo tono de RF se configuran individualmente para cada uno de los canales del primer AOM, y el tercer tono de RF y el cuarto tono de RF son comunes a todos los canales del segundo AOM.

40 La Fig. 10 es un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de un método 1000 para controlar la propagación del haz láser en procesamiento cuántico de acuerdo con aspectos de esta divulgación que no se mencionan en las reivindicaciones. En un aspecto, el método 1000 se puede realizar en un sistema informático (por ejemplo, como parte de las operaciones del sistema informático) tales como el dispositivo 800 informático descrito anteriormente, donde, por ejemplo, el procesador 810, la memoria 820, el almacén 840 de datos y/o el sistema 860 operativo pueden usarse para realizar o controlar las funciones del método 1000. Del mismo modo, las funciones del método 1000 pueden ser realizadas o controladas por uno o más componentes de un sistema de QIP tal como el sistema 1200 de QIP y sus componentes (p. ej., controlador 1220 óptico y sus subcomponentes) descritos con más detalle a continuación en relación con las Figs. 12A y 12B. Aspectos del método 1000 se pueden describir en relación con las configuraciones o implementaciones de AOM en al menos la Fig. 6.

50 En 1010, el método 1000 incluye generar, por un primer AOM de un haz láser incidente, un primer haz laser difractado basado en un primer tono de RF y un segundo haz láser difractado basado en un segundo tono de RF, en el que el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado se difractan en diferentes ángulos.

55 En 1020, el método 1000 incluye enfocar, a través de un componente óptico, el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado en el lado opuesto del ángulo de Bragg en un segundo AOM.

60 En 1030, el método 1000 incluye generar, por el segundo AOM del primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado, al menos un tercer haz láser difractado basado en el primer tono de RF y un tercer tono de RF y un cuarto haz láser difractado basado en el segundo tono de RF y el tercer tono de RF, en el que el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado se difractan para ser sustancialmente paralelos cuando inciden en un ion respectivo en una cadena de iones en una trampa.

65 En 1040, el método 1000 incluye controlar información cuántica en el ion para realizar procesamiento cuántico basado en el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado.

En un aspecto del método 1000, cada uno del primer AOM y el segundo AOM es un AOM multicanal, cada canal en el primer AOM tiene un primer tono de RF respectivo y un segundo tono de RF, y cada canal en el segundo AOM tiene un tercer tono de RF respectivo.

- 5 En un aspecto del método 1000, el primer AOM es un AOM multicanal y el segundo AOM es un AOM de un solo canal, o el primer AOM es un AOM de un solo canal y el segundo AOM es un AOM multicanal.

10 En un aspecto del método 1000, el primer AOM es un AOM de gran apertura y el segundo AOM es un AOM multicanal, el primer tono de RF y el segundo tono de RF son comunes a todos los canales del primer AOM, y el tercer tono de RF se configura individualmente para cada uno de los canales del segundo AOM.

15 En un aspecto del método 1000, el primer AOM es un AOM multicanal y el segundo AOM es un AOM de gran apertura, el primer tono de RF y el segundo tono de RF se configuran individualmente para cada uno de los canales del primer AOM, y el tercer tono de RF es común a todos los canales del segundo AOM.

20 La Fig. 11 es un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de un método 1100 para control de polarización en procesamiento cuántico de acuerdo con aspectos de esta divulgación que no se mencionan en las reivindicaciones. En un aspecto, el método 1100 se puede realizar en un sistema informático (por ejemplo, como parte de las operaciones del sistema informático) tal como el dispositivo 800 informático descrito anteriormente, donde, por ejemplo, el procesador 810, la memoria 820, el almacén 840 de datos y/o el sistema 860 operativo pueden utilizarse para realizar o controlar las funciones del método 1100. Del mismo modo, las funciones del método 1100 pueden ser realizadas o controladas por uno o más componentes de un sistema de QIP tal como el sistema 1200 de QIP y sus componentes (por ejemplo, el controlador 1220 óptico y sus subcomponentes) descritos con más detalle a continuación en relación con las Figs. 12A y 12B. Aspectos del método 1100 pueden describirse en relación con las configuraciones o implementaciones de AOM en al menos las Figs. 7A y 7B.

25 En 1110, el método 1100 incluye proporcionar un haz láser incidente en un AOM.

30 En 1120, el método 1100 incluye generar por el AOM del haz láser y basado en una señal de RF de control aplicada al AOM, un haz láser no difractado y un haz láser difractado, una polarización del haz láser no difractado que gira con respecto a una polarización del haz láser incidente.

35 En 1130, el método 1100 incluye aplicar el haz láser no difractado a un ion en una cadena de iones en una trampa para realizar el procesamiento cuántico mediante el control de la información cuántica en el ion.

40 En otro aspecto del método 1100, el método 1100 puede incluir el control de la potencia total del haz láser no difractado al proporcionar un segundo AOM más arriba de la AOM. Por ejemplo, el diagrama 700 en la Fig. 7C muestra que el AOM 720 en las Figs. 7A y 7B es un primer AOM 720 y hay un segundo AOM 720a o más arriba, también para controlar la potencia total del haz láser no difractado.

45 En otro aspecto del método 1100, el haz láser difractado es un haz láser difractado de primer orden, el método 1100 incluye además controlar la potencia total del haz láser no difractado al proporcionar un segundo AOM más arriba del AOM y aplicando el haz láser difractado de primer orden al segundo AOM.

50 En otro aspecto más del método 1100, el método 1100 puede incluir el control de la potencia total del haz láser no difractado proporcionando un segundo AOM más arriba del AOM y controlando una potencia de radio frecuencia (RF) al segundo AOM para mantener la potencia total del segundo AOM estable incluso en presencia de control de polarización.

55 La Fig. 12A es un diagrama de bloques que ilustra un ejemplo de un sistema 1200 de QIP de acuerdo con aspectos de esta divulgación. El sistema 1200 de QIP también puede denominarse como un sistema de computación cuántica, un dispositivo informático, un ordenador cuántico de iones atrapados, o similares. En un aspecto, el sistema 1200 de QIP puede corresponder a porciones de una implementación de ordenador cuántico del dispositivo 800 informático en la Fig. 8.

60 El sistema 1200 de QIP puede incluir una fuente 1260 que proporciona especies atómicas (por ejemplo, un flujo de átomos neutros) a una cámara 1250 que tiene una trampa 1270 de iones que atrapa las especies atómicas una vez ionizadas (por ejemplo, fotoionizadas) por un controlador 1220 óptico (véase, por ejemplo, la Fig. 12B). Las fuentes 1230 ópticas en el controlador 1220 óptico pueden incluir una o más fuentes de láser que se pueden utilizar para ionización de las especies atómicas, control (por ejemplo, control de fase) de los iones atómicos, para la fluorescencia de los iones atómicos que pueden ser monitoreados y rastreados por algoritmos de procesamiento de imágenes que operan en un sistema 1240 de obtención de imágenes en el controlador 1220 óptico, y/o para realizar algunas de las configuraciones y manipulaciones de AOM descritas en esta divulgación. En un aspecto, las fuentes 1230 pueden implementarse por separado del controlador 1220 óptico.

65

El sistema 1240 de obtención de imágenes puede incluir un generador de imágenes de alta resolución (por ejemplo, de cámara CCD) para monitorear los iones atómicos mientras se suministran a la trampa de iones o después de que se hayan proporcionado a la trampa 1270 de iones. En un aspecto, el sistema 1240 de generación de imágenes se puede implementar separado del controlador 1220 óptico, sin embargo, el uso de fluorescencia para detectar, identificar y etiquetar iones atómicos que utilizan algoritmos de procesamiento de imágenes puede necesitar estar coordinado con el controlador 1220 óptico. En otro aspecto, el sistema 1240 de generación de imágenes puede incluir óptica de formación de imágenes que se puede utilizar para dirigir fotones dispersados por los iones, donde los fotones se pueden utilizar para obtener información tal como la ubicación de los iones y/o el estado cuántico de un bit cuántico tras la medición. Los fotones pueden ser dirigidos a diferentes tipos de detectores incluyendo reproductores de imágenes y/o detectores de fotones individuales tales como tubos fotomultiplicadores, por ejemplo. Los fotones pueden ser dirigidos a los detectores mediante fibras ópticas y/u otros tipos de guías de ondas ópticas.

El sistema 1200 de QIP también puede incluir un componente 1210 de algoritmos que puede operar con otras partes del sistema 1200 de QIP (no se muestra) para realizar algoritmos cuánticos u operaciones cuánticas, incluidas operaciones de un solo bit cuántico u operaciones de múltiples bits cuánticos así como cálculos cuánticos extendidos. Como tal, el componente 1210 de algoritmos puede proporcionar instrucciones a varios componentes del sistema 1200 de QIP (por ejemplo, al controlador 1220 óptico) para permitir la implementación de los algoritmos cuánticos u operaciones cuánticas. En un ejemplo, el componente 1210 de algoritmos puede realizar, coordinar y/o instruir la realización de operaciones asociadas con las diversas configuraciones de AOM descritas en el presente documento.

La Fig. 12B muestra al menos una parte del controlador 1220 óptico. En este ejemplo, el controlador 1220 óptico puede incluir un controlador 1221 de haces, las fuentes 1230 ópticas, el sistema 1240 de generación de imágenes y las configuraciones 1237 de AOM que pueden incluir uno o más de los AOM y componentes ópticos que incluyen DOE y lentes o conjuntos de lentes. Como muestran las líneas punteadas, una o más de las fuentes 1230 ópticas, el sistema 1240 de generación de imágenes, y las configuraciones 1237 de AOM pueden implementarse separadas de, pero en comunicación con, el controlador 1220 óptico. El sistema 1240 de generación de imágenes incluye una CCD 1241 (o generador de imágenes o cámara similar) y un componente 1242 de algoritmos de procesamiento de imágenes. Las fuentes 1230 ópticas incluyen un modulador 1225 y múltiples fuentes de láser 1235a, ..., 1235b, que pueden utilizarse para una o más de las funciones descritas anteriormente (por ejemplo, para producir haces láser o de puerta para la manipulación de información de bits cuánticos). En un aspecto, el modulador 1225 puede implementar uno o más de los generadores de RF descritos en este documento (por ejemplo, generadores 210a y 210b de RF en la Fig. 2).

El controlador 1221 de haces está configurado para realizar varios aspectos descritos en este documento para las configuraciones de AOM para el procesamiento cuántico. El controlador 1221 de haces puede incluir un componente 1222 de control de la configuración de AOM que tiene un componente 1224 de generación de tonos para controlar los diversos aspectos asociados con la generación y aplicación de señales de control de RF basadas en diferentes tonos, y un componente 1226 de polarización para controlar los diversos aspectos asociados con el uso de AOM para proporcionar un control fino y rápido de la polarización al generar señales de control de RF apropiadas. En una implementación, el componente 1222 de control de configuración de AOM puede implementarse por separado del controlador 1221 de haces pero en comunicación con el controlador 1221 de haces.

Los diversos componentes del controlador 1220 óptico pueden operar individualmente o en combinación para realizar las diversas funciones descritas en esta divulgación, por ejemplo, los métodos 900, 1000 y 1100 en las Figs. 9, 10 y 11. Además, los diversos componentes del controlador 1220 óptico pueden operar con uno o más de los componentes del sistema 1200 de QIP para realizar las diversas funciones descritas en esta divulgación, por ejemplo, los métodos 900, 1000 y 1100 en las Figs. 9, 10 y 11.

Mientras que los ejemplos descritos anteriormente están generalmente basados en el uso de dos frecuencias o tonos, debe entenderse que técnicas similares a las utilizadas en esos ejemplos también se aplican cuando se utilizan más de dos frecuencias o tonos. También debe entenderse que las técnicas descritas anteriormente se pueden utilizar no solo para haces de puerta sino también para ondas continuas utilizadas para, por ejemplo, enfriamiento Doppler y operaciones similares donde el aislamiento de los haces láser difractados puede ser necesario.

Aunque la presente divulgación se ha proporcionado de acuerdo con las implementaciones mostradas, un experto en la materia reconocerá fácilmente que podría haber variaciones en las realizaciones y aquellas variaciones estarían dentro del alcance de la presente divulgación. En consecuencia, se pueden hacer muchas modificaciones por un experto ordinario en la materia sin apartarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método para controlar la propagación del haz láser en procesamiento cuántico, que comprende:

5 generar, mediante un primer modulador acústico-óptico, AOM, (320a) de un haz (325) láser incidente, un primer haz (335a) láser difractado con base en una primera radiofrecuencia, RF, tono y un segundo haz (335b) láser difractado basado en un segundo tono de RF, en el que el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado se difractan en diferentes ángulos;
enfocar, a través de un componente (340) óptico, el primer haz láser difractado y el segundo difractado haz láser
10 sobre un segundo AOM (320b);
generar, mediante el segundo AOM (320b) del primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado, al menos un tercer haz (365a) láser difractado basado en el primer tono de RF y un tercer tono de RF y un cuarto haz (365b) láser difractado basado en el segundo tono de RF y un cuarto tono de RF, en el que el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado se difractan para ser sustancialmente paralelos cuando inciden en
15 un ion (370) respectivo en una cadena de iones en una trampa; y
controlar la información cuántica en el ion para realizar procesamiento cuántico basado en el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado.

20 2. El método de la reivindicación 1, en el que un ángulo de incidencia del haz (325) láser incidente y el enfoque del primer haz (335a) láser difractado y el segundo haz (335b) láser difractado en el segundo AOM se basan en un ángulo de Bragg.

3. El método de la reivindicación 1 o 2, en el que:

25 el primer tono de RF es el mismo que el tercer tono de RF,
el segundo tono de RF es el mismo que el cuarto tono de RF, y
el tercer haz (365a) láser difractado y el cuarto haz (365b) láser difractado se propagan conjuntamente en el ion (370) respectivo.

30 4. El método de la reivindicación 1 o 2, en el que:

el primer tono de RF es diferente del tercer tono de RF,
el segundo tono de RF es diferente del cuarto tono RF, y
el tercer haz (365a) láser difractado y el cuarto haz (365b) láser difractado se propagan en forma
35 sustancialmente conjunta en el ion (370) respectivo.

5. El método de cualquier reivindicación anterior, que comprende además:

40 generar una primera señal de control de RF basada en la primera tono de RF;
generar una segunda señal de control de RF basada en el segundo tono de RF;
generar una tercera señal de control de RF basada en el tercer tono de RF;
generar una cuarta señal de control de RF basada en el cuarto tono de RF;
proporcionar la primera señal de control de RF y el segundo control de RF al primer AOM (320a) para generar el
45 primer haz (335a) láser difractado y el segundo haz (335b) láser difractado; y
proporcionar la tercera señal de control de RF y el cuarto control de RF al segundo AOM (320b) para generar el tercer haz (365a) láser difractado y el cuarto haz (365b) láser difractado.

50 6. El método de cualquier reivindicación anterior, en el que generar al menos el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado incluye generar un quinto haz (360b) láser difractado basado en el primero tono de RF y el cuarto tono de RF y un sexto haz (360a) láser difractado basado en el segundo tono de RF y el tercer tono de RF, comprendiendo además el método aislar el tercer haz (365a) láser difractado y el cuarto haz (365b) láser difractado del quinto haz láser difractado y el sexto haz láser difractado por filtrado espacial.

7. El método de cualquier reivindicación anterior, en el que:

55 cada uno del primer AOM (420a) y el segundo AOM (420b) es un AOM multicanal,
cada canal en el primer AOM tiene un respectivo primer tono de RF y segundo tono de RF, y
cada canal en el segundo AOM tiene un respectivo tercer tono de RF y cuarto tono de RF.

60 8. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que:

el primer AOM (520a) es un AOM multicanal y el segundo AOM (520b) es un AOM de un sólo canal, o
el primer AOM (520a) es un AOM de un solo canal y el segundo AOM (520b) es un AOM multicanal.

65 9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que:

el primer AOM (520a) es un AOM de gran apertura y el segundo AOM (520b) es un AOM multicanal, el primer tono de RF y el segundo tono de RF son comunes a todos los canales del primer AOM, y el tercer tono de RF y el cuarto tono de RF se configuran individualmente para cada uno de los canales del segundo AOM.

10. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que:

el primer AOM (520a) es un AOM multicanal y el segundo AOM (520b) es un AOM de gran apertura, el primer tono de RF y el segundo tono de RF se configuran individualmente para cada uno de los canales del primer AOM, y el tercer tono de RF y el cuarto tono de RF son comunes a todos los canales del segundo AOM.

11. Un sistema de procesamiento de información cuántica, QIP, para controlar la propagación del haz láser en procesamiento cuántico, que comprende:

una o más fuentes ópticas configuradas para generar un haz (325) láser;
un primer modulador acústico-óptico, AOM, (320a) configurado para generar, a partir del haz láser, un primer haz (335a) láser difractado basado en una primera radiofrecuencia, RF, tono y un segundo haz (335b) láser difractado basado en un segundo tono de RF, en el que el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado se difractan en diferentes ángulos;
un componente (340) óptico configurado para enfocar el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado en un segundo AOM;
un segundo AOM (320b) configurado para generar, desde el primer haz láser difractado y el segundo haz láser difractado, al menos un tercer haz (365a) láser difractado basado en el primer tono de RF y un tercer tono de RF y un cuarto haz (365b) láser difractado basado en el segundo tono de RF y un cuarto tono de RF, en el que el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado se difractan para ser sustancialmente paralelos cuando inciden en un ion (370) respectivo en una cadena de iones en una trampa; y
un controlador de haz configurado para controlar información cuántica en el ion para realizar procesamiento cuántico basado en el tercer haz láser difractado y el cuarto haz láser difractado.

12. El sistema de QIP de la reivindicación 11, en el que:

cada uno del primer AOM (420a) y el segundo AOM (420b) es un AOM multicanal, cada canal en el primer AOM tiene un primer tono de RF respectivo y un segundo tono de RF, y cada canal en el segundo AOM tiene un respectivo tercer tono de RF.

13. El sistema de QIP de la reivindicación 11, en el que:

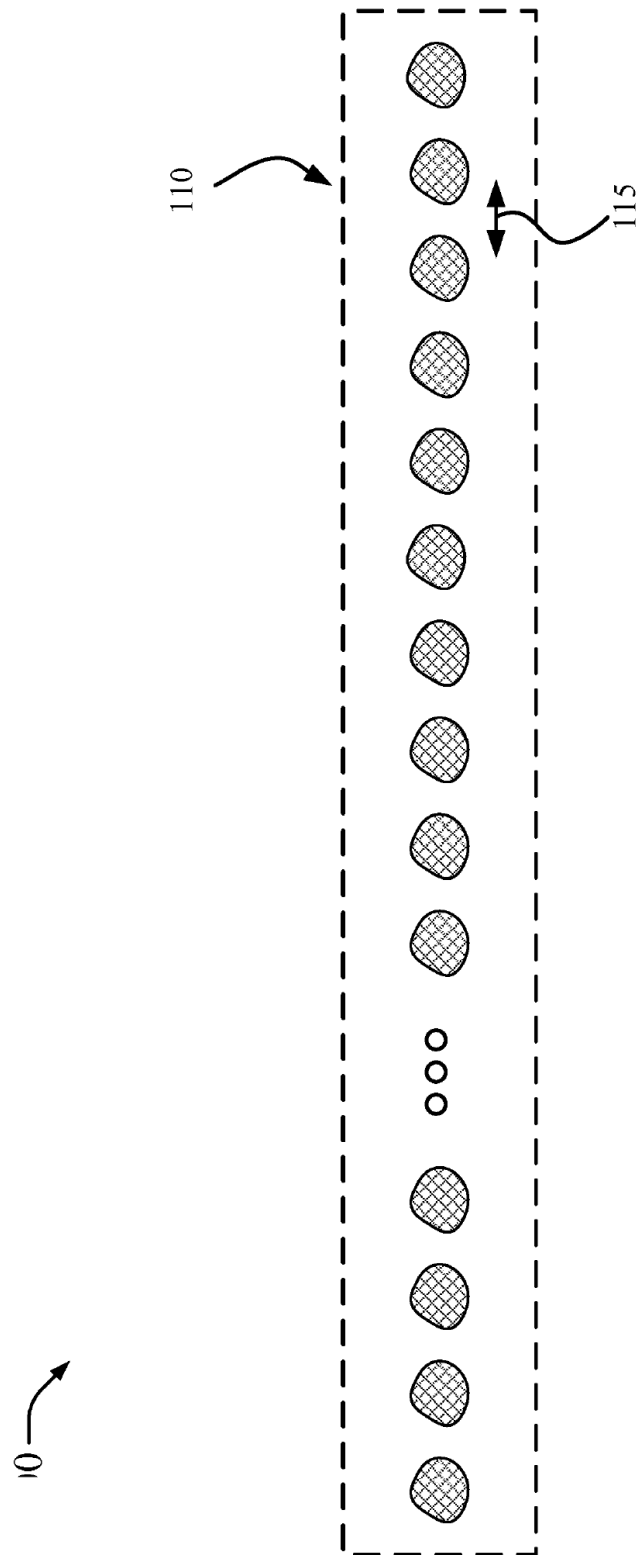
el primer AOM (520a) es un AOM multicanal y el segundo AOM (520b) es un AOM de un solo canal, o el primer AOM (520a) es un AOM de un solo canal y el segundo AOM (520b) es un AOM multicanal.

14. El sistema de QIP de la reivindicación 11, en el que:

el primer AOM (520a) es un AOM de gran apertura y el segundo AOM (520b) es un AOM multicanal, el primer tono de RF y el segundo tono de RF son comunes a todos los canales del primer AOM, y el tercer tono de RF y el cuarto tono de RF se configuran individualmente para cada uno de los canales del segundo AOM.

15. El sistema de QIP de la reivindicación 11, en el que:

el primer AOM (520a) es un AOM multicanal y el segundo AOM (520b) es un AOM de gran apertura, el primer tono de RF y el segundo tono de RF se configuran individualmente para cada uno de los canales del primer AOM, y el tercer tono de RF y el cuarto tono de RF son comunes a todos los canales del segundo AOM.



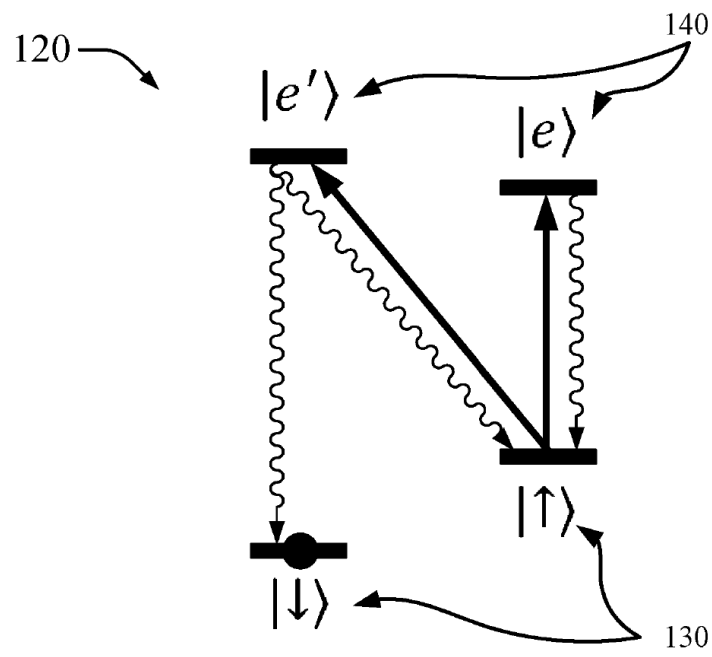


FIG. 1B

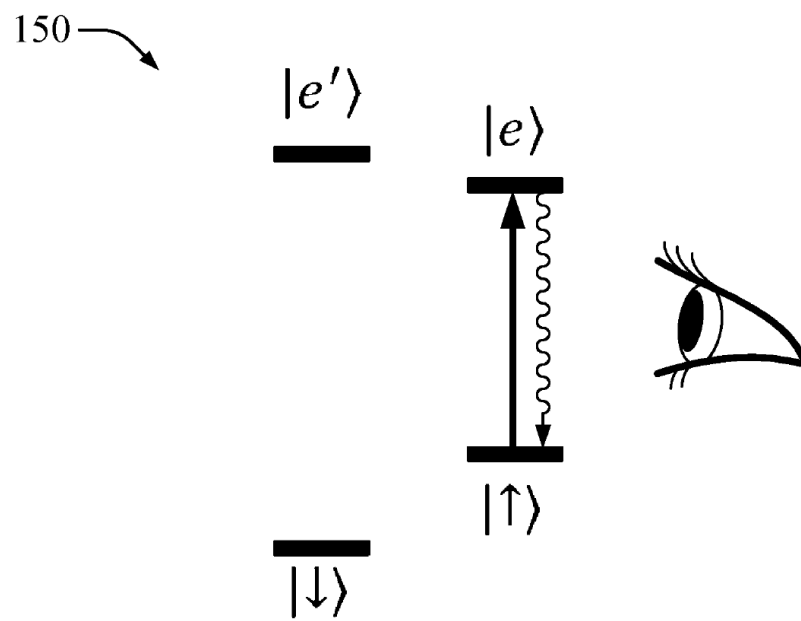


FIG. 1C

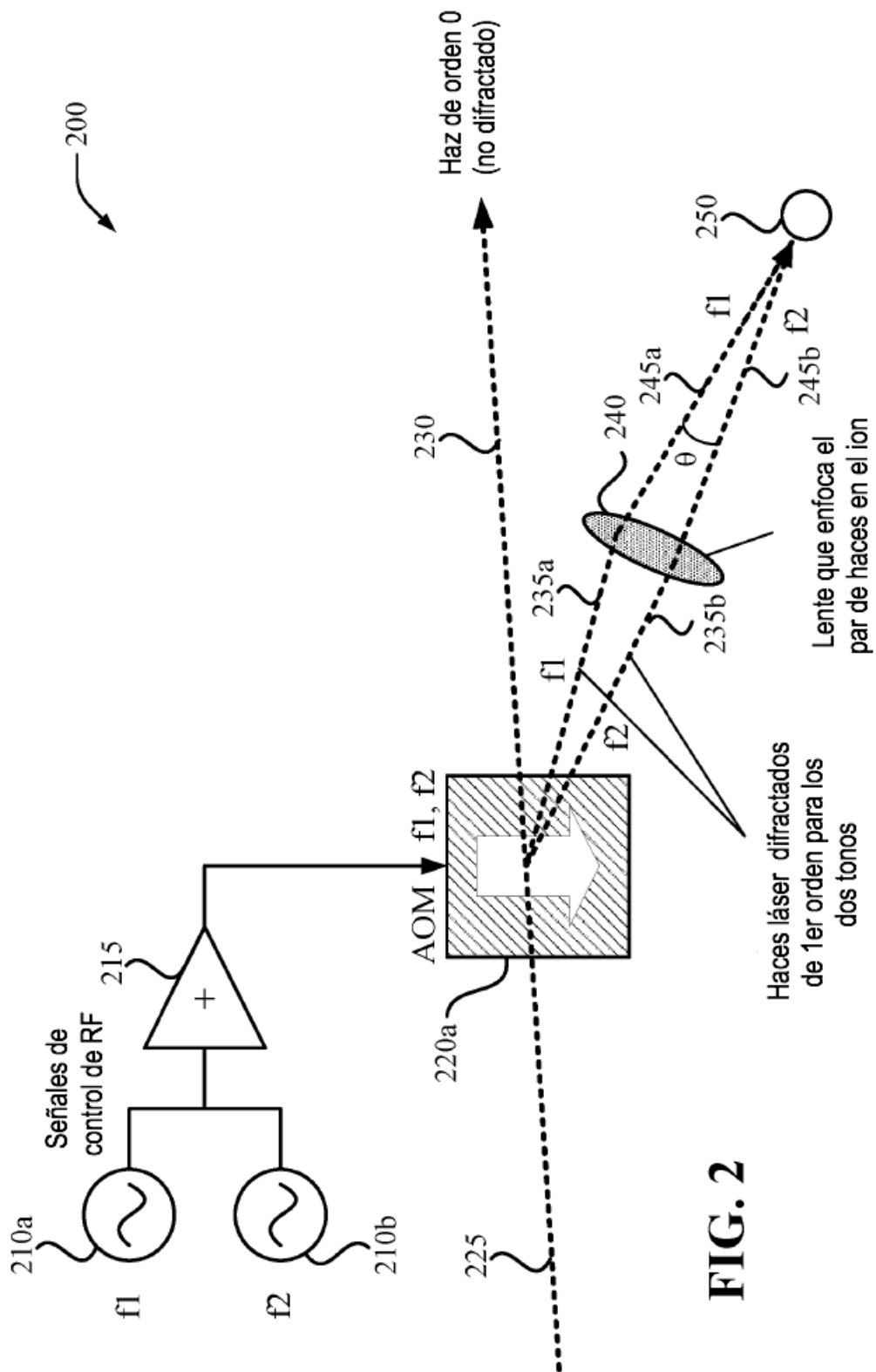


FIG. 2

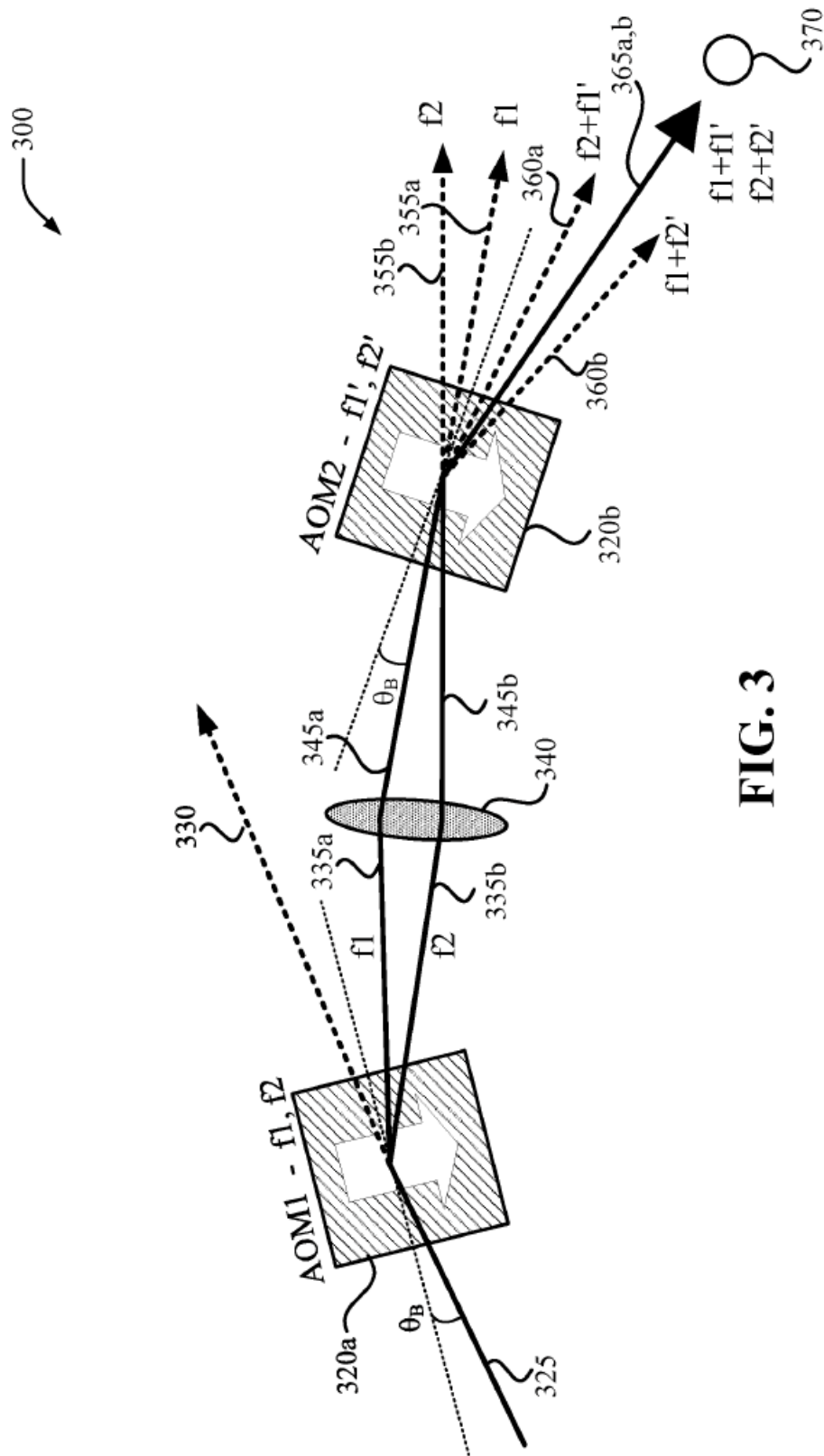


FIG. 3

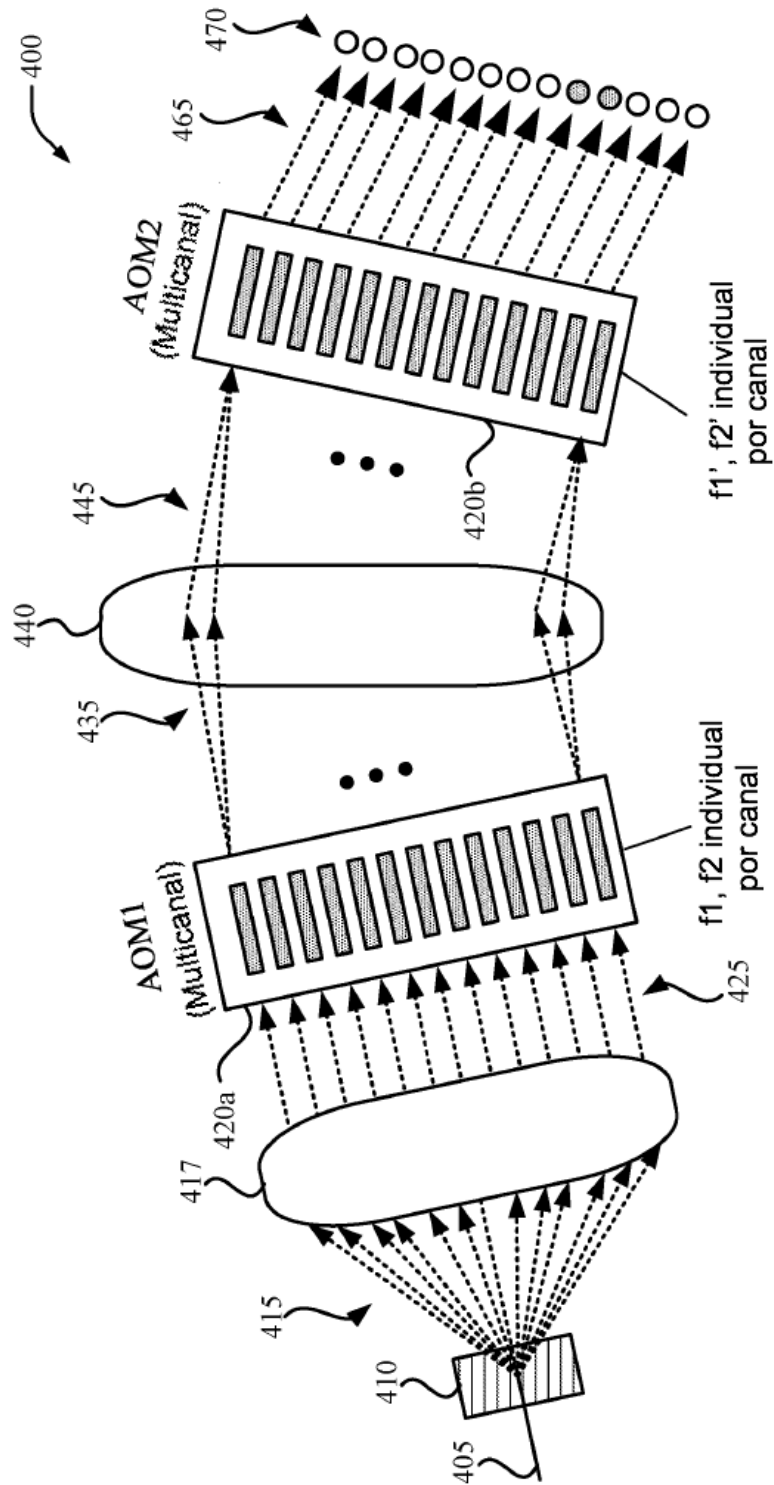


FIG. 4

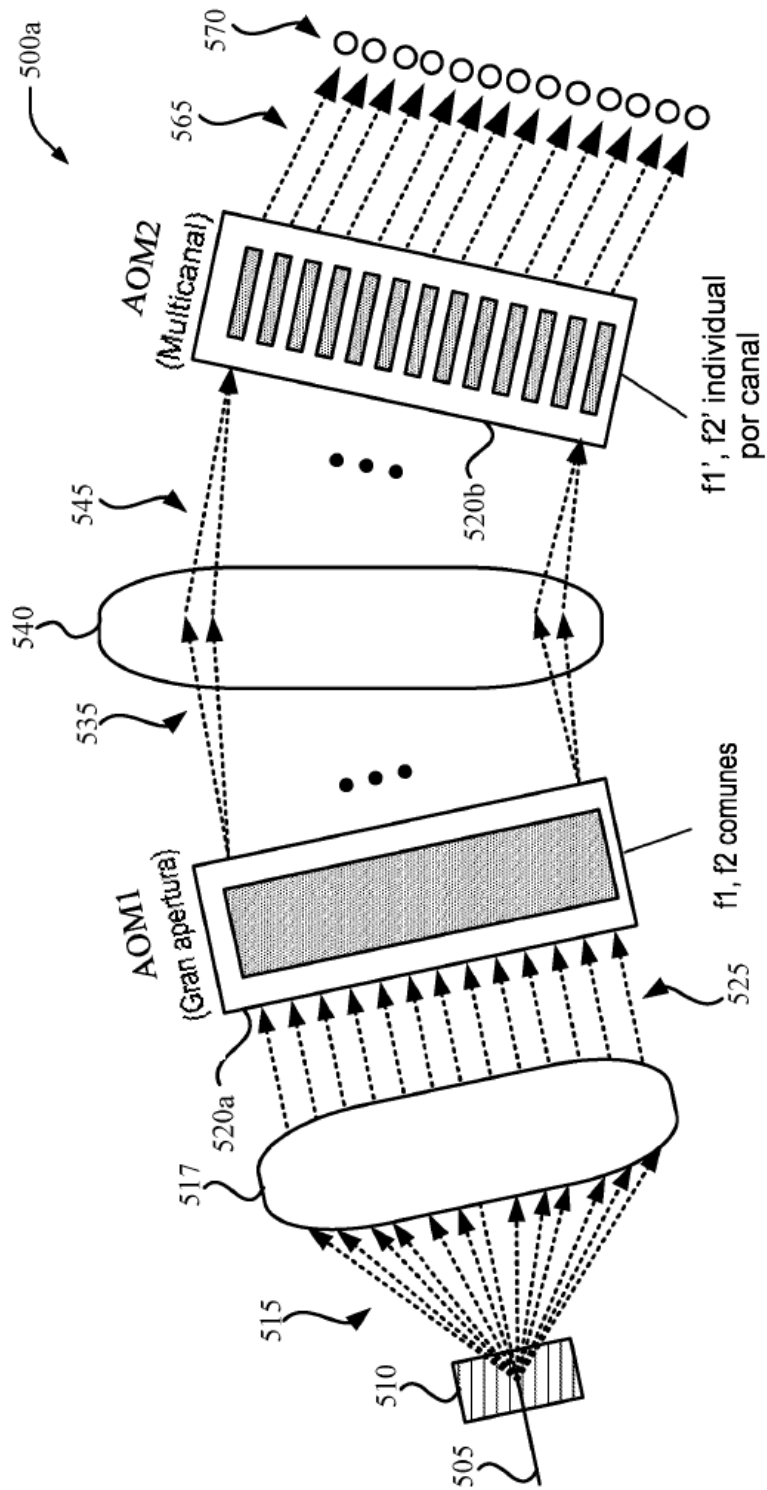


FIG. 5A

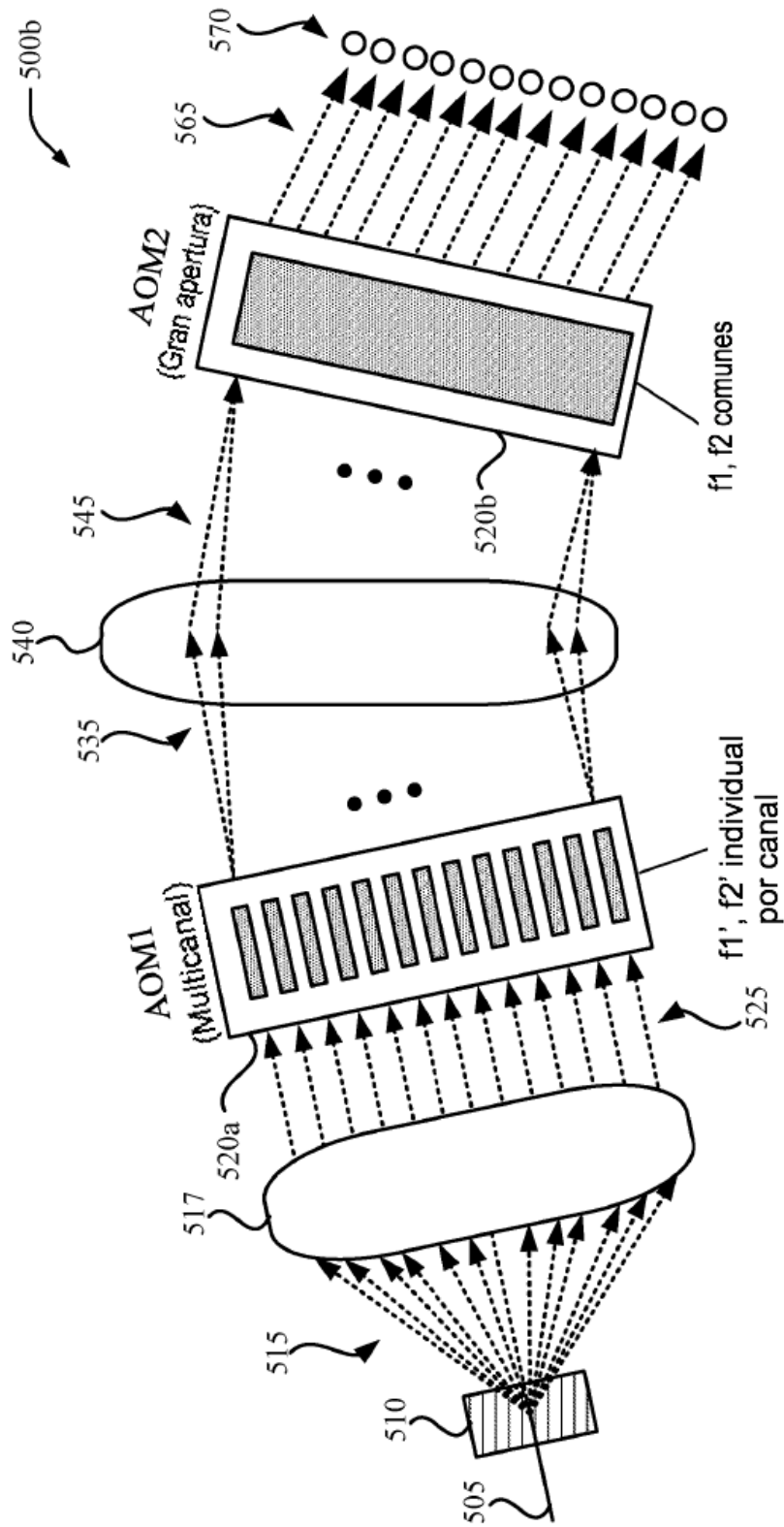


FIG. 5B

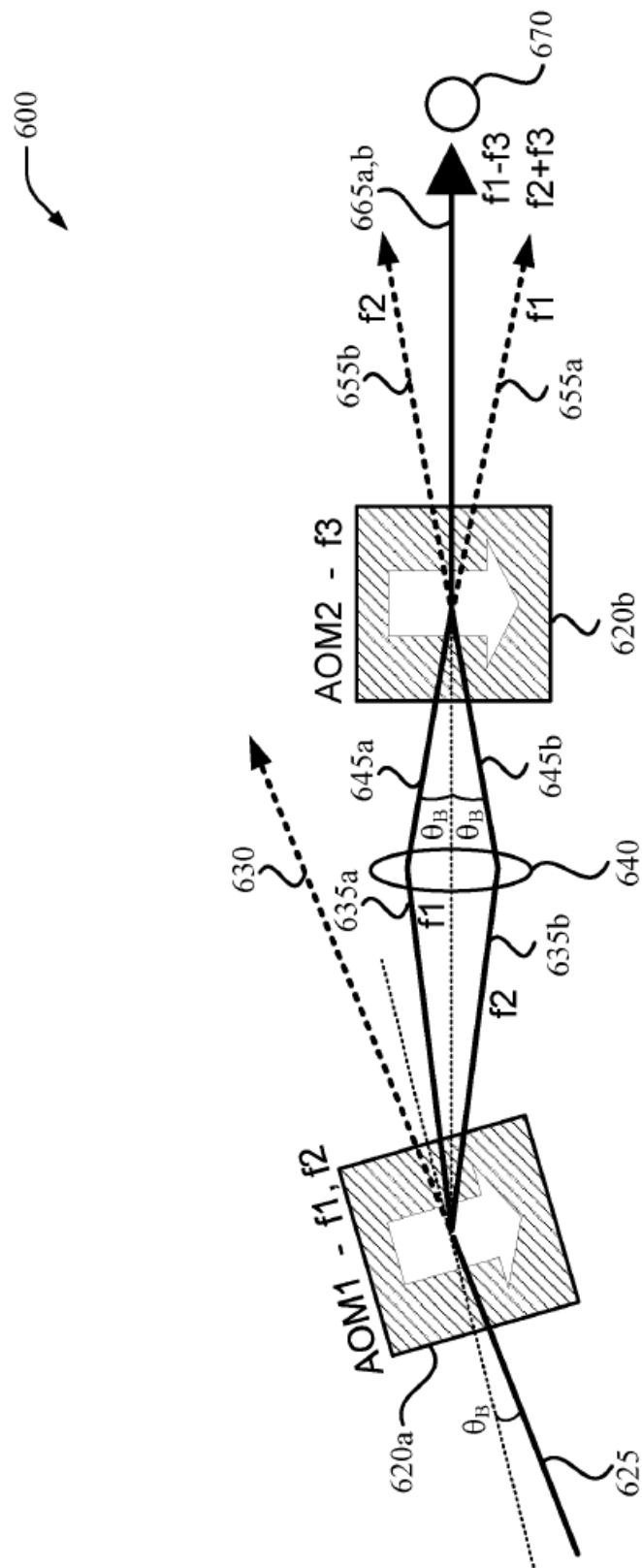


FIG. 6

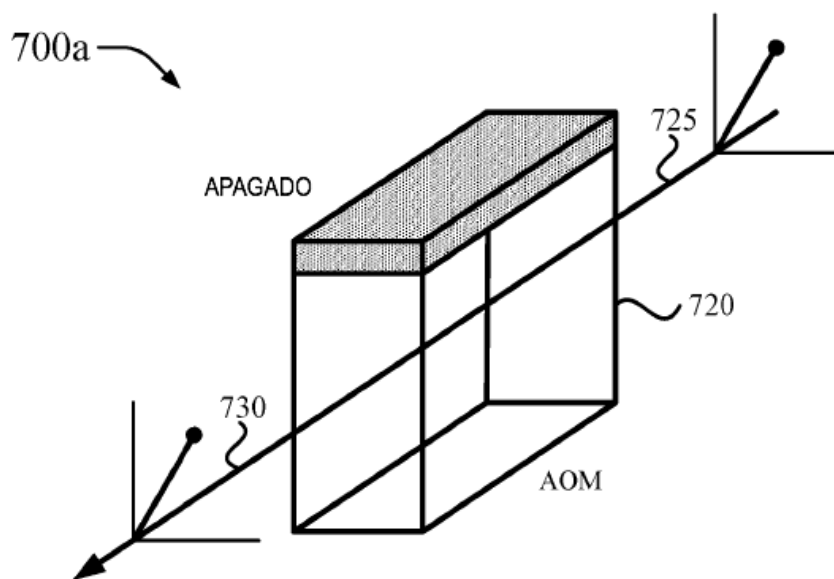


FIG. 7A

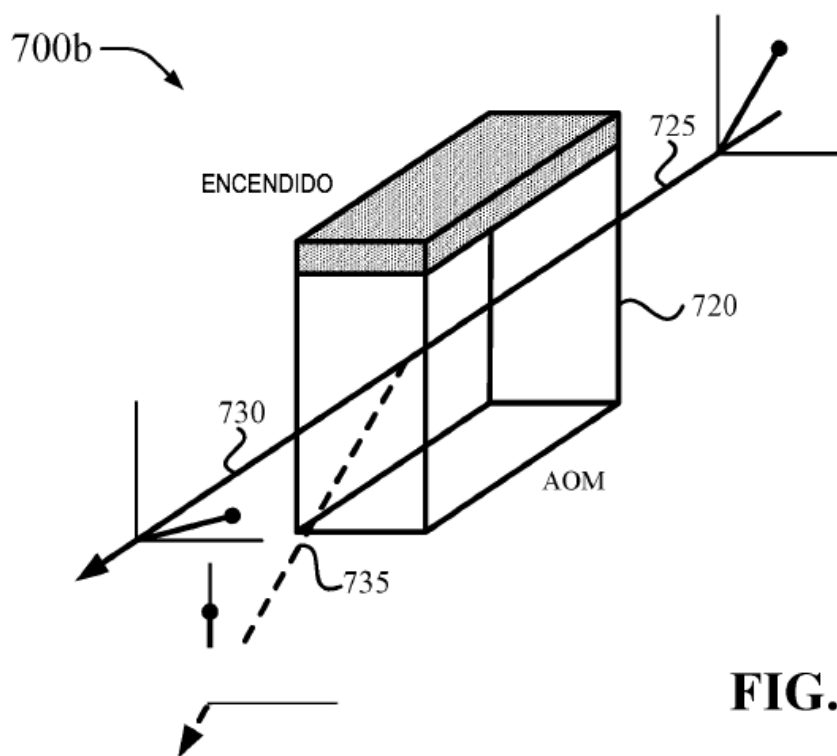


FIG. 7B

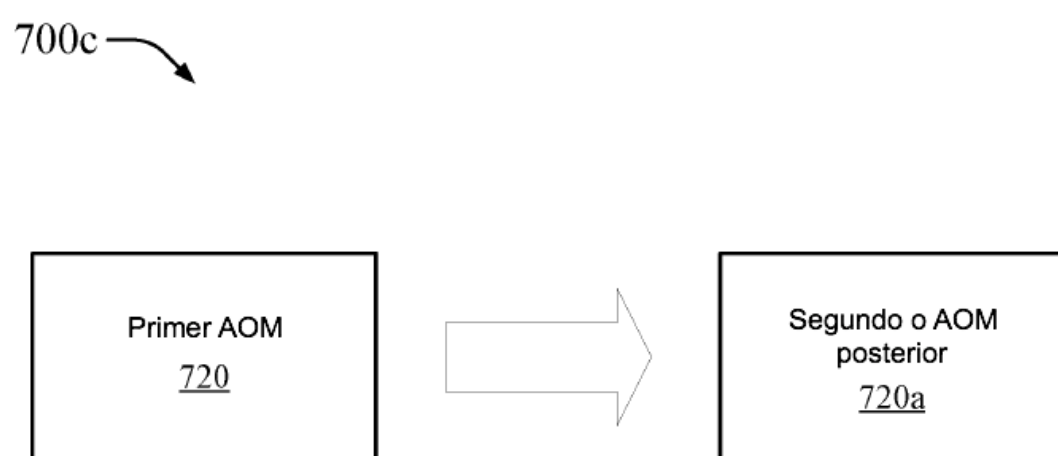


FIG. 7C

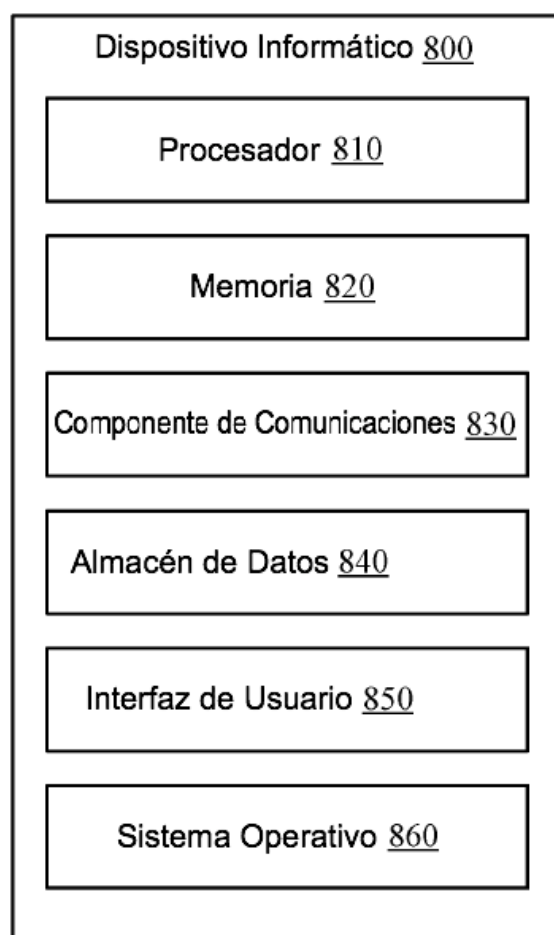
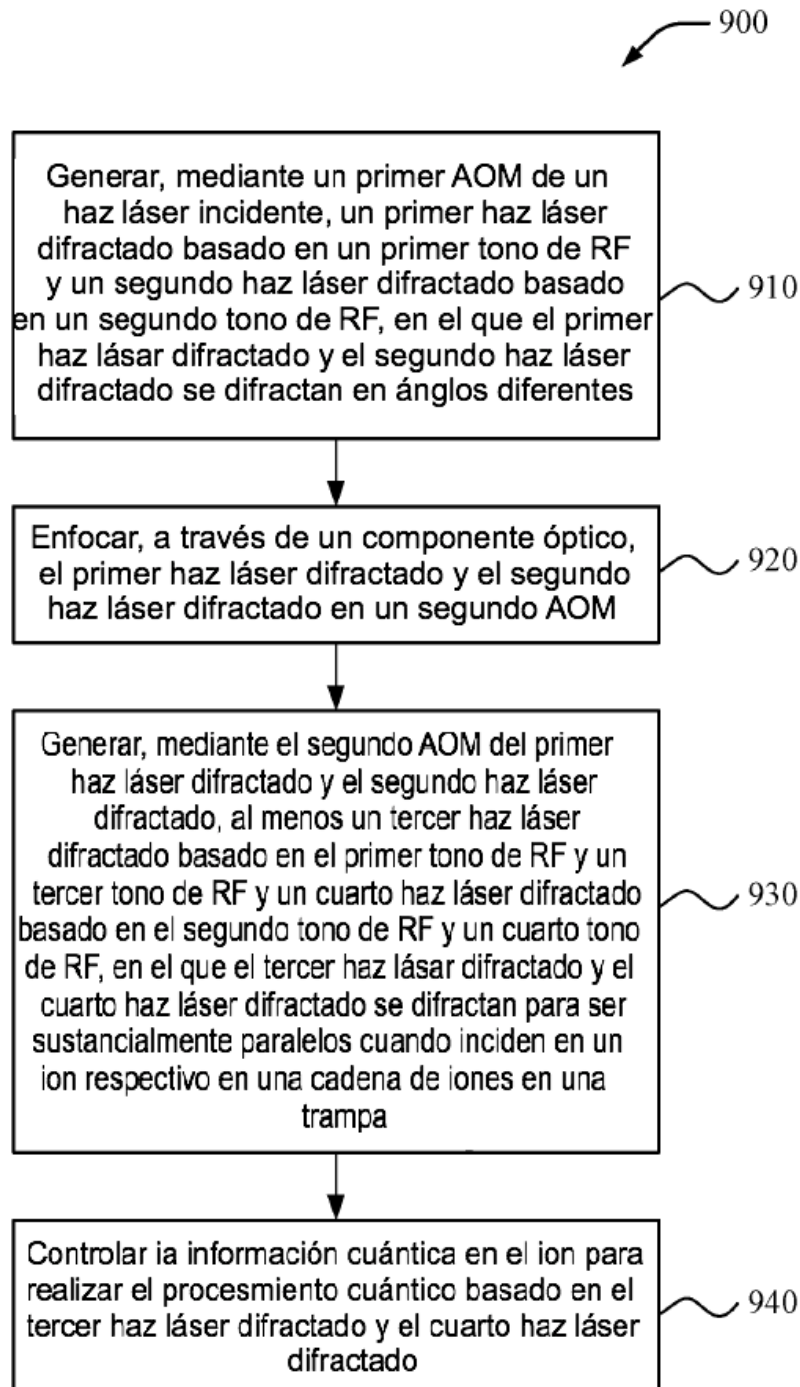
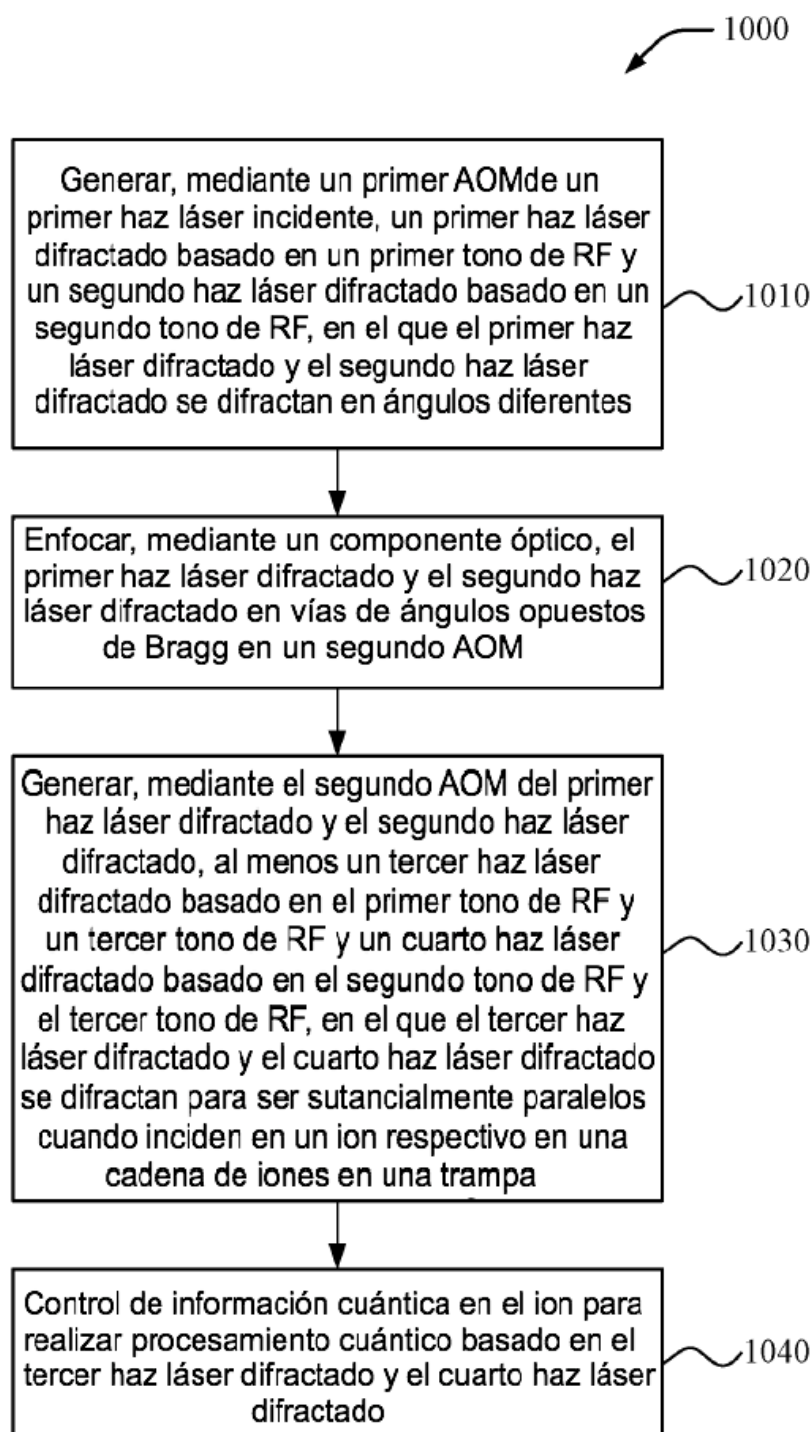


FIG. 8

**FIG. 9**

**FIG. 10**

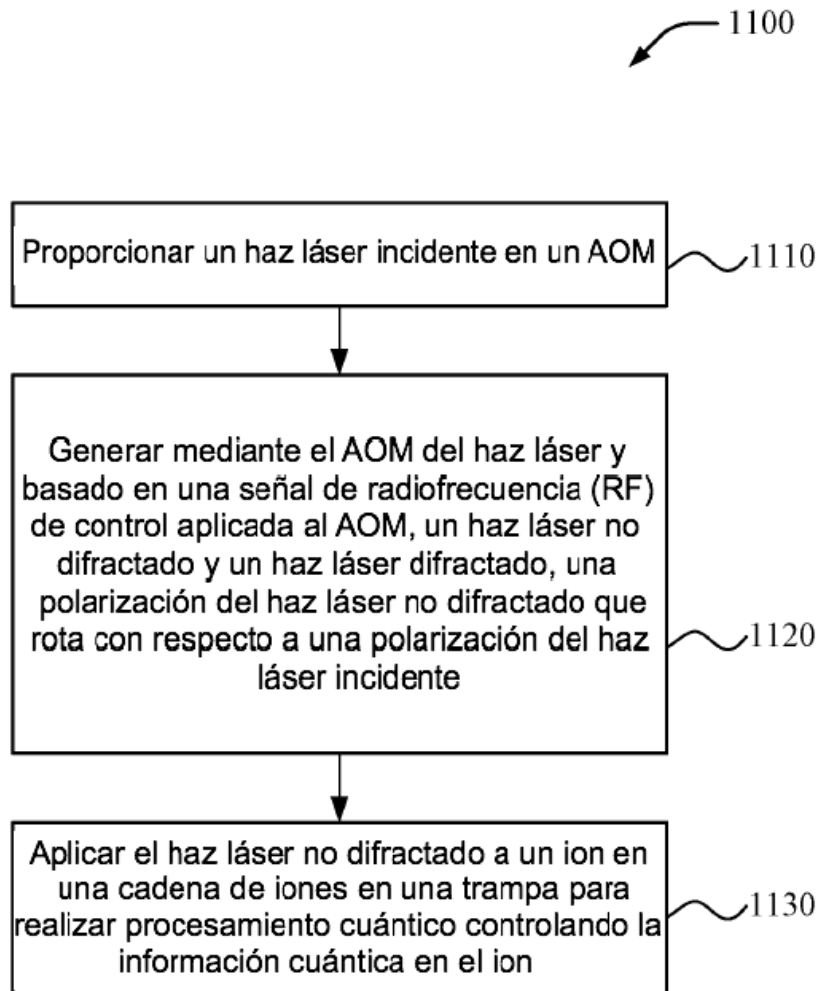


FIG. 11

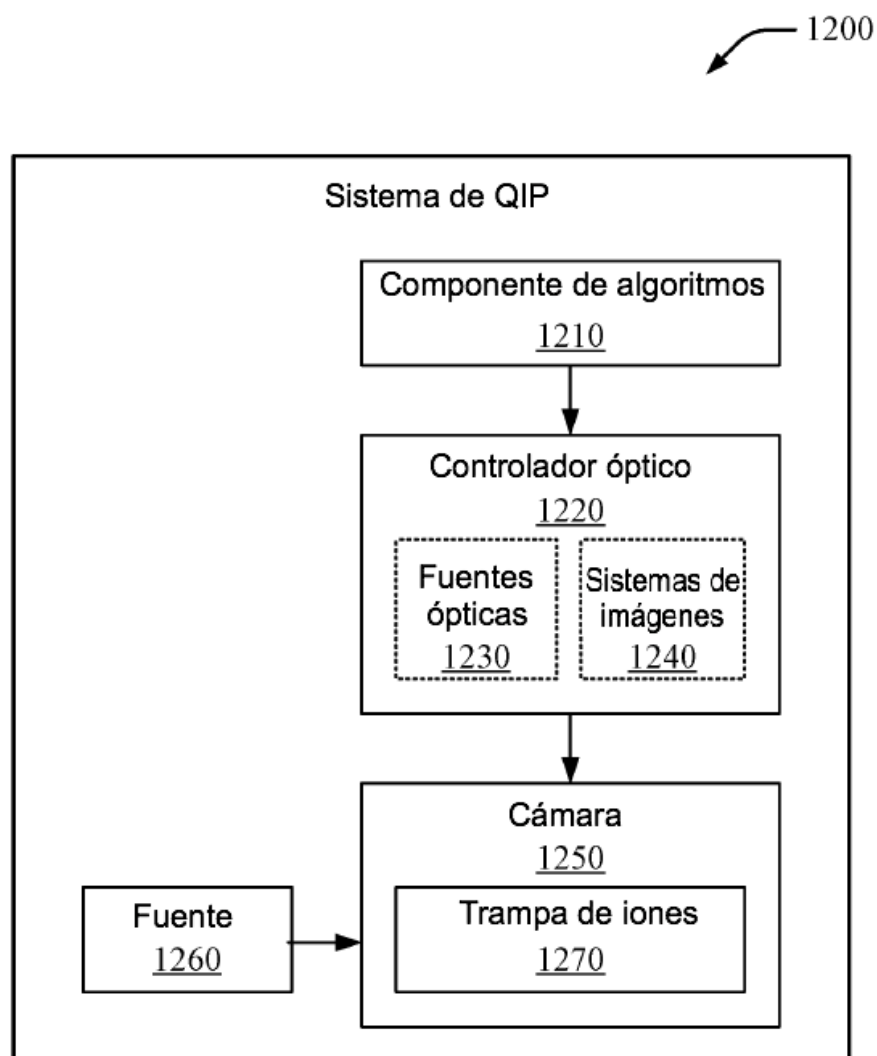


FIG. 12A

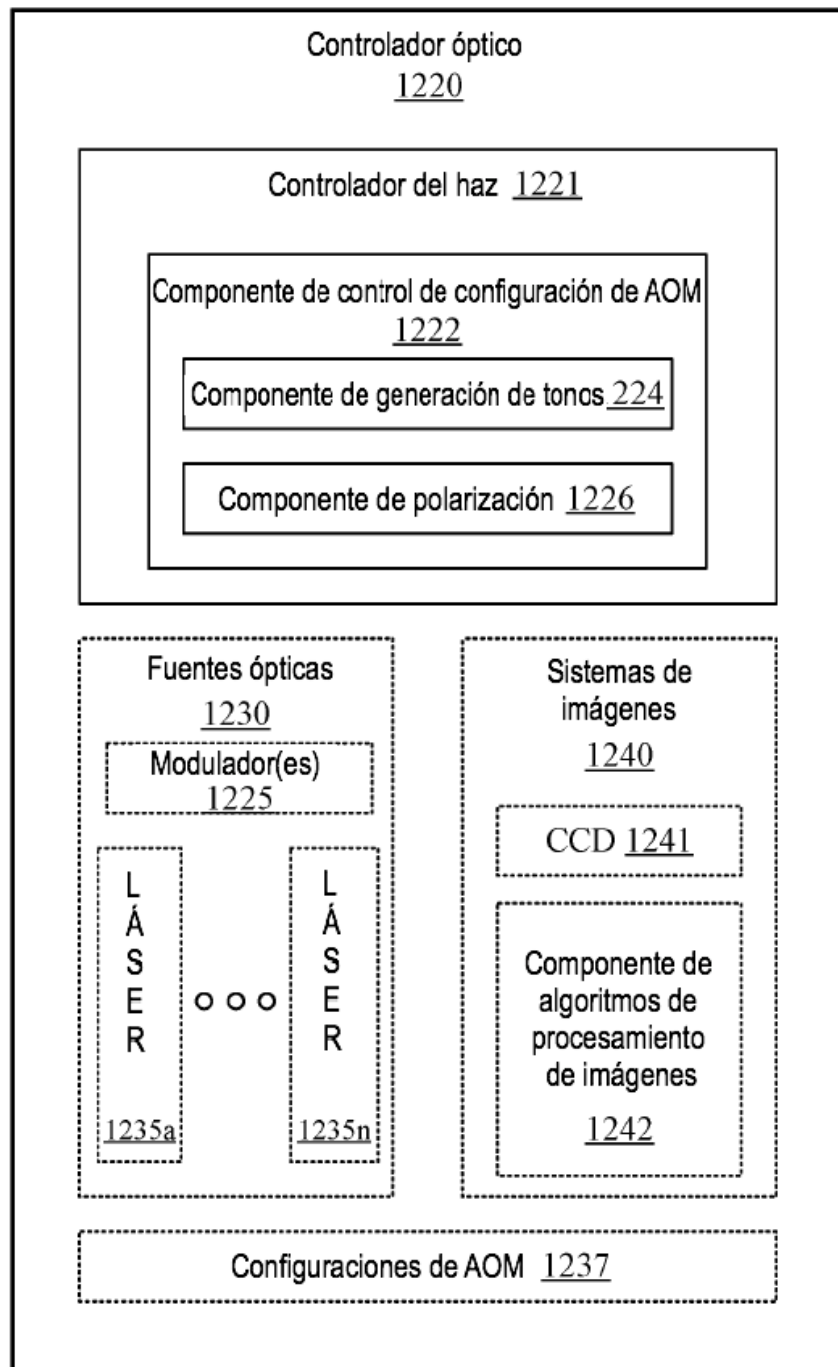


FIG. 12B