

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 966 285**

51 Int. Cl.:

G21K 1/00	(2006.01)
B82B 1/00	(2006.01)
H05H 3/00	(2006.01)
G06N 10/00	(2012.01)
H01J 49/42	(2006.01)
B81B 7/00	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.07.2018 PCT/US2018/042717**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.01.2019 WO19018544**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.07.2018 E 18835570 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.09.2023 EP 3655361**

54 Título: **Embalaje que comprende una trampa de iones y método de fabricación**

30 Prioridad:

18.07.2017 US 201762533927 P

26.03.2018 US 201815935312

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

19.04.2024

73 Titular/es:

DUKE UNIVERSITY (100.0%)

**2812 Erwin Road, Suite 406
Durham, NC 27705, US**

72 Inventor/es:

**KIM, JUNGSANG;
HUDEK, KAI;
VRIJSEN, GEERT;
SPIVEY, ROBERT y
MAUNZ, PETER**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 966 285 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

Embalaje que comprende una trampa de iones y método de fabricación

5 Declaración relativa a la investigación patrocinada bajo subvención federal

Esta invención se ha realizado con el apoyo del Gobierno bajo la subvención federal nº W911NF-10-1-0231 concedida por la Oficina de Investigación del Ejército. El Gobierno tiene ciertos derechos sobre la invención.

10 Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

Esta solicitud reclama el beneficio de la solicitud provisional estadounidense número de serie 62/533,927, presentada el 18 de julio de 2017, titulada "Embalaje UHV compacto para sistemas de iones atrapados y métodos de fabricación y uso de los mismos" (Expediente: DU5308PROV).

15 CAMPO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a los sistemas de computación cuántica en general y, más en particular, al embalaje de ultra alto vacío para contener una trampa de iones en un sistema de computación cuántica.

20 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

La computación cuántica es una tecnología emergente que aprovecha un fenómeno mecánico cuántico no disponible en los sistemas clásicos (por ejemplo, la superposición y el entrelazamiento, etc.) para procesar información. En un sistema informático convencional, la unidad básica de información es un bit, que es un elemento de dos estados que puede estar en estado "uno" o "cero". En cambio, la unidad básica de información en un sistema de computación cuántica, denominada qubit, puede estar en cualquier superposición de ambos estados al mismo tiempo (lo que se conoce como "estados de superposición"). Además, muchos qubits pueden estar en una superposición de estados correlacionados de forma que el sistema no pueda describirse como un producto de los estados individuales de los qubits (denominados "estados entrelazados"). Estas formas de estados qubit que representan la información no están disponibles en los ordenadores convencionales (clásicos). Como resultado, teóricamente, un ordenador cuántico a gran escala puede resolver algunos problemas que simplemente no son factibles en la práctica utilizando los métodos informáticos convencionales. Lamentablemente, los ordenadores cuánticos han resultado difíciles de realizar a gran escala debido a esta circunstancia.

Una vía atractiva para realizar la computación cuántica práctica es el "procesamiento de iones atrapados", que se basa en campos electromagnéticos para confinar iones atómicos en el espacio libre y en el direccionamiento óptico y la lectura de los qubits mediante uno o varios rayos láser. El procesamiento de iones atrapados se considera una tecnología potencialmente habilitadora de la computación cuántica a gran escala y del procesamiento robusto de la información cuántica (QIP). Se han propuesto y demostrado de manera satisfactoria nuevos protocolos de iones atrapados que permiten la computación cuántica escalable y la comunicación cuántica a larga distancia; sin embargo, el tamaño y la complejidad de las trampas de iones convencionales han demostrado ser un factor limitante para la forma de realización de un sistema QIP de iones atrapados práctico, a gran escala y desplegable.

45 Recientemente, los avances en las trampas microfabricadas (de superficie) han demostrado un alto rendimiento en la medición de qubits y puertas cuánticas que superan a las trampas macroscópicas convencionales montadas de manera manual. De hecho, se han demostrado trampas de superficie microfabricadas capaces de soportar potencialmente más de cien iones, con propiedades de qubit único comparables a las demostradas en trampas macroscópicas. Como resultado, se cree que dichas trampas representan un paso importante hacia la superación del reto de escalado al que se enfrenta la computación cuántica.

Lamentablemente, el uso de trampas de iones basadas en circuito integrado conlleva varios retos más, algunos intrínsecos a la tecnología de los circuitos integrados y otros simplemente derivados de la naturaleza escalable de este método.

55 Un reto importante surge del hecho de que las trampas de iones están sujetas a un calentamiento anómalo, en donde el ion experimenta un calentamiento por movimiento superior al esperado cuando quedan atrapados más cerca de la superficie de los electrodos de captura. Lo que antecede tendrá un impacto sustancial en la calidad de las puertas multi-qubit mediadas por el grado de libertad motional de los iones. Afortunadamente, estudios recientes sugieren que la limpieza *in situ* de los electrodos trampa puede disminuir prácticamente la tasa de calentamiento hasta situarla dentro de un orden de magnitud del límite de ruido térmico fundamental.

Otro reto para las trampas de iones basadas en circuito integrado es la necesidad de aislar los iones atrapados de las moléculas de gas residual de fondo. Como resultado, las trampas de iones deben funcionar a niveles de vacío extremadamente altos – normalmente a 10^{-9} Torr o mejor. Históricamente, ha sido necesaria una infraestructura

65

compleja y engorrosa para alcanzar dichos niveles de vacío. Como resultado, la escalabilidad de los sistemas de computación cuántica convencionales que emplean trampas de superficie microfabricadas sigue siendo un reto.

5 Además, una trampa de superficie microfabricada requiere una fuente de iones para cargar la trampa. Concretamente, los iones se capturan de un penacho atómico generado por una fuente, tal como un horno térmico. Lamentablemente, el calor generado por las fuentes convencionales puede interferir en el funcionamiento de la trampa de iones. Al reducir el tamaño del sistema de trampa de iones, la distancia comprendida entre la fuente y la trampa de iones se reduce, lo que agrava aún más el acoplamiento térmico entre las mismas.

10 La necesidad de un embalaje práctico para la trampa de iones que pueda soportar condiciones de alto vacío, la generación de señales de radiofrecuencia (RF) de alto voltaje, un gran número de señales de CC, permitir el acceso óptico para uno o más rayos láser para el direccionamiento/lectura de los estados de la trampa, y el funcionamiento de una fuente de flujo atómico sigue, hasta ahora, sin satisfacerse en la técnica anterior.

15 El documento US 2009/0212204 A1 da a conocer un sistema de célula de canal que tiene múltiples cámaras, de manera que una primera cámara incluye una fuente de átomos. El sistema también incluye una trampa de átomos dispuesta dentro de una segunda cámara. Se proporciona una conexión fluidica entre la primera y la segunda cámara.

20 El documento US 7.859.350 B1 da a conocer un reloj de iones microfabricado con un paquete de vacío permanentemente sellado que contiene una fuente de iones de iterbio y una trampa de iones octupolares.

SUMARIO DE LA INVENCION

25 La presente invención se expone en las reivindicaciones independientes 1 y 9. Las formas de realización preferidas se definen en las reivindicaciones dependientes.

30 La presente invención permite ordenadores cuánticos prácticos y a gran escala sin algunos de los costes y desventajas de la técnica anterior. Las formas de realización de la presente invención emplean técnicas de embalaje integrado para reducir de manera significativa el tamaño y la complejidad de los embalajes de trampas de iones necesarios para el funcionamiento de un ordenador cuántico, al tiempo que mejoran su funcionamiento reduciendo la diafonía térmica entre la trampa de iones y la fuente utilizada para cargar la trampa.

35 Al igual que los embalajes de la técnica anterior, la presente invención contiene una trampa de iones en una cámara de alto vacío formada por la unión de una carcasa unida a una superficie de un soporte de circuito integrado. En la técnica anterior, la cámara de alto vacío también contiene una fuente para proporcionar el flujo atómico utilizado para cargar la trampa. Como resultado, el calor generado por la fuente se acopla con facilidad con la trampa de iones, lo que puede interferir con el funcionamiento de la trampa.

40 En marcado contraste con la técnica anterior, las formas de realización de la presente invención separan la trampa de iones y la fuente en diferentes cámaras de alto vacío que están situadas en lados opuestos del soporte de circuito integrado. El flujo atómico generado por la fuente se propaga a través de un conducto entre las dos cámaras para permitir la carga de la trampa con iones; sin embargo, la separación de la fuente y la trampa de iones en cámaras separadas en lados opuestos del soporte de circuito integrado reduce el acoplamiento térmico entre ellas. Las formas de realización de la presente invención, por tanto, son más capaces de funcionar a temperaturas criogénicas que la técnica anterior.

45 Un embalaje con trampa de iones, según la presente invención, se define en la reivindicación 1. Las formas de realización preferidas se definen en las reivindicaciones dependientes 2 a 8.

50 En algunas formas de realización, la primera cámara está configurada para colocar una bomba de sorción getter no evaporable en las proximidades de la trampa de iones para mejorar la vida útil de la trampa.

55 En algunas formas de realización, la fuente es un horno térmico que genera el flujo atómico mediante la sublimación del material de la fuente.

En algunas formas de realización, la fuente es un horno de ablación que comprende un láser de ablación y un crisol para contener el material fuente. El láser de ablación y el crisol están dispuestos de tal manera que la salida del láser puede ablacionar el material fuente para generar el flujo atómico.

60 En algunas formas de realización, la bomba de criosorción se sustituye por una bomba de iones.

Un método, según la presente invención, se define en la reivindicación 9. Las formas de realización preferidas se definen en las reivindicaciones dependientes 10 a 13.

65 BREVE DESCRIPCION DE LOS DIBUJOS

La Figura 1A muestra un dibujo esquemático de una vista en sección transversal de un embalaje con trampa de iones de conformidad con la técnica anterior.

5 La Figura 1B muestra una fotografía de una vista en perspectiva de un embalaje con trampa de iones incipiente de conformidad con el técnica anterior.

La Figura 1C muestra una fotografía de una vista en perspectiva de un embalaje con trampa de iones conforme a la técnica anterior.

10 La Figura 2 muestra un dibujo esquemático de una vista en sección transversal de un embalaje con trampa de iones de conformidad con una forma de realización ilustrativa de la presente invención.

La Figura 3 representa una parte de las operaciones de un método adecuado para formar el embalaje 200 de conformidad con la forma de realización ilustrativa de la presente invención.

15 Las Figuras 4A-D representan características destacadas del embalaje 200 en diferentes puntos de su fabricación.

La Figura 5 representa un dibujo esquemático de un sistema de procesamiento UHV, a modo de ejemplo, adecuado para su uso con el método 300.

20 La Figura 6 representa un dibujo esquemático de una parte de un embalaje multicámara para facilitar el funcionamiento a temperaturas criogénicas de conformidad con una primera forma de realización alternativa de la presente invención.

25 La Figura 7 representa un dibujo esquemático de una sección transversal de las características más destacadas de un embalaje de conformidad con una segunda forma de realización alternativa de la presente invención.

La Figura 8 representa un dibujo esquemático de una vista en sección de las características más destacadas de un embalaje de conformidad con una tercera forma de realización alternativa de la presente invención.

30 DESCRIPCIÓN DETALLADA

La Figura 1A representa un dibujo esquemático de una vista en sección transversal de un embalaje con trampa de iones de conformidad con la técnica anterior. El embalaje 100 incluye el soporte de circuito integrado 102, la trampa de iones 104, la carcasa 106, la junta 108, la bomba de criosorción 110 y la fuente 112, todos ellos contenidos en una única cámara. La carcasa 100 es análoga a las carcasas de trampas de iones conocidas en la técnica anterior, tal como las descritas por Brown, et al., en "Co-diseño de un ordenador cuántico escalable con iones atómicos atrapados", arXiv:1602.02840v1 [quant-ph], (2016).

40 La trampa de iones 104 está fijada a la superficie 114 del soporte de circuito integrado 102, que es un embalaje con trampa de iones cerámico convencional, por ejemplo, un conjunto de rejilla de pines cerámicos (CPGA).

45 La trampa de iones 104 es una trampa de superficie microfabricada convencional que incluye una pluralidad de electrodos 130 de alto voltaje y/o RF, que se forman en una disposición precisa en la superficie superior del sustrato 132 (por ejemplo, una oblea de silicio, un sustrato de vidrio, etc.). La trampa de iones 104 está configurada de manera que los rayos láser de alta potencia puedan acceder a las zonas cercanas a las superficies de los electrodos para efectuar compuertas de Coulomb y/o acoplamientos fotónicos sin incurrir en una dispersión significativa de la luz. Ejemplos de trampas de iones microfabricadas se dan a conocer por Stick, et al., en "Trampa de iones en un circuito integrado de semiconductores", Nature Physics, Vol. 2, págs. 36-39 (2006).

50 Una vez que la trampa de iones 104 está fijada al soporte de circuito integrado, los electrodos 130 se conectan eléctricamente a los cables eléctricos 120 del soporte de circuito integrado 102 mediante uniones de alambre 122. En algunos casos, el soporte de circuito integrado 102 incluye protuberancias de soldadura adecuadas para la unión convencional de protuberancias de soldadura que están dispuestas sobre su superficie inferior, en lugar de cables eléctricos 120.

55 La Figura 1B muestra una fotografía de una vista en perspectiva de un embalaje con trampa de iones incipiente de conformidad con la técnica anterior. La Figura 1B muestra el embalaje 100 después de que la trampa de iones 104 haya sido montada en un intercalador opcional situado en el soporte de circuito integrado 102.

60 Para formar la cámara 116, la carcasa 106 se une a la superficie 114 del soporte de circuito integrado 102 a través de la junta 108. La carcasa es concretamente una estructura mecánicamente rígida que comprende una cavidad central, en donde la estructura está configurada para soportar niveles de vacío de al menos 10^{-10} Torr en su interior. La carcasa 106 incluye ventanas 118-1 a 118-3, que permiten el acceso óptico de una o más señales luminosas necesarias para el funcionamiento de la trampa de iones. Las ventanas se fijan sobre los orificios pasantes de la carcasa 106 mediante una tecnología de sellado adecuada para realizar un cierre hermético al vacío.

65

La junta 108 es concretamente un anillo de indio que rodea el circuito integrado de la trampa de iones. Con la carcasa colocada en el soporte de circuito integrado, y concretamente mientras se encuentra en un entorno de alto vacío para establecer un estado de vacío inicial dentro de la cámara 116, el indio se funde para formar una junta hermética al vacío entre ellos que favorezca el mantenimiento de un entorno de vacío dentro de la cámara 116.

5 La Figura 1C muestra una fotografía de una vista en perspectiva de un embalaje con trampa de iones de conformidad con la técnica anterior.

10 Antes de que la carcasa 106 se fije al soporte de circuito integrado, la bomba de criosorción 110 y la fuente 112 se montan dentro de la carcasa para que queden correctamente colocadas dentro de la cámara sellada 116 cuando la carcasa 100 esté completa.

15 La fuente 112 es un horno térmico operativo para sublimar el material 124 y generar el penacho atómico 126, que incluye el flujo atómico 128. En funcionamiento, la fuente 112 carga la trampa de iones 104 calentando el material 124 para generar el penacho atómico 126, una parte del cual es flujo atómico 128, que se propaga en forma de línea de visión hacia la trampa de iones 104. Concretamente, el material 124 incluye iterbio; sin embargo, en algunas aplicaciones de la técnica anterior también se utilizan otros materiales, tales como berilio, magnesio, estroncio, calcio y similares.

20 La bomba de criosorción 110 es concretamente una bomba de sorción de carbón que funciona para eliminar moléculas inertes, tales como el helio, del entorno dentro del embalaje durante la operación criogénica.

25 Aunque el embalaje 100 es un ejemplo de un entorno de pequeño volumen y alto vacío para una trampa de iones, la ubicación conjunta de la trampa de iones 104 y de la fuente 112 dentro de una única cámara no es conveniente en la práctica. Concretamente, al sublimar el material 124, la fuente 112 genera un calor importante (de hasta varios cientos de grados centígrados), que puede interferir con las operaciones de captura de iones. Esto es particularmente inconveniente para embalajes en los que se desea un funcionamiento criogénico, tal como el ejemplo representado en donde se utiliza una bomba de criosorción para reducir el contenido de helio en la cámara 116.

30 Sin embargo, un aspecto de la presente invención es que se puede mejorar el funcionamiento de la trampa de iones situando la fuente 112 y la trampa de iones 104 en cámaras separadas, preferiblemente situadas en lados opuestos de un soporte de circuito integrado. Dicha disposición proporciona un nivel de aislamiento térmico entre la fuente y la trampa de iones que mitiga los efectos del calor generado durante el funcionamiento de la fuente 112.

35 La Figura 2 representa un dibujo esquemático de una vista en sección transversal de un embalaje con trampa de iones de conformidad con una forma de realización ilustrativa de la presente invención. El embalaje 200 incluye las cámaras 202-1 y 202-2, el conducto 204, la trampa de iones 206, el soporte de circuito integrado 208, la bomba de sorción getter 218 y la bomba de criosorción 110.

40 Las cámaras 202-1 y 202-2 son cámaras separadas situadas en lados opuestos del soporte de circuito integrado 208.

45 La cámara 202-1 es análoga a la cámara 116. La cámara 202-1 contiene la trampa de iones 206 y la bomba de sorción getter 218, pero excluye la fuente 112. La cámara 202-1 está definida por el soporte de circuito integrado 208 y la carcasa 210-1, que está unida a la superficie 212 del soporte de circuito integrado en la junta 216-1.

La cámara 202-2 también es análoga a la cámara 116. La cámara 202-2 contiene la fuente 112 y la bomba de criosorción 110, pero excluye la trampa de iones 206. La cámara 202-2 está definida por el soporte de circuito integrado 208 y la carcasa 210-2, que está unida a la superficie 214 del soporte de circuito integrado 208 en la junta 216-2.

50 Las cámaras 202-1 y 202-2 están situadas en lados opuestos del soporte de circuito integrado 208 para mitigar el acoplamiento térmico entre la fuente y la trampa de iones. Para permitir que el flujo atómico 128 fluya desde la fuente 112 hasta la trampa de iones 206, las cámaras 202-1 y 202-2 están acopladas de forma fluidica a través del conducto 204. Tal como se describirá más adelante, el conducto 204 incluye puertos pasantes formados en cada uno de entre el soporte de circuito integrado 208, el intercaldador 220 y el sustrato 132 de la trampa de iones 206.

55 La Figura 3 representa una parte de las operaciones de un método adecuado para formar el embalaje 200 de conformidad con la forma de realización ilustrativa de la presente invención. El método 300 comienza con la operación 301, en donde la trampa de iones 206 se sitúa en el soporte de circuito integrado 208. El método 300 se describe con referencia continua a las Figuras 2A-B, así como con referencia a las Figuras 4A-C.

60 Las Figuras 4A-D representan vistas de características destacadas del embalaje 200 en diferentes puntos de su fabricación.

65 La Figura 4A representa un dibujo esquemático de una vista en sección transversal del embalaje incipiente 200 que muestra la trampa de iones 206 dispuesta sobre el soporte de circuito integrado 208.

El soporte de circuito integrado 208 es análogo al soporte de circuito integrado 102 descrito con anterioridad; sin embargo, el soporte de circuito integrado 208 incluye el puerto 402 y las juntas 216-1 y 216-2.

5 Las juntas 216-1 y 216-2 son trazas metálicas formadas en las superficies 212 y 214, respectivamente. En el ejemplo representado, las juntas 216-1 y 216-2 son trazas anulares que incluyen capas de oro y estaño adecuadas para formar una unión eutéctica oro-estaño para unir el soporte de circuito integrado con cada una de las carcasa 210-1 y 210-2. En algunas formas de realización alternativas, al menos una de las juntas incluye un material diferente adecuado para unir el soporte de circuito integrado y una carcasa.

10 El puerto 402 es una abertura que se extiende a través del espesor del soporte de circuito integrado 208 dentro de una zona de unión configurada para recibir la trampa de iones 206.

15 La trampa de iones 206 está dispuesta en el soporte de circuito integrado de tal manera que el sustrato 132 resida en el interpositor opcional 220, que está dispuesto sobre la superficie 212 del soporte de circuito integrado 208. A los efectos de esta especificación, incluidas las reivindicaciones adjuntas, el término "dispuesto sobre" se define como "existe en" una capa o estructura subyacente. En el espacio intermedio entre el elemento y la estructura sobre la que está dispuesto pueden existir capas o estructuras intermedias, tales como capas de transición, intercaladores, etc., según sea necesario para garantizar una superficie/disposición adecuada. Por ejemplo, si se describe que un elemento está "dispuesto sobre un sustrato", esto puede significar que (1) el material del elemento está en contacto íntimo con el sustrato; o (2) el material del elemento está en contacto con una o más capas/estructuras de transición que están dispuestas sobre el sustrato.

20 La Figura 4B muestra un dibujo esquemático de una vista superior de la trampa de iones 206. La trampa de iones 206 incluye el sustrato 132, los electrodos 130, el puerto 404 y las almohadillas de unión por alambre 410.

25 Los electrodos 130 incluyen matrices de electrodos 130A y 130B, cuyas caras extremas se oponen entre sí a través del espacio g.

30 El puerto 404 es un orificio pasante que se extiende a través del espesor del sustrato 132 dentro de la zona del espacio g. Tal como se describe más adelante, el puerto 404 forma parte del conducto 204 una vez que la trampa de iones 206 está dispuesta en el soporte de circuito integrado 208.

35 Las almohadillas de unión de alambre 410 son almohadillas de unión de alambre convencionales que están dispuestas a lo largo de los bordes exteriores del sustrato 132. Las almohadillas de unión por alambre 410 están conectadas eléctricamente a los electrodos 130.

40 El intercalador 220 es un intercalador de circuitos integrados convencional que incluye el puerto 406, que se extiende a través de su espesor. El intercalador 220 se incluye para fijar la altura de la trampa de iones por encima del soporte de circuito integrado de forma que los electrodos 130 estén próximos al eje A1, que se extiende entre las ventanas 118-2 y 118-3.

45 La trampa de iones 206, el intercalador 220 y el soporte de circuito integrado 208 están dispuestos de tal manera que al menos partes de los puertos 402, 404 y 406 se solapan para definir de manera conjunta el conducto 204. Como resultado, ambas cámaras pueden bombearse con el mismo sistema de bombeo y la salida de la fuente 112 puede propagarse a través del conjunto de trampa de iones/interpositor/soporte de circuito integrado.

50 Una vez que la trampa de iones 206 está dispuesta sobre el soporte de circuito integrado 208, se realizan uniones de alambre entre las almohadillas de unión de alambre 410 (así como las almohadillas de unión de alambre conectadas con cualquier electrónica adicional incluida dentro del embalaje 200) y las almohadillas de unión de alambre 408, que están conectadas eléctricamente a los cables eléctricos 120.

En algunas formas de realización, la trampa de iones 206 está dispuesta directamente en la superficie 212 del soporte de circuito integrado sin la inclusión de un intercalador.

55 En la operación 302, la cámara 202-2 se forma uniendo la carcasa 210-2 a la superficie 214 del soporte de circuito integrado 208 a través de la junta 216-2.

60 La Figura 4C muestra un dibujo esquemático de una vista en sección transversal del embalaje 200 después de que la carcasa 210-2 y el soporte de circuito integrado 208 se hayan unido para formar la cámara 202-2.

65 La carcasa 210-2 es una estructura mecánicamente rígida que comprende una cavidad central. La carcasa 210-2 está configurada para soportar niveles de vacío de 10^{-9} Torr o inferiores en su interior. En el ejemplo representado, la carcasa 210-2 está compuesta de titanio; sin embargo, en la carcasa 210-2 puede utilizarse cualquier material que tenga suficiente resistencia y estabilidad dimensional.

La fuente 112 está situada en la superficie de fondo interior de la carcasa 210-2 de tal manera que está alineada a lo largo del eje A1, que está centrado con la trampa de iones 206. Preferentemente, la fuente 112 está situada de tal manera que es concéntrica con la trampa de iones 206 a lo largo del eje A1; sin embargo, pueden utilizarse otras disposiciones de la fuente y la trampa de iones sin desviarse del alcance de la presente invención.

5 La disposición de la fuente 112 y la trampa de iones 206 da lugar a que el flujo atómico 128 se dirija a la trampa de iones desde su parte posterior (es decir, el sustrato) a través del conducto 204.

10 Conviene señalar que la carcasa 210-2 está configurada de tal manera que esté dispuesta dentro de una zona abierta entre los cables eléctricos 120, que proporcionan toda la conectividad eléctrica a los elementos del embalaje 200. Dicha configuración simplifica la obtención y el mantenimiento de un alto nivel de vacío dentro de la carcasa al evitar los pasantes eléctricos que pueden dar lugar a fugas. Además, llevar las señales eléctricas dentro y fuera de la carcasa a través del soporte de circuito integrado evita la necesidad de cableado adicional dentro de la carcasa y permite el uso de placas de circuito integrado convencionales y circuitos integrados para la electrónica de alta densidad (no mostrada) necesaria para el funcionamiento de la trampa de iones.

En la operación 303, el embalaje incipiente 200 se coloca en un sistema de procesamiento de vacío ultra-alto (UHV) que permite realizar operaciones de procesamiento adicionales mientras el embalaje incipiente está al vacío.

20 La Figura 5 representa un dibujo esquemático de un sistema de procesamiento UHV, a modo de ejemplo, adecuado para su uso con el método 300.

25 El sistema de procesamiento 500 incluye el cierre de carga convencional 502, la etapa de estacionamiento de muestras 504, el subsistema de tratamiento superficial y análisis 506, el subsistema de empaquetado 508, el subsistema de deposición 510 y el subsistema de carro 512.

30 El subsistema de tratamiento y análisis de superficies 506 es un subsistema para modificar una o varias superficies de una carcasa y/o de un conjunto de trampa de iones/soporte de circuito integrado a una presión base de 10^{-9} Torr o inferior, así como para la caracterización de la superficie o superficies modificadas, antes de sellar completamente el embalaje completado. En el ejemplo representado, el subsistema de tratamiento y análisis 506 de superficies incluye una pistola de pulverización catódica de iones de argón y una herramienta de espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS). En algunas formas de realización, en el subsistema de tratamiento y análisis 506 de superficies se incluye una herramienta diferente de tratamiento de superficies y/o una herramienta de análisis de superficies (por ejemplo, herramientas de espectroscopia Auger, de sonda Kelvin, etc.).

35 El subsistema de empaquetado 508 es un subsistema para formar sellos estancos al vacío entre las cámaras del embalaje 200 a una presión base de aproximadamente 10^{-9} Torr o inferior. En el ejemplo representado, el subsistema de empaquetado 508 incluye un calentador de grafito configurado para tratar una carcasa y/o un conjunto de trampa de iones/soporte de circuito integrado a una temperatura adecuada para formar las juntas 216-1 y 216-2, que, en algunas formas de realización, pueden requerir temperaturas de hasta 1200 °C. También es operativo para alinear y apilar la carcasa y el soporte de circuito integrado juntos en un proceso de autoalineación habilitado por estructuras mecánicas de guiado. El subsistema de empaquetado 508 también permite el recocido de las superficies de la trampa y el sellado in situ de una o más ventanas incluidas de manera opcional en la carcasa.

45 El subsistema de deposición 510 es un sistema de pulverización catódica convencional configurado para pulverizar una o varias superficies del embalaje 200 mientras se mantiene a una presión base de 10^{-9} Torr o inferior. En algunas formas de realización, el subsistema de deposición 510 incluye un sistema de deposición de material diferente, tal como un sistema de evaporación (por ejemplo, un sistema de evaporación térmica, un sistema de evaporación por haz de electrones, etc.), un sistema de deposición química (por ejemplo, deposición química en fase de vapor mejorada por plasma (PECVD), deposición química en fase de vapor a baja presión (LPCVD), etc.), un sistema de deposición de capas atómicas (ALD), y similares.

50 El subsistema de carro 512 permite el transporte de un embalaje incipiente a través de todo el sistema de proceso mientras se mantiene a una presión base de 10^{-9} Torr o inferior.

55 En la operación 304, la superficie de la trampa de iones 206 se trata para mitigar el calentamiento anómalo experimentado por los iones en la trampa durante su funcionamiento. El tratamiento de la superficie de la trampa de iones incluye la pulverización catódica mediante el sistema de pulverización catódica de iones de argón en el subsistema de tratamiento y análisis 506 de superficies mientras el embalaje incipiente 200 se mantiene en condiciones de alto vacío. En algunas formas de realización, la superficie de la trampa de iones se trata con un tratamiento diferente adecuado para lograr una condición superficial deseada.

En la operación 305, el embalaje incipiente se calienta para activar la bomba de criosorción 110.

65 En la operación 306, se forma la cámara 202-1 uniendo la carcasa 210-1 a la superficie 212 del soporte de circuito integrado 208 a través de la junta 216-1. Al formar la cámara 202-1 mientras el embalaje incipiente se mantiene en

una condición de alto vacío dentro del sistema 500, se proporciona a la cámara 202-1 un estado de vacío inicial igual al del sistema 500, que suele ser de aproximadamente 10^{-9} Torr o inferior.

5 La Figura 4D muestra un dibujo esquemático de una vista en sección transversal del embalaje 200 después de que la carcasa 210-1 y el soporte de circuito integrado 208 se unan para formar la cámara 202-1.

10 La carcasa 210-1 es análoga a la carcasa 106; sin embargo, la carcasa 210-1 también comprende el escudo 222. Al igual que la carcasa 106, la carcasa 210-1 incluye las ventanas 118-1 a 118-3, que proporcionan acceso óptico a la trampa de iones para las señales luminosas utilizadas para controlar ópticamente los qubits durante el funcionamiento de la trampa de iones 206. En algunas formas de realización, la carcasa 210-1 se une al soporte de circuito integrado 208 antes de la colocación y sellado de una o más de sus ventanas. En dichos casos, las ventanas también se instalan y sellan mientras el embalaje incipiente 200 se encuentra dispuesto bajo condiciones de alto vacío dentro del sistema 500.

15 Tal como se ha descrito con anterioridad, la altura de la trampa de iones 206 por encima del soporte de circuito integrado 208 se establece (mediante el intercalador 220) para colocar la trampa de iones adyacente al eje A2, que discurre desde las ventanas 118-2 y 118-3, paralelamente a la superficie de la trampa de iones 206. Como resultado, cuando la señal luminosa 224 se suministra a lo largo del eje A2 para fotoionizar átomos en el flujo atómico 128, su dirección de propagación es ortogonal al flujo de estos átomos a lo largo del eje A1, lo que mitiga el desplazamiento/ampliación Doppler asociado a la velocidad del flujo atómico.

20 La bomba de sorción getter 218 es una bomba de sorción getter no evaporable (NEG), que está dispuesta sobre la superficie 226 del escudo 222. El escudo 222 está configurado para colocar la bomba de sorción getter 218 en la proximidad de la superficie de la trampa de iones 206 después de que la carcasa 210-1 se una con el soporte de circuito integrado 208. Al disponer la bomba de sorción getter 218 de forma que quede cerca de la superficie de la trampa de iones 206, se mejora la vida útil de la trampa.

25 En algunas formas de realización, la bomba de sorción getter 218 se dispone sobre un soporte separado que se une al soporte de circuito integrado 208 antes de la adición de la carcasa 210-1. Dichas formas de realización ofrecen la ventaja de que la separación de la bomba de sorción getter puede controlarse independientemente de la configuración de la carcasa 210-1 y de la colocación de sus ventanas.

30 Conviene señalar que cualquiera de las bombas de criosorción 110 y la bomba de sorción getter 218, o ambas, pueden ubicarse en la cámara 202-1 sin desviarse por ello del alcance de la presente invención.

35 Además, las operaciones del método 300 pueden realizarse en cualquier orden -por ejemplo, la cámara 202-1 puede formarse antes que la cámara 202-2, etc.

40 Aunque ubicar la trampa de iones 206 y la fuente 112 en cámaras diferentes reduce los efectos nocivos del calor generado durante la sublimación del material 124, en algunas formas de realización (por ejemplo, cuando es necesario un funcionamiento criogénico) se requiere una estabilidad térmica adicional. Como resultado, en algunas formas de realización de la presente invención, el penacho atómico 126 se proporciona por ablación láser del material 124 en lugar de por sublimación térmica.

45 La Figura 6 representa un dibujo esquemático de una parte de un embalaje multicámara para facilitar el funcionamiento a temperaturas criogénicas de conformidad con una primera forma de realización alternativa de la presente invención. El embalaje 600 es análogo al embalaje 200; sin embargo, el embalaje 600 incluye un horno de ablación para generar un flujo atómico. Como resultado, se genera de manera significativa menos calor durante la producción del penacho atómico.

50 La fuente 602 es un horno de ablación que comprende un crisol 604 y un láser 606. La fuente 602 genera un penacho atómico que incluye el flujo atómico 610 irradiando el material 124 con el haz de ablación 608, que se dirige al embalaje 600 a través de la ventana 118-1, de manera que el haz se propague a lo largo del eje A1. Como resultado, el haz de ablación 608 atraviesa el conducto 206 en su camino hacia el material 124.

55 El crisol 604 es un crisol convencional para contener el material 124. En algunas formas de realización, el crisol 604 está incorporado en la carcasa 210-1.

60 La fuente 602 está configurada para crear un flujo atómico 610 tal que incluya de manera predominante átomos neutros. Por lo tanto, para cargar la trampa de iones 206, estos átomos neutros deben ionizarse. Según la invención, el embalaje 600 incluye el láser 612, que es una fuente resonante que proporciona el haz láser 614 a lo largo del eje A2 para fotoionizar los átomos neutros en el flujo atómico 610 a fin de crear iones adecuados para el atrapamiento. Tal como se ha descrito con anterioridad, preferiblemente, los ejes A1 y A2 son ortogonales para mitigar el desplazamiento/ampliación Doppler asociado a la velocidad del flujo atómico.

65

Un experto en esta técnica reconocerá, tras proceder a la lectura de esta especificación, que la anchura del espacio g es concretamente bastante estrecha. En consecuencia, la anchura del puerto 404 de la trampa de iones 206 es también muy estrecha. En consecuencia, es posible que se produzcan ablaciones/daños en la trampa de iones cuando el haz de ablación 608 pase por el puerto 404. En algunas formas de realización, por lo tanto, el haz de ablación se encamina de manera que no pase a través de la trampa de iones para mitigar el riesgo de daños a la trampa de iones.

La Figura 7 representa un dibujo esquemático de una sección transversal de las características más destacadas de un embalaje de conformidad con una segunda forma de realización alternativa de la presente invención. El embalaje 700 es análogo al embalaje 600; sin embargo, el embalaje 700 incluye un horno de ablación que tiene un haz de ablación que se dirige al material 124 sin pasar por la trampa de iones 206. El embalaje 700 incluye las cámaras 202-1 y 702, el conducto 204, la trampa de iones 206, el soporte de circuito integrado 208, la bomba de sorción getter 218 (no mostrada), la bomba de criosorción 110 y la fuente 704.

La cámara 702 está definida por la carcasa 706 y la superficie 214 del soporte de circuito integrado 208, que están unidas en la junta 216-2, tal como se ha descrito con anterioridad.

La fuente 704 incluye el láser 606, el crisol 708 y el espejo giratorio 710. Como en la carcasa 600, el láser 606 está situado fuera de la carcasa 706.

La carcasa 706 es análoga a la carcasa 106 descrita con anterioridad y con respecto a la Figura 1. La carcasa 706 incluye la ventana 118, que está configurada para permitir el acceso óptico al material 124 para el láser 606.

El crisol 708 es análogo al crisol 604; sin embargo, el crisol 708 está configurado para montar el espejo giratorio 710, así como para admitir la trayectoria óptica del haz de ablación 608 a medida que se recibe desde el espejo giratorio. En respuesta a la recepción del haz de ablación 608, el crisol 708 da lugar a un penacho atómico que incluye el flujo atómico 610, que se dirige a lo largo del eje A1, tal como se ha descrito con anterioridad.

El espejo giratorio 710 es un reflector convencional de primera superficie que está dispuesto para reflejar el haz de ablación 608 del láser 606 hacia el material 124.

La fuente 704 y la carcasa 706 están configuradas para permitir la trayectoria óptica 712 desde el láser 606 hasta el material 124 sin hacer pasar el haz de ablación 608 a través de la trampa de iones 206.

En algunas formas de realización, el funcionamiento criogénico no es crítico. En dichas formas de realización, la bomba de criosorción 110 puede sustituirse por una bomba de iones en miniatura.

La Figura 8 representa un dibujo esquemático de una vista en sección de las características más destacadas de un embalaje de conformidad con una tercera forma de realización alternativa de la presente invención. El embalaje 800 es análogo al embalaje 200; sin embargo, en el embalaje 800 la bomba de criosorción se sustituye por una bomba de iones.

El embalaje 800 incluye las cámaras 202-1 y 802, el conducto 204, la trampa de iones 206, el soporte de circuito integrado 208, la bomba de sorción getter 218 (no mostrada), la fuente 112 y la bomba de iones 804.

La cámara 802 es análoga a la cámara 202-2; sin embargo, la cámara 802 incluye las subcámaras 808-1 y 808-2, que están acopladas de forma fluidica. La fuente 112 está contenida en la subcámara 808-1, mientras que la bomba de iones 804 está contenida en la subcámara 808-2. La cámara 802 está definida por la carcasa 806 y la superficie 214, que están unidas en la junta 216-2, tal como se ha descrito con anterioridad.

Conviene señalar que, aunque la carcasa 800 incluye una fuente que comprende un horno térmico, pueden utilizarse otros hornos (por ejemplo, un horno de ablación) en la fuente 112 sin desviarse por ello del alcance de la presente invención.

Conviene señalar que la invención describe solamente algunos ejemplos de formas de realización de conformidad con la presente invención y que los expertos en esta técnica pueden idear fácilmente muchas variaciones de la invención después de proceder a la lectura de esta descripción y que el alcance de la presente invención debe determinarse por las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Un embalaje con trampa de iones (200) que comprende:
 - 5 un soporte de circuito integrado (208) que tiene una primera superficie principal (212) y una segunda superficie principal (214) que es distal de la primera superficie principal;

una trampa de iones (206), en donde la trampa de iones está dispuesta sobre un sustrato (132) que está dispuesto sobre la primera superficie principal;

10 una fuente (112) que es operativa para proporcionar un flujo atómico (128) a la trampa de iones, comprendiendo el flujo atómico átomos de un primer material (124);

una primera carcasa (210-1), en donde la primera carcasa y la primera superficie principal están unidas por una primera junta (216-1) de manera que la primera carcasa y la primera superficie principal definan, de manera conjunta, una primera cámara (202-1) que contiene la trampa de iones, en donde la primera carcasa incluye una primera ventana (118-2) que permite el acoplamiento óptico entre la trampa de iones y una primera señal luminosa (614) que funciona para cargar la trampa de iones mediante la fotoionización de átomos neutros del primer material en el flujo atómico; y

15 una segunda carcasa (210-2), estando la segunda carcasa y la segunda superficie principal unidas en una segunda junta (216-2) de tal manera que la segunda carcasa y la segunda superficie principal definan, de manera conjunta, una segunda cámara (202-2) que contiene la fuente;

20 en donde la primera cámara y la segunda cámara están acopladas de forma fluidica.
 - 25 2. El embalaje con trampa de iones según la reivindicación 2, en donde la fuente incluye un horno de ablación (602) que es operativo para generar el flujo atómico a través de la ablación por láser de un primer material, y en donde la primera carcasa, la trampa de iones y el soporte de circuito integrado están configurados para permitir el acoplamiento óptico entre el primer material y una segunda señal luminosa (608) que es operativa para la ablacionar del primer material.
 - 30 3. El embalaje con trampa de iones según la reivindicación 1, en donde la fuente incluye un horno térmico que es operativo para generar el flujo atómico a través de la sublimación del primer material, y en donde al menos uno de entre las trampas de iones, el sustrato y el soporte de circuito integrado está dispuesto para restringir el flujo de calor entre la primera y la segunda cámara.
 - 35 4. El embalaje con trampa de iones según la reivindicación 1, en donde el embalaje permite un nivel de presión dentro de las cámaras primera y segunda inferior o igual a 10^{-9} Torr.
 - 40 5. El embalaje con trampa de iones según la reivindicación 1, en donde el soporte de circuito integrado incluye al menos un puerto (402) que permite el paso del flujo atómico desde la segunda cámara a la primera.
 - 45 6. El embalaje con trampa de iones según la reivindicación 1 que comprende, además, una bomba de iones (804) que está acoplada de forma fluidica con la primera cámara, en donde la segunda cámara incluye una primera subcámara (808-1) y una segunda subcámara (808-2), y en donde la bomba de iones está contenida en una de entre la primera y segunda subcámaras.
 - 50 7. El embalaje con trampa de iones según la reivindicación 1 comprende, además, una bomba de sorción getter (218) que está acoplada de forma fluidica con la primera cámara.
 - 55 8. El embalaje con trampa de iones según la reivindicación 1 comprende, además, una bomba de criosorción (110) que está acoplada de forma fluidica con la primera cámara.
 9. Un método que comprende formar un embalaje con trampa de iones (200) mediante operaciones que incluyen:

proporcionar la trampa de iones (206) de tal manera que esté dispuesta sobre un sustrato (132) que esté dispuesto sobre un soporte de circuito integrado (208) que tenga una primera superficie principal (212) y una segunda superficie principal (214) que sea distal a la primera superficie principal;

60 unir una segunda carcasa (210-2) y la segunda superficie principal en una segunda junta (216-2) para definir una segunda cámara (202-2) que contiene una fuente (112) operativa para proporcionar un flujo atómico (128) que incluye átomos de un primer material (124);

65 proporcionar una primera señal luminosa (614) que se dirija a lo largo de una primera dirección (A2) hacia la trampa de iones, en donde el flujo atómico se propaga a lo largo de una segunda dirección (A1) que es prácticamente ortogonal

con la primera dirección, y en donde la primera señal luminosa es operativa para cargar la trampa de iones fotoionizando átomos neutros del primer material en el flujo atómico; y

5 unir una primera carcasa y la primera superficie principal en una primera junta (216-1) para definir una primera cámara que está acoplada de forma fluídica con la segunda cámara de tal manera que la trampa de iones pueda recibir al menos una parte del flujo atómico desde la fuente, en donde la primera carcasa está configurada para permitir el acoplamiento óptico entre la trampa de iones y la primera señal luminosa (614);

10 en donde la primera carcasa, la segunda carcasa y el soporte de circuito integrado están unidos de tal manera que el embalaje con trampa de iones permita un nivel de presión dentro de la primera cámara inferior o igual a 10^{-9} Torr.

10. El método según la reivindicación 9 que comprende, además:

15 proporcionar la fuente de tal manera que incluya un horno de ablación láser (602) que sea operativo para generar el flujo atómico mediante ablación láser del primer material; y

20 en donde la segunda carcasa, la trampa de iones y el soporte de circuito integrado están configurados de tal manera que se habilite el acoplamiento óptico entre el primer material y una primera señal luminosa (608) que es operativa para la ablación del primer material.

11. El método según la reivindicación 10 que comprende, además, proporcionar la primera señal luminosa de manera que incida sobre el primer material después de propagarse a través de la trampa de iones.

25 12. El método según la reivindicación 9 que comprende, además, proporcionar una bomba que está contenida en la segunda cámara, en donde la bomba está acoplada de forma fluídica con la primera cámara, y en donde la bomba se selecciona de entre el grupo constituido por una bomba de iones, una bomba de criosorción y una bomba de sorción getter.

30 13. El método según la reivindicación 9 que comprende, además, proporcionar la fuente de tal manera que incluya un horno térmico (112) que sea operativo para generar el flujo atómico mediante la sublimación del primer material, y en donde el sustrato esté dispuesto en la primera superficie principal y situado entre la fuente de iones y la fuente, y en donde al menos uno de entre la trampa de iones, el sustrato y el soporte de circuito integrado esté dispuesto para restringir el flujo de calor entre la primera y la segunda cámara.

35

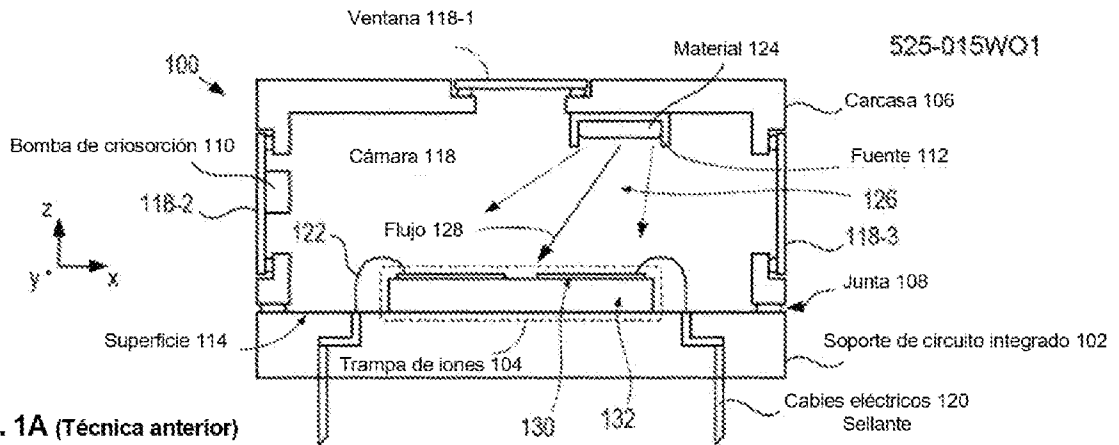


FIG. 1A (Técnica anterior)

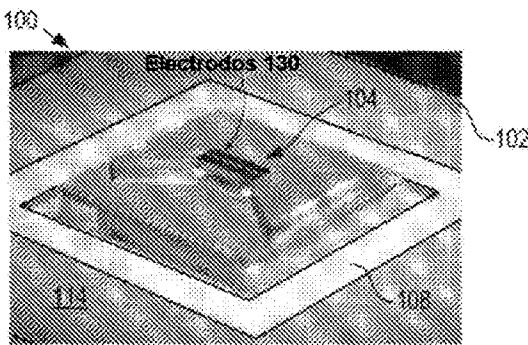


FIG. 1B (Técnica anterior)

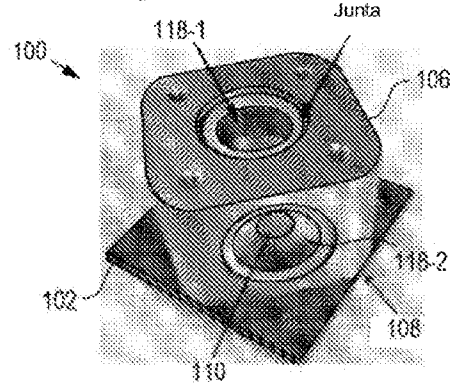


FIG. 1C (Técnica anterior)

FIG. 2

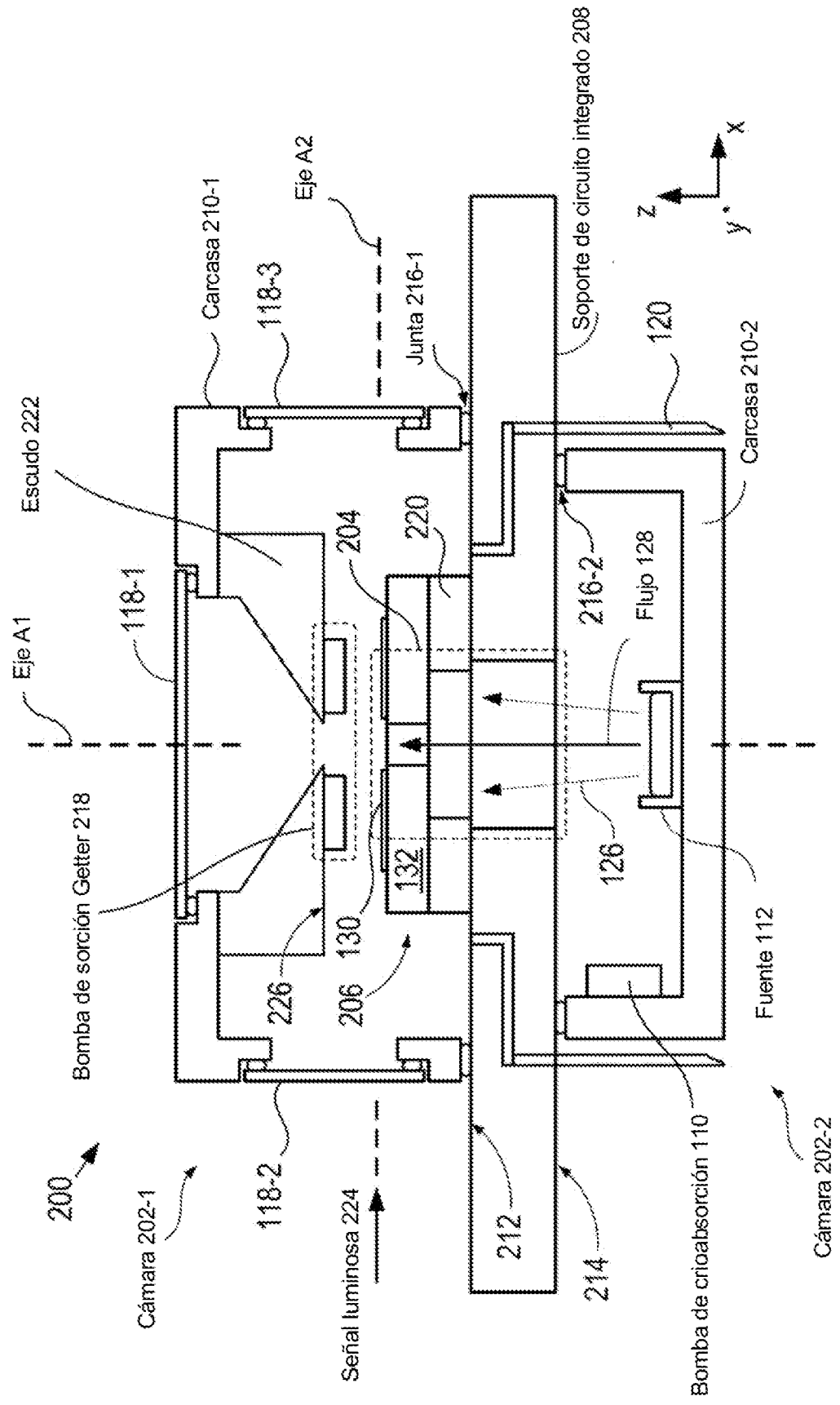
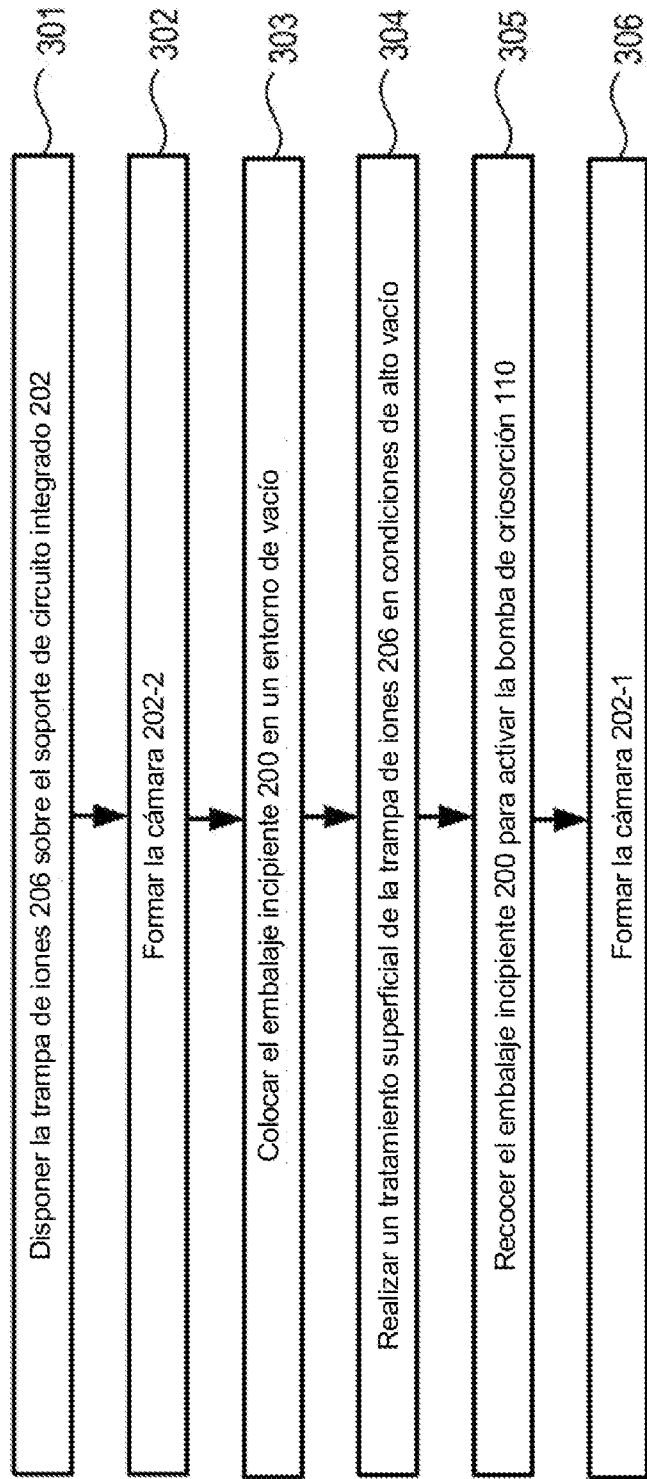


FIG. 3

300 →



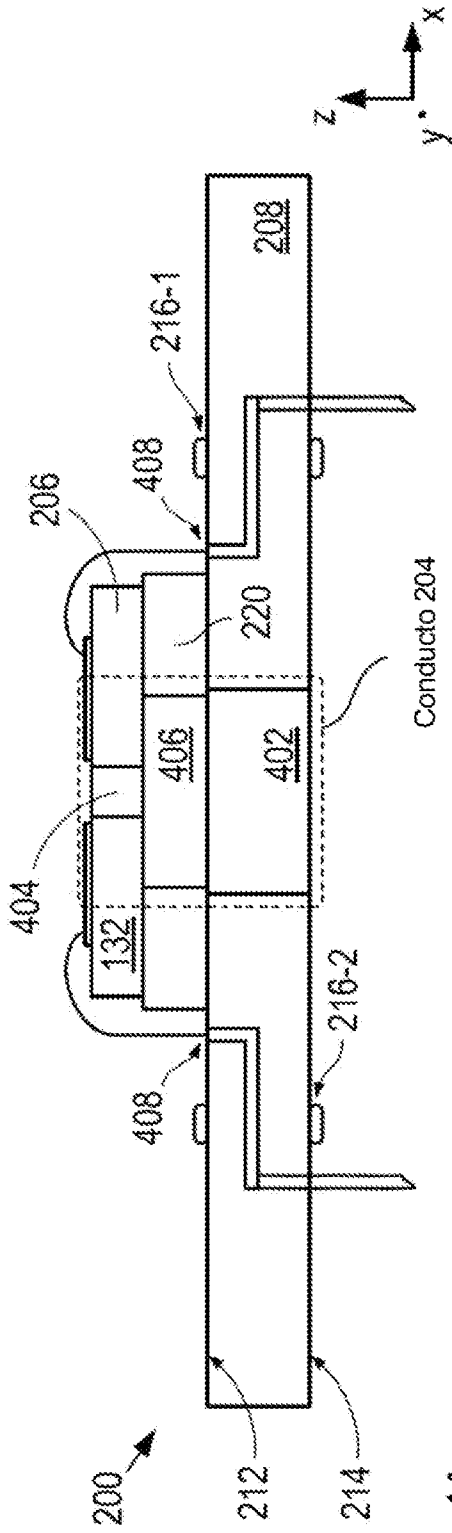


FIG. 4A

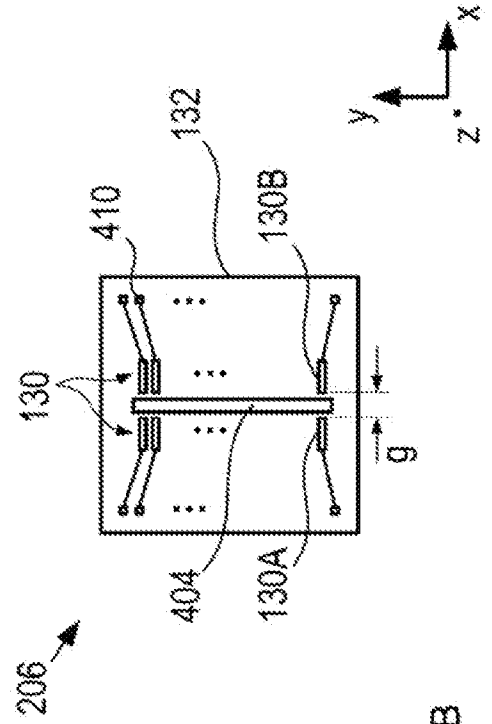


FIG. 4B

FIG. 4C

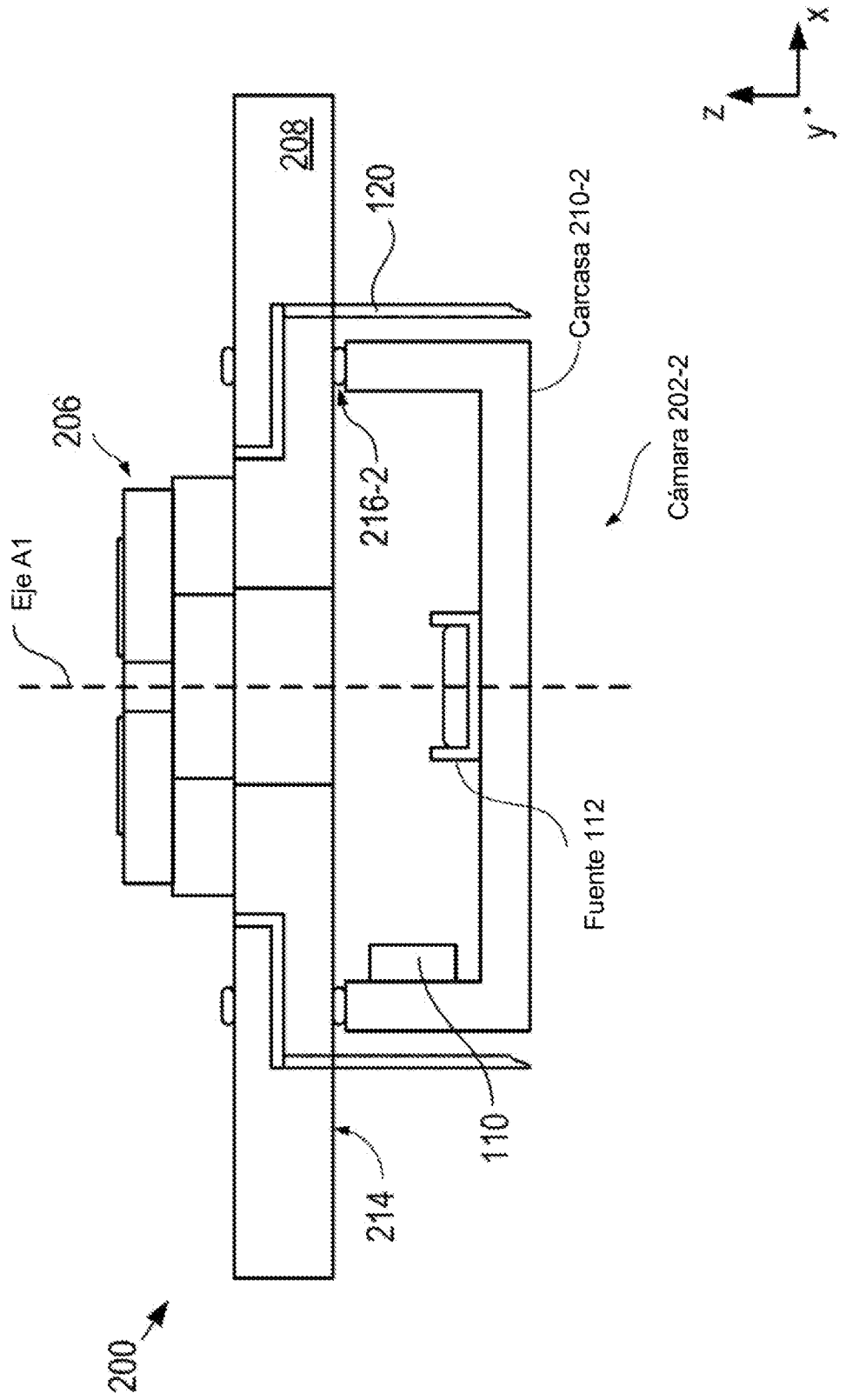


FIG. 4D

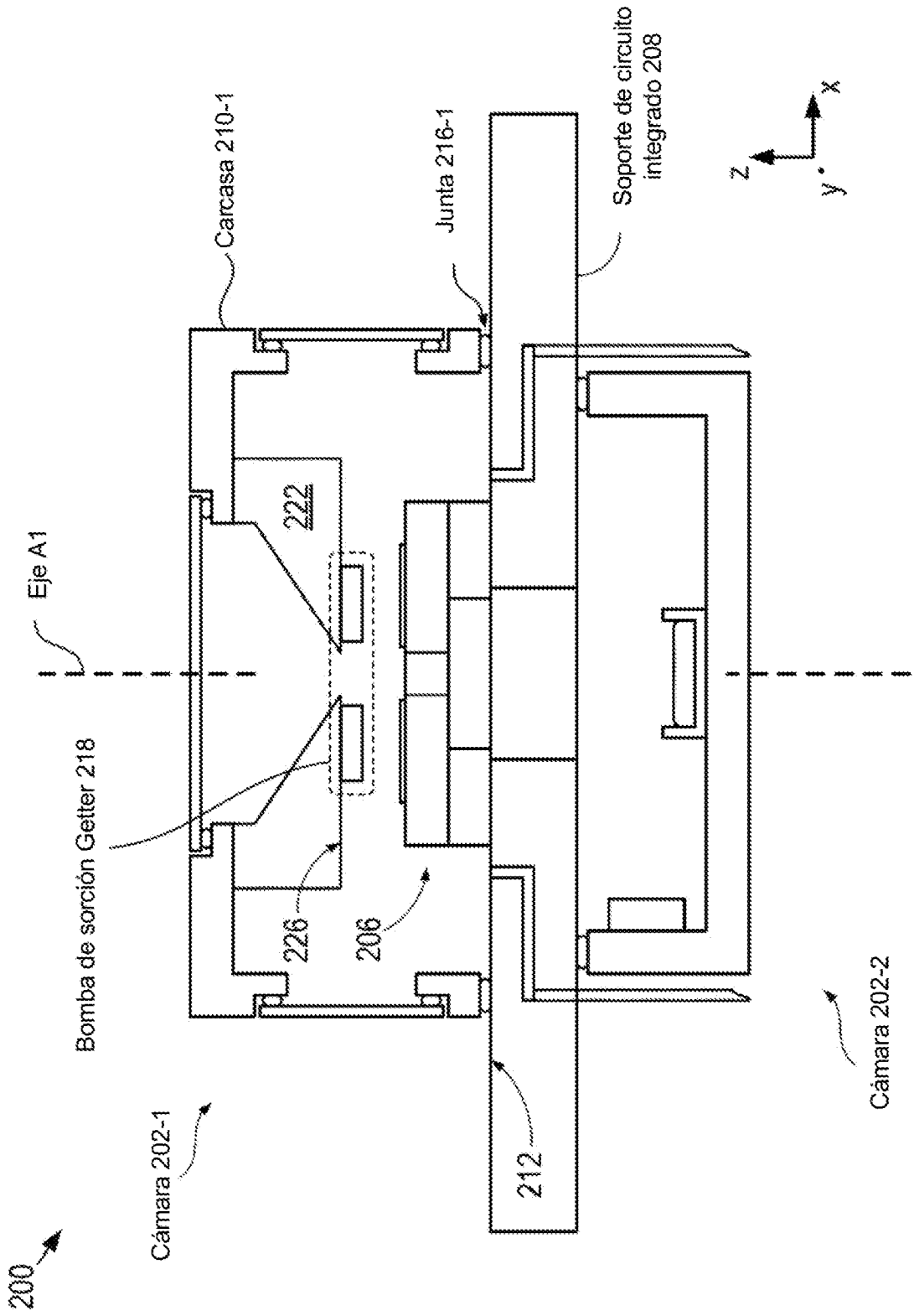


FIG. 5

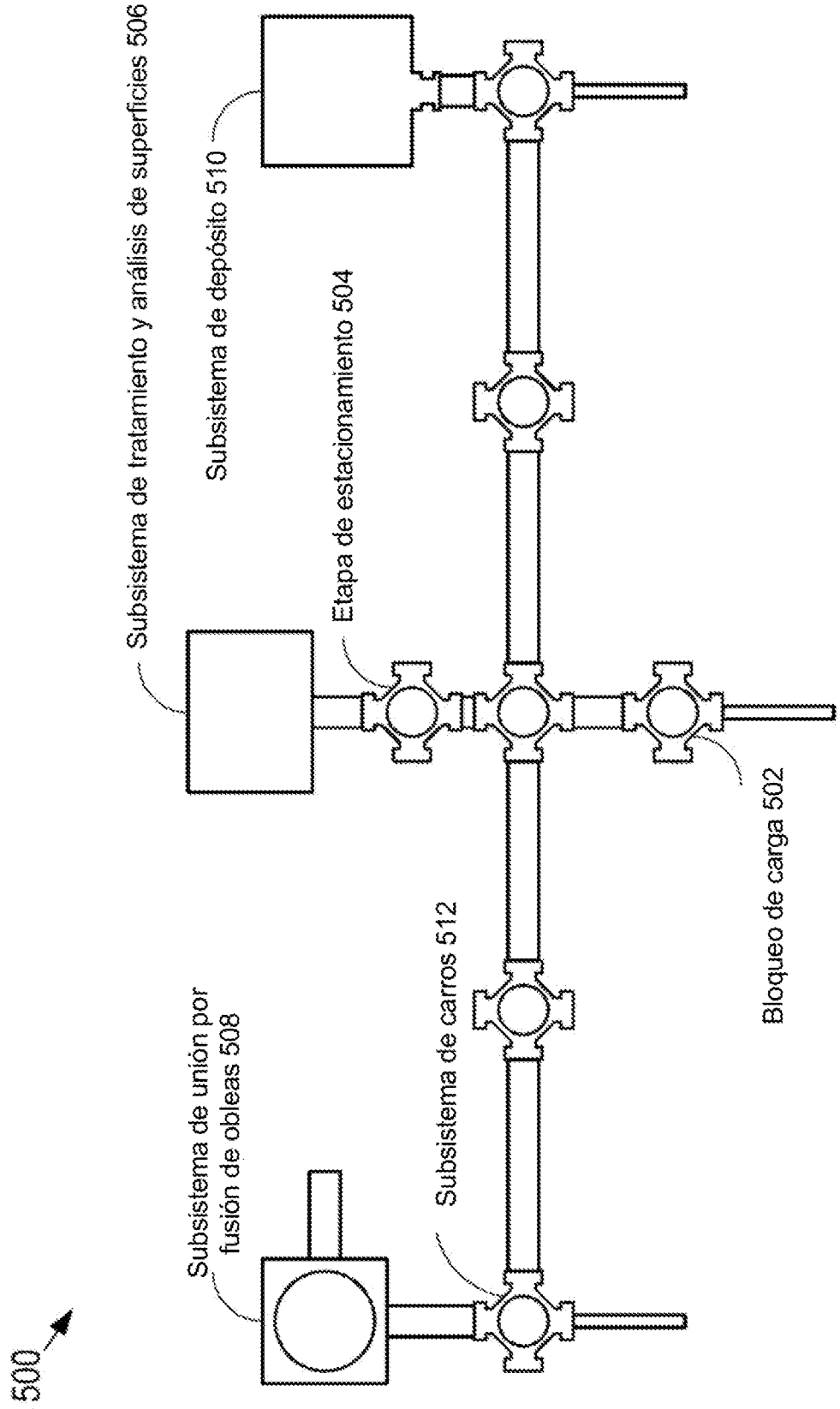


FIG. 6

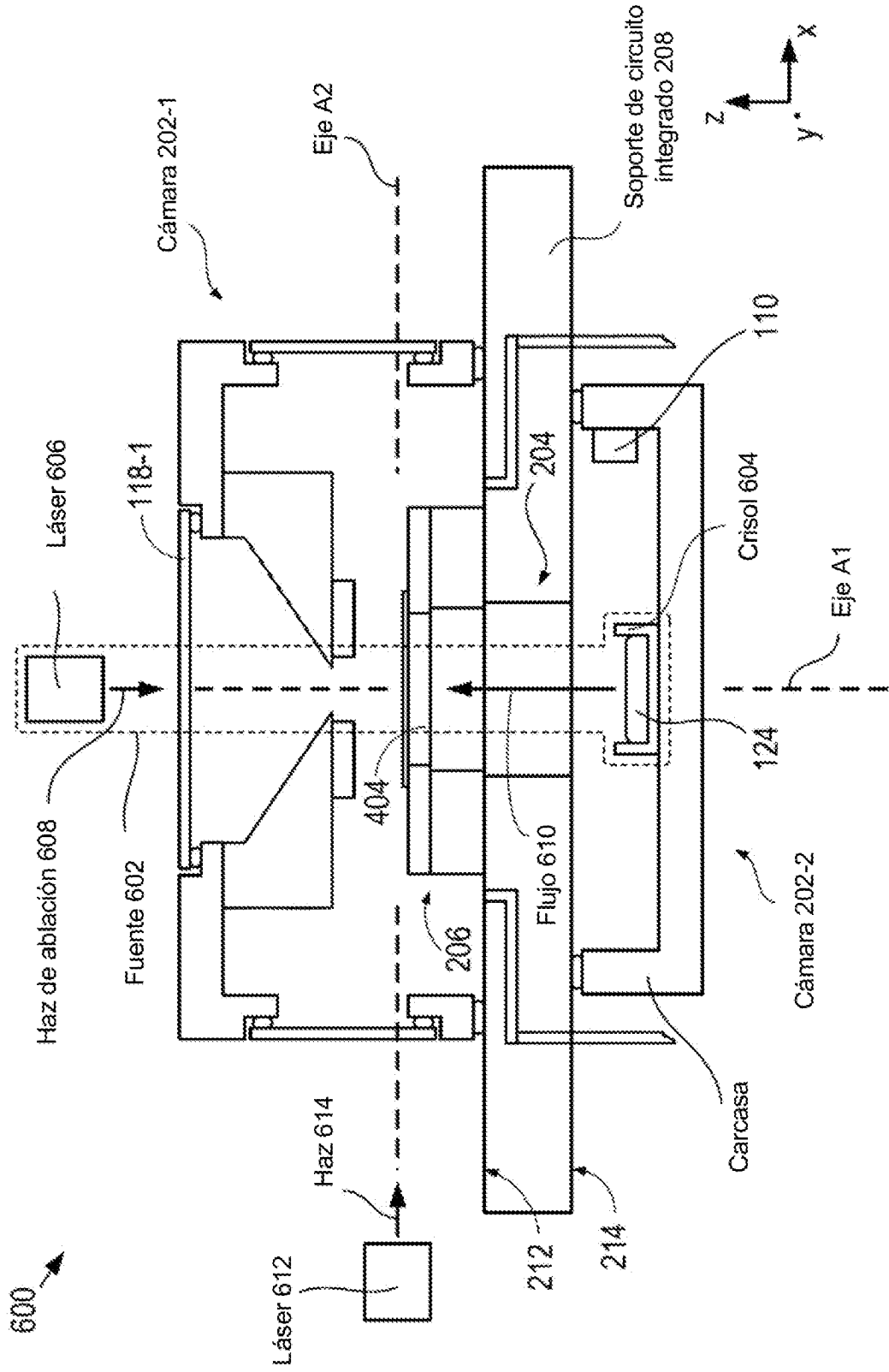


FIG. 7

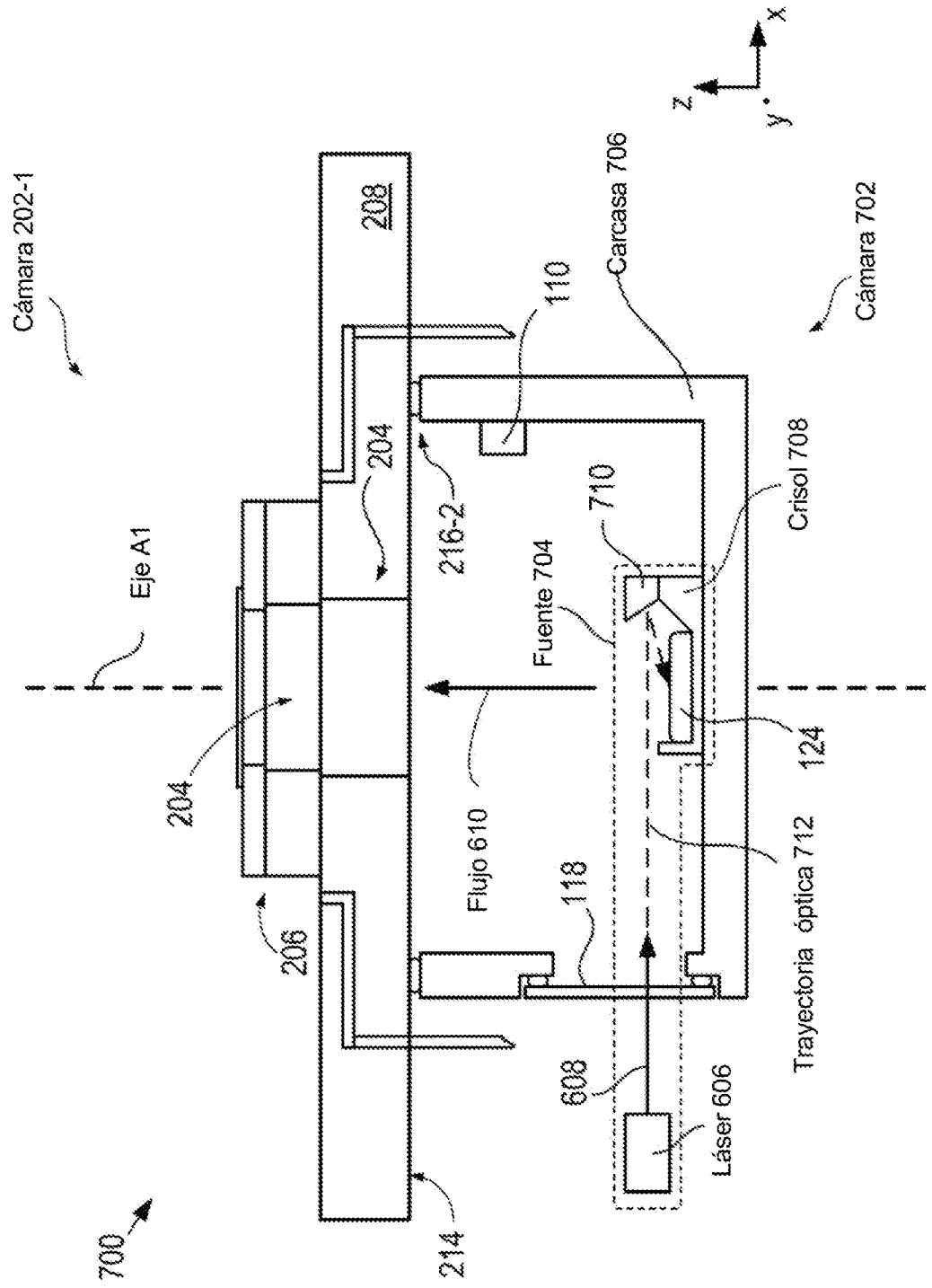


FIG. 8

