

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 684 551**

51 Int. Cl.:

B01D 7/00 (2006.01)

C23F 1/00 (2006.01)

C23F 1/12 (2006.01)

H01J 37/32 (2006.01)

H01L 21/67 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.06.2005** **PCT/GB2005/002386**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.12.2005** **WO05124827**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.06.2005** **E 05756952 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.05.2018** **EP 1766665**

54 Título: **Método mejorado para el grabado de microestructuras**

30 Prioridad:

17.06.2004 GB 0413554

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
03.10.2018

73 Titular/es:

MEMSSTAR LIMITED (100.0%)
1 Fleming Road, Kirkton Campus, Livingston
West Lothian EH54 7BN, GB

72 Inventor/es:

O'HARA, ANTHONY;
LEAVY, MICHAEL;
PRINGLE, GRAEME y
MCKIE, ANTHONY

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 684 551 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

Método mejorado para el grabado de microestructuras.

5 Esta invención se refiere al campo de la fabricación de microestructuras. Las microestructuras son en forma de sistemas microelectromecánicos (MEMS) que requieren la retirada de un material relativo a un sustrato u otro material depositado. Más particularmente, esta invención se refiere a un método mejorado para el proceso de grabado de fase gaseosa implicado en la fabricación de estas microestructuras.

10 MEMS es un término empleado generalmente por los expertos en la materia para describir dispositivos que se fabrican sobre un sustrato utilizando procesos basados en microingeniería o litografía. Estos dispositivos pueden incluir sensores y máquinas mecánicas, componentes ópticos, dispositivos de bioingeniería, dispositivos de RF así como muchos otros.

15 El empleo de un proceso de grabado para retirar capas o regiones de sacrificio en una estructura de múltiples capas sin la retirada de una capa o región adyacente es un proceso necesario y habitual en la fabricación de MEMS. Se conoce bien por los expertos en la materia emplear técnicas de grabado de difluoruro de xenón (XeF_2) dentro de este procedimiento puesto que XeF_2 graba silicio de manera isotrópica espontáneamente en la fase de vapor sin el requisito de fuentes de energía externas o bombardeo iónico. Además, a temperatura ambiente, la velocidad de grabado es alta y también se conoce que la selectividad con otros materiales utilizados habitualmente en la fabricación de MEMS (por ejemplo muchos metales, dieléctricos y polímeros) es extremadamente alta. Los factores anteriores hacen este proceso de grabado ideal para la liberación de estructuras de MEMS cuando se utiliza silicio como el material de sacrificio.

25 A temperatura ambiente y presión atmosférica XeF_2 es un sólido cristalino blanco, determinándose el tamaño de los cristales por las condiciones en las cuales tiene lugar la solidificación. La sublimación tiene lugar a una presión de vapor parcial de ~ 533 Pa (~ 4 Torr) a 25°C . La presión de vapor parcial se refiere a la presión ejercida por un componente particular de una mezcla de gas, en este caso XeF_2 .

30 Sin embargo, un inconveniente de la utilización de XeF_2 es que forma HF en presencia de vapor de agua y por tanto supone un riesgo de seguridad significativo para los usuarios si no se aísla cuidadosamente.

XeF_2 gas graba silicio con la reacción primaria tal como se define por la siguiente expresión:



Esta reacción es exotérmica, y por tanto se observan aumentos de temperatura de sustrato durante el proceso de grabado. Tal como puede observarse, la velocidad a la cual tiene lugar el grabado de silicio es proporcional a la cantidad de vapor de XeF_2 presente, es decir, cuanto más alta sea la presión parcial de XeF_2 , más alta será la velocidad de grabado.

Una de las primeras referencias a este tipo de grabado con respecto a MEMS se encuentra en E. Hoffman, B. Warneke, E. Kruglick, J. Weigold y K.S.J. Pister, "3D structures with piezoresistive sensors in standard CMOS", Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '95), p. 288-293, 1995. Dentro de este aparato se empleó un flujo continuo de gas de XeF_2 para el proceso de grabado.

Tras un refinamiento adicional de este proceso de flujo continuo, se describió en detalle el aparato empleado en F.I. Chang, R. Yeh, G. Lin, P.B. Chu, E. Hoffman, E.J.J. Kruglick, K.S.J. Pister y M.H. Hecht, "Gas-Phase Silicon Micromachining With Xenon Difluoride", en Microelectronic Structures and Microelectromechanical Devices For Optical Processing and Multimedia Applications, Proc. SPIE, vol. 2641, p. 117-128, 1995 y la patente estadounidense n.º 5.726.480 a nombre del cuerpo directivo de la Universidad de California, véase la figura 7.

Puede observarse que el aparato de grabado continuo 1 de la figura 1 comprende una cámara de grabado 2 conectada por una primera válvula 3 a una cámara de fuente 4 que contiene los cristales de XeF_2 . También se proporciona purga de nitrógeno (N_2) a la cámara de grabado 2 a través de una segunda válvula 5. Una vez que la cámara de grabado 2, con los dispositivos de muestra en su interior, se ha bombeado hasta descender a un vacío moderado por una bomba de vacío 6, se abre la primera válvula 3 y pequeñas cantidades de los cristales de XeF_2 se vaporizan en la baja presión y por tanto entra gas de XeF_2 en la cámara de grabado 2. En estas condiciones, se observan velocidades de grabado típicas de 1 - 3 micrómetros (micras) por minuto, aunque como apreciarán los expertos en la materia, la velocidad de grabado exacta depende del tamaño y densidad de las características que se graban.

Una desventaja importante de este aparato de grabado continuo 1 es la falta de control que proporciona para el proceso de grabado. La primera válvula 3 se mueve entre una posición abierta y una cerrada de modo que el flujo del gas de grabado esté correspondientemente o bien encendido o bien apagado. Otra desventaja de este sistema reside en el hecho de que depende directamente de un diferencial de presión entre la cámara de fuente

4 y la cámara de grabado 2 para provocar la vaporización requerida de los cristales de XeF_2 . Por tanto, cualquier aumento de presión dentro de la cámara de grabado 2 o disminución de presión dentro de la cámara de fuente 4 da como resultado una eficacia reducida en el funcionamiento del aparato. El proceso de grabado depende directamente, por tanto, de la cantidad, edad e historia de los cristales de XeF_2 dentro de la cámara de fuente 4.

Los expertos en la materia reconocerán también que, puesto que la reacción de la ecuación (1) es exotérmica, es deseable el enfriamiento de la muestra para impedir que la temperatura de la muestra aumente, provocando un problema tal como choque térmico que puede dañar la muestra; esto se logra habitualmente añadiendo un gas inerte. Normalmente, esto puede lograrse abriendo la segunda válvula 5 para permitir que entre gas de nitrógeno en la cámara de grabado 2 puesto que este gas inerte actúa como refrigerante. Sin embargo, debe observarse que cuando el gas de nitrógeno se introduce en la cámara de grabado 2, disminuye la eficacia del proceso de grabado. Esto ocurre debido al aumento resultante de la presión dentro de la cámara de grabado que provoca entonces una reducción en el flujo de XeF_2 al interior de la cámara de grabado 2.

Históricamente, los sistemas de grabado continuo se han considerado antieconómicos y costosos puesto que el flujo constante de gas de XeF_2 aumentaba la cantidad de los cristales de XeF_2 relativamente costosos utilizados.

Para tratar de eludir una o más de las desventajas anteriores, se han desarrollado denominados aparatos de grabado por impulsos. El primero de estos se describió en P. B. Chu, J. T. Chen, R. Yeh, G. Lin, J. C. P. Huang, B. A. Warneke y K. S. J. Pister, "Controlled Pulse-Etching with Xenon Difluoride", Transducers '97, Chicago (Illinois), EE.UU., p. 665-668, junio 1997. Este sistema de grabado por impulsos 7 se presenta esquemáticamente en la figura 2. Puede observarse que el sistema emplea una cámara intermedia, denominada cámara de expansión 8, para medir previamente una cantidad de gas de XeF_2 y mezclar este gas con otros gases, tales como un gas refrigerante de nitrógeno empleado para potenciar el proceso de grabado. El contenido de la cámara de expansión 8 se descarga entonces al interior de la cámara de grabado 2 para realizar el grabado requerido del silicio. Después de que se haya hecho reaccionar el gas de XeF_2 suficientemente, la cámara de grabado 2, y normalmente la cámara de expansión 8 también, se evacúan mediante la utilización de una bomba de desbaste o bomba de vacío 6. Se repite este proceso hasta que se ha producido el grado de grabado deseado del silicio.

El sistema de grabado por impulsos 7 descrito anteriormente sigue presentando ciertas desventajas inherentes. En el primer caso sigue sin controlar verdaderamente el flujo de gas de XeF_2 . La presión en la cámara de grabado 2 se determina mediante la presión de carga en la cámara de expansión 8, y, por tanto, por la razón de volumen de la cámara de grabado 2 con respecto a la cámara de expansión 8. Cuando la cámara de expansión 8 se une a la cámara de grabado 2, baja inevitablemente la presión. La nueva presión parcial depende de la razón del volumen de la cámara de expansión 8 con respecto al volumen de la cámara de grabado 2. Por ejemplo, si la cámara de grabado 2 es del mismo tamaño que la cámara de expansión 8, entonces, cuando se conectan, la presión parcial de XeF_2 se reduce a la mitad. Como resultado directo, la velocidad de grabado también se reduce a la mitad. Por tanto, en tales sistemas, la velocidad de grabado depende de la razón de la cámara de expansión 8 con respecto a la cámara de grabado 2. Por tanto, la presión de grabado no se controla directamente y en la práctica es habitualmente solamente aproximadamente la mitad de la presión utilizable dado que la cámara de expansión 8 y la cámara de grabado 2 son normalmente de un volumen similar.

Un segundo inconveniente significativo de este sistema reside en la naturaleza de funcionamiento cíclico del sistema. En particular, puesto que la cámara de expansión 8 requiere tiempo para llenarse antes de que comience el grabado, está abierta a la cámara de grabado 2 durante el proceso de grabado y se evacúa normalmente durante la etapa de evacuación del ciclo, forma una etapa de limitación de velocidad en el proceso de grabado. Esta limitación surge principalmente del tiempo que se tarda en rellenar la cámara de expansión 8 con gas de XeF_2 tras la etapa de evacuación del ciclo anterior. El tiempo de espera a menudo puede ser un periodo significativo del ciclo de grabado, dando por tanto como resultado el tiempo de proceso total, o el tiempo que el dispositivo pasa en la cámara de grabado 2, siendo aproximadamente el doble del tiempo de grabado real.

Un inconveniente adicional de este sistema es resultado del hecho de que cuando la cámara de expansión 8 y la cámara de grabado 2 se conectan también se aíslan de cualquier influencia externa. Por tanto, la presión parcial del vapor de XeF_2 en las cámaras en el instante en que se conectan se maximiza. Sin embargo, a medida que avanza el grabado, la cantidad de vapor de XeF_2 en la cámara baja y a medida que esto sucede, la velocidad de grabado también baja. Al intentar maximizar la utilización de XeF_2 para fines de grabado, se obtienen como resultado tiempos de grabado extremadamente largos. Además, en un sistema de grabado práctico también se extraerá mediante bombeo siempre vapor de XeF_2 .

Se describe un sistema de grabado por impulsos mejorado en la solicitud de patente US n.º US 2002/0033229 a nombre de Leboutz *et al.* Esta solicitud enseña un sistema que comprende cámaras de expansión de volumen variable, cámaras de expansión de volumen fijo, o combinaciones de las mismas, en comunicación de fluido con una cámara de grabado y una fuente de gas de grabado, tales como gas de XeF_2 . La incorporación de múltiples cámaras de expansión mitiga el tiempo de inactividad experimentado al rellenar la cámara de expansión del sistema de Chu *et al.* Además, el hecho de que las cámaras de expansión sean retráctiles permite cierto control

de la presión de grabado, sin embargo, este control de presión sigue presentando solamente una naturaleza secundaria.

Un sistema de grabado por impulsos alternativo adicional se describe en la solicitud de patente US n.º US 2002/0195423 a nombre de Reflectivity Inc. Esta solicitud enseña un sistema de grabado por impulsos que, de nuevo, comprende cámaras de expansión de volumen variable. Una adición significativa a este sistema particular es la inclusión de un sistema de bombeo de recirculación. Por tanto, una vez que la cámara de grabado se ha cargado, se utiliza la bomba para hacer recircular el gas en un intento de mejorar la velocidad de grabado y uniformidad del proceso.

Un inconveniente significativo tanto del sistema de Leboutitz *et al* como del sistema de Reflectivity Inc. es la ingeniería creciente requerida para producir el dispositivo y el capital creciente implicado no solamente en la ingeniería creciente sino en los componentes adicionales requeridos.

La solicitud de patente japonesa n.º JP S61-181131 da a conocer un método simple para grabar discos de silicio en una cámara de proceso, en el que una cantidad de vapor de XeF_2 de grabado, que se suministra a y retira de dicha cámara de proceso, controla una cantidad de grabado anisotrópico de dichos discos de silicio en dicha cámara de proceso.

Sumario de Invención

Según un aspecto de la presente invención se proporciona un método para grabar una o más microestructuras ubicadas dentro de una cámara de proceso según la reivindicación 1. El método comprende las etapas siguientes:

- a) transformar un material de grabado dentro de una cámara sellada desde un primer estado en un vapor de material de grabado;
 - b) emplear un gas portador para la cámara sellada para transportar el vapor de material de grabado desde la cámara sellada y a continuación suministrar el vapor de material de grabado a la cámara de proceso; y
 - c) controlar la cantidad de vapor de material de grabado dentro de la cámara de proceso controlando la velocidad de bombeo de vacío desde la cámara de proceso;
- en el que se selecciona la velocidad a la cual se suministra el vapor de material de grabado a la cámara de proceso en respuesta a una velocidad de grabado deseada y una velocidad de retirada del vapor de material de grabado desde la cámara de proceso.

Se exponen características de este método en las reivindicaciones 2 a 24.

Breve descripción de los dibujos

Aspectos y ventajas de la presente invención resultarán aparentes tras la lectura de la siguiente descripción detallada y haciendo referencia a los siguientes dibujos en los cuales:

la figura 1 presenta una representación esquemática del aparato empleado en la técnica anterior para llevar a cabo un proceso de grabado de XeF_2 continuo;

la figura 2 presenta una representación esquemática del aparato empleado en la técnica anterior para llevar a cabo un proceso de grabado de XeF_2 por impulsos;

la figura 3 presenta una representación esquemática de un aparato empleado para grabado de fase gaseosa de una microestructura microelectromecánica según un aspecto de la presente invención;

la figura 4 presenta una representación esquemática de una fuente de gas de grabado que comprende un sistema de suministro de gas de grabado empleado en el aparato de la figura 3;

la figura 5 presenta una representación esquemática de una cámara de proceso empleada en el aparato de la figura 3;

la figura 6 ilustra esquemáticamente la dependencia de la velocidad de grabado de la presión parcial de XeF_2 , y dependencias subsiguientes de otras partes del aparato de grabado de fase gaseosa de la figura 3;

la figura 7 presenta una representación esquemática de una etapa de ruptura empleada por el aparato de grabado de fase gaseosa de la figura 3;

la figura 8 presenta una representación esquemática de un sistema de suministro de gas de grabado alternativo al de la figura 4, que incorpora vacíos mecánicos artificiales dentro de una estructura rellena;

5 la figura 9 presenta una representación esquemática de otro sistema de suministro de gas de grabado alternativo al de la figura 4, que incorpora un vibrador mecánico;

la figura 10 presenta una representación esquemática de un sistema de suministro de gas de grabado adicional alternativo al de la figura 4, que incorpora un sistema de mezcla de gas portador;

10 la figura 11 presenta una representación esquemática de aún otro sistema de suministro de gas de grabado adicional alternativo al de la figura 4, que incorpora un soporte de conducto de entrada, una malla térmicamente conductora y un material de relleno térmicamente conductor;

15 la figura 12 presenta una representación esquemática de una fuente de gas de grabado que comprende un sistema de suministro de gas de grabado de rebose;

la figura 13 presenta una representación esquemática de una fuente de gas de grabado que comprende un sistema de suministro de gas de grabado doble como alternativa al sistema de suministro de gas de grabado de la figura 4;

20 la figura 14 presenta una representación esquemática de una fuente de gas de grabado presurizada;

la figura 15 presenta un gráfico ilustrativo del aumento de presión de XeF_2 dentro de una cámara de proceso cuando se detiene el flujo de gas que sale de la cámara de proceso, utilizando el aparato de grabado de fase gaseosa de la figura 3 que comprende la fuente de gas de grabado presurizada de la figura 14;

la figura 16 presenta una representación esquemática de una fuente de gas de grabado que comprende un flujómetro másico para monitorizar el flujo de gas de grabado; y

30 la figura 17 presenta una representación esquemática de una fuente de gas de grabado que comprende una línea de gas adicional adoptada con el fin de compensación de gas portador.

Descripción detallada

35 Haciendo inicialmente referencia a la figura 3, se presenta una representación esquemática de un aparato de grabado de fase gaseosa 9, empleado para la fabricación de microestructuras microelectromecánicas (MEMS) según un aspecto de la presente invención. Puede observarse que el aparato de grabado de fase gaseosa 9 comprende una fuente de gas de grabado, representada generalmente como 10 y mostrada en mayor detalle en la figura 4, y una cámara de proceso, representada generalmente como 11 y mostrada en mayor detalle en la figura 5.

La fuente de gas de grabado 10 se emplea para proporcionar el vapor de grabado de XeF_2 requerido a la cámara de proceso 11 mediante una primera línea de suministro de gas 12 y una línea de entrada de cámara de proceso 13. También está acoplada a la cámara de proceso 11 una línea de bombeo 14 y un primer manómetro de presión 15 que proporciona medios para determinar la presión dentro de la cámara de proceso 11. Puede observarse que la cámara de proceso 11 comprende además una tapa 16 que proporciona medios de acceso a la cámara de proceso 11 para permitir la carga y descarga de los dispositivos MEMS, según y cuando se requiera.

50 Pueden colocarse muestras, específicamente discos, automáticamente a través de un orificio lateral cuando la cámara está conectada a un sistema de gestión de discos automático.

Ubicados dentro de la línea de bombeo 14 hay una bomba de vacío 17, un segundo manómetro de presión 18, dos válvulas 19 y un conmutador de control de presión automático 20. La combinación de estos elementos proporciona medios para producir y mantener un vacío dentro de la cámara de proceso 11, y después para controlar una presión de cámara con flujos de gas establecidos controlados a un nivel suficiente para permitir que tenga lugar el proceso de grabado, tal como conocen los expertos en la materia.

60 A partir de la figura 3 puede observarse que, ubicada dentro de la línea de entrada de la cámara de proceso 13, hay una línea de ventilación 21 que proporciona medios para ventilar la cámara de proceso 11. En particular, la línea de ventilación 21 se emplea para permitir que un flujo de gas entre en la cámara de proceso 11 cuando la bomba de vacío 17 está aislada del sistema para aumentar la presión de la cámara de proceso 11 a atmosférica permitiendo por tanto que se abra la tapa 16. En esta realización, el gas suministrado es nitrógeno aunque también puede utilizarse aire como alternativa.

65

Un conmutador atmosférico 22 y un conmutador de sobrepresión 23 también están ubicados dentro de la línea de bombeo 14. La función del conmutador atmosférico 22 es proporcionar medios para indicar cuándo la cámara de proceso 11 está a presión atmosférica y por tanto puede abrirse la tapa 16. El conmutador de sobrepresión 23 está vinculado a un sistema de control de aparato (no mostrado) y proporciona una función de anulación de seguridad para la cámara de proceso 11.

También puede observarse a partir de la figura 3 que ubicadas dentro de la línea de entrada de cámara de proceso 13 hay tres (puede ser cualquier número) líneas de suministro de gas adicionales 24 que pueden emplearse para suministrar gases de proceso adicionales a la cámara de proceso 11, según y cuando se requiera. La línea de entrada de cámara de proceso 13 se conecta a la línea de bombeo 14 para proporcionar medios para bombear al exterior estas líneas de suministro de gas adicionales 24.

La figura 4 presenta mayor detalle de la fuente de gas de grabado 10. Puede observarse que la fuente de gas de grabado 10 comprende un sistema de suministro de gas de grabado 25 y una fuente de gas portador 26, ambas de las cuales están ubicadas dentro de la primera línea de suministro de gas 12. El sistema de suministro de gas de grabado 25 comprende una cámara sellada 27 que aloja cristales de XeF_2 28, un conducto de entrada 29 y un conducto de salida 30. El conducto de entrada 29 está ubicado por encima de la superficie de los cristales de XeF_2 28 y funciona para proporcionar medios para entregar un gas portador, concretamente gas de helio (He), a partir de la fuente de gas portador 26 directamente a los cristales de XeF_2 28. El conducto de salida 30 penetra por debajo del nivel de los cristales de XeF_2 28 y se emplea como medios para entregar vapor de XeF_2 , portado por el gas portador de helio, a la cámara de proceso 11. El control de temperatura dentro de la cámara sellada 27 se logra mediante la incorporación de elementos 61 térmicos ubicados en la superficie externa de la cámara. En una realización alternativa, los elementos 61 térmicos pueden extenderse por debajo de la cámara sellada 27, y en aún otra realización los elementos 61 térmicos pueden proporcionar calor a todos los componentes del aparato. El control de flujo de volumen del gas portador dentro del sistema se regula mediante la combinación de válvulas 19 y un dispositivo 31 de control de flujo másico (MFC) ubicados dentro de la primera línea de suministro de gas 12. Un MFM en la primera línea de suministro de gas 12 puede monitorizar el flujo de gas en la línea y mediante comparación con el suministro de MFC de gas portador puede determinarse el flujo de XeF_2 (véanse la figura 16 y el comentario que la acompaña a continuación).

El principio de funcionamiento del aparato de grabado de fase gaseosa 9 es el siguiente. Cuando la presión parcial del vapor de XeF_2 dentro de la cámara sellada 27 es menor de ~ 533 Pa (~ 4 Torr), entonces se produce la sublimación de los cristales de XeF_2 28 y se forma vapor de XeF_2 dentro de la cámara sellada 27. El gas de helio dentro de la fuente de gas portador 26 se mantiene a una presión de ~ 207 kPa (~ 30 psi) de tal manera que cuando se suministra una señal eléctrica al dispositivo 31 de MFC se logra un suministro controlado de gas de helio a la cámara sellada 27. El gas de helio actúa entonces para recoger el vapor de XeF_2 que se ha sublimado a partir de los cristales de XeF_2 28 y portarlo, mediante el conducto de salida 30, a la cámara de proceso 11. El grabado de uno o más dispositivos MEMS ubicados dentro de la cámara de proceso 11 puede tener entonces lugar de una manera similar a la conocida por los expertos en la materia. Obsérvese que el gas portador de helio también proporciona una función secundaria en la medida en que actúa como refrigerante para el proceso de grabado, aumentando por tanto la eficacia de este proceso.

En la práctica, se encuentra que la velocidad de grabado depende de la presión parcial del XeF_2 en la cámara de proceso 11. La presión parcial de XeF_2 depende a su vez de la cantidad de XeF_2 que se suministra a la cámara de proceso 11, consumiéndose el XeF_2 mediante el proceso de grabado y bombeándose la cantidad de XeF_2 , si la hubiese, al exterior, tal como se presenta esquemáticamente en la figura 6 y se expresa en la ecuación (2) a continuación:

$$\text{XeF}_2 \text{ suministro} = \text{XeF}_2 \text{ grabado} + \text{XeF}_2 \text{ bombeo} + \text{XeF}_2 \text{ res} \quad (2)$$

Por tanto, la cantidad de XeF_2 suministrado a la cámara de proceso 11 ($\text{XeF}_2 \text{ suministro}$) está en equilibrio con la cantidad de XeF_2 que se consume por el proceso de grabado ($\text{XeF}_2 \text{ grabado}$), bombeándose XeF_2 desde la cámara de proceso 11 ($\text{XeF}_2 \text{ bombeo}$), y la cantidad de XeF_2 residente en la cámara de proceso 11 ($\text{XeF}_2 \text{ res}$).

Es la cantidad de XeF_2 residente en la cámara de proceso 11 la que determina en última instancia la presión parcial del XeF_2 . Por tanto, para lograr una velocidad de grabado tan alta como sea posible, es necesario que la presión parcial de XeF_2 en la cámara de proceso 11 sea tan alta como sea posible. Sin embargo, existe un límite superior en la medida en que la presión parcial de XeF_2 no debe superar la presión de vapor o de lo contrario el vapor de XeF_2 se recrystalizará. Normalmente, la presión de vapor de XeF_2 a temperatura ambiente es de ~ 533 Pa (~ 4 T) y se conoce que depende de la temperatura de tal manera que aumentar la temperatura aumenta la presión de vapor. Por tanto, se encuentra que emplear elementos 61 térmicos para calentar la cámara sellada 27, la primera línea de suministro de gas 12, la línea de entrada de cámara de proceso 13 y la cámara de proceso 11 actúa para aumentar la presión de vapor, permitiendo por tanto que se obtenga una presión parcial de XeF_2 más alta.

La presión parcial de XeF_2 no debe elevarse por encima de la presión de vapor para la temperatura del sistema o se producirá recristalización. En muchos sistemas es habitual tener la fuente de gas de grabado a una temperatura dada y tener entonces los componentes subsiguientes hasta e incluyendo la cámara de procesamiento a una temperatura más alta para garantizar que no se produzca ninguna recristalización del XeF_2 . Esta configuración conducirá a un aparato más complejo. Puede reducirse la cantidad de componentes que requieren su calentamiento. Con un muy buen sistema de control, puede no requerirse el calentamiento de la cámara de proceso.

Para ilustrar adicionalmente este punto, considérese el aparato de grabado de fase gaseosa 9 completo como un sistema único todo a la misma temperatura, por ejemplo una temperatura ambiente de $\sim 25^\circ\text{C}$. La presión de vapor del XeF_2 es por tanto de ~ 533 Pa (~ 4 Torr). La velocidad de sublimación de XeF_2 depende de la temperatura, el área superficial de los cristales y la presión parcial del XeF_2 . A una temperatura establecida, la fuente de gas de grabado 10 puede suministrar una cantidad establecida de vapor de XeF_2 al interior de la cámara de proceso 11. La velocidad de bombeo se establece entonces para controlar la cantidad de XeF_2 residente en la cámara de proceso 11. Por tanto, el mecanismo restante para retirar el vapor de XeF_2 desde la cámara de proceso 11 es el grabado en sí. La cantidad de XeF_2 que se consume en el proceso de grabado depende principalmente de la cantidad de silicio expuesto, por ejemplo, para el mismo patrón de fotolitografía, un disco de 150 mm de diámetro consumirá XeF_2 a una velocidad más rápida que si fuera un disco de 100 mm de diámetro. Esto quiere decir que si hay una gran cantidad de silicio expuesto que retira vapor de XeF_2 en el proceso de grabado la presión parcial de XeF_2 en la cámara de proceso 11 se reducirá a un nivel mucho menor que la presión de vapor. Por tanto, en la práctica el suministro de vapor de XeF_2 puede aumentarse, siempre y cuando la presión parcial de XeF_2 permanezca por debajo de la presión de vapor, aumentando por tanto la velocidad de grabado total. Por tanto, aumentando la temperatura de la fuente de gas de grabado 10 la presión de vapor en la fuente de gas de grabado 10 aumenta y por tanto los cristales de XeF_2 generan más vapor de XeF_2 . Suministrar más vapor de XeF_2 a la cámara de proceso 11 aumenta la presión parcial de XeF_2 y conduce a velocidades de trabajo más altas.

El método descrito anteriormente depende de un muy buen control del proceso de grabado. A medida que avanza el grabado, el sistema es estable y está equilibrado, coincidiendo la velocidad de grabado y la velocidad de bombeo con el suministro de XeF_2 . Al final del grabado, sea provocado por un agotamiento del silicio en un modo de sacrificio o finalizando el grabado en un modo temporizado, la dinámica de grabado cambia. A medida que se reduce el XeF_2 que se retira debido al grabado del silicio, o se retira completamente, el suministro de XeF_2 a la cámara o el vapor de XeF_2 retirado mediante bombeo debe controlarse adicionalmente para garantizar que la presión parcial de XeF_2 en la cámara de grabado no se eleva por encima de la presión de vapor. En el caso de un grabado de sacrificio se requiere un monitor de punto final/proceso en un bucle de realimentación para determinar cuándo está cambiando la dinámica de grabado y se requiere una respuesta del sistema.

Los expertos en la materia apreciarán que puede aumentarse adicionalmente la velocidad de grabado, de una manera similar, aumentando también la temperatura de la cámara de proceso 11, permitiendo por tanto que se emplee una presión parcial de XeF_2 más alta en la cámara de proceso.

Tal como conocen los expertos en la materia, existen normalmente varias etapas de procesamiento llevadas a cabo en una estructura de MEMS antes de que tenga lugar el grabado. Estas etapas se ilustran esquemáticamente en la figura 7 e incluyen la preparación de una muestra 60 y la fabricación de una máscara 64, véase la figura 7(a). El silicio 62 expuesto que va a grabarse, si se deja en un entorno adecuado, desarrollará una capa 63 de óxido delgada, denominada óxido nativo, véase la figura 7(b). El grosor de esta capa depende del tiempo que se deje expuesto.

En procesos de grabado de silicio altamente selectivos, por ejemplo grabado de XeF_2 , el tiempo que se tarda en grabar el óxido nativo puede ser considerable. Además, dado que el grosor de esta capa depende del tiempo que se ha expuesto el silicio, el grosor del óxido nativo puede ser variable. Para retirar el óxido nativo dentro del aparato de grabado de fase gaseosa 9 puede introducirse una etapa de ruptura de procesamiento independiente. Esta etapa se utiliza solamente para retirar el óxido nativo y puesto que se optimiza para este fin conduce a un procesamiento más rápido y más controlado del MEMS.

La etapa de ruptura puede lograrse utilizando un proceso de grabado de SiO_2 , habitualmente un grabado plasmático utilizando química de flúor. Sin embargo, es posible utilizar el vapor de XeF_2 como fuente del grabado de flúor. El XeF_2 puede disociarse mediante la aplicación de energía procedente de diversas fuentes, por ejemplo plasma, bombardeo iónico, pero preferiblemente luz UV. El flúor disociado grabará entonces la capa de óxido.

Alternativamente, se logra la etapa de ruptura cuando se utiliza XeF_2 como gas de grabado de silicio, añadiendo inicialmente una pequeña cantidad controlada de vapor de agua a la cámara de proceso 11 durante la etapa de ruptura. Puesto que el XeF_2 reacciona con el vapor de agua para producir ácido fluorhídrico (HF), el HF resultante graba el óxido nativo. Cuando se emplea un óxido como máscara 64 este también se grabará por el HF. Sin embargo, la duración de la etapa de ruptura es relativamente corta y por lo tanto solamente se consumirá normalmente una pequeña cantidad de material de máscara, véase la figura 7(c). Una vez que se ha completado

la etapa de ruptura, se retira el vapor de agua y cualquier vapor de HF residual y la etapa de proceso de grabado de silicio comienza tal como se representa en la figura 7(d). Emplear la etapa de ruptura conduce a un mejor control de proceso y a un proceso más repetible de una muestra a otra.

5 Se encuentra que la eficacia del proceso de recogida del vapor de XeF_2 por el gas portador de helio depende de varios factores, incluyendo:

- El volumen de cristales de XeF_2 28 presente en la cámara sellada 27;
- La presión de vapor de XeF_2 , que se conoce que depende de la temperatura;
- 10 • La velocidad de flujo del gas portador de helio;
- La presión dentro de la cámara sellada 27;
- La densidad de relleno y tamaño de cristal de los cristales de XeF_2 28; y
- La geometría de la cámara sellada 27.

15 Un proceso desfavorable que se encuentra que tiene lugar dentro del sistema de suministro de gas de grabado 25 empleado dentro de la presente invención es la tendencia del gas portador de helio de crear canales preferenciales a través de los cristales de XeF_2 28 densamente rellenos. A medida que el gas de helio fluye a través de estos canales, hay menor recogida de vapor, dado que hay una zona de contacto más pequeña entre el gas portador y los cristales de XeF_2 28.

20 A medida que los canales a través de los cristales de XeF_2 28 continúan expandiéndose la eficacia de la recogida del gas portador se deteriora hasta que la estructura rellena de XeF_2 se vuelve inestable. La estructura rellena de XeF_2 colapsará entonces sobre sí misma de manera que el proceso de recogida de gas portador sea de una forma diferente. El proceso de formación de canales descrito da por tanto como resultado una recogida no uniforme y el agotamiento de los cristales de XeF_2 28.

Ahora se describirán diversas alternativas del sistema de suministro de gas de grabado que están diseñadas para reducir el efecto problemático de la formación de canales a través de los cristales de XeF_2 28.

30 En una primera alternativa, puede variarse la posición de los extremos inferiores del conducto de entrada 29 y el conducto de salida 30. Por ejemplo, ambos extremos inferiores pueden estar ubicados por encima de o por debajo de la superficie superior de los cristales de XeF_2 28. Alternativamente, solamente el extremo inferior del conducto de salida 30 o el conducto de entrada 29 está ubicado por debajo de la superficie superior de los cristales de XeF_2 28.

35 La figura 8 ilustra un sistema de suministro de gas de grabado 32 alternativo que comprende material 33 de relleno en forma de pequeños cilindros compuestos por politetrafluoroetileno (PTFE), que se han añadido periódicamente a lo largo de la totalidad de los cristales de XeF_2 28. La adición del material 33 de relleno actúa para aumentar el número de caminos disponibles para que el gas portador de helio se propague a través de los cristales de XeF_2 28 y por tanto aumenta la zona de contacto entre estos elementos. Esto da como resultado un consumo más uniforme de los cristales de XeF_2 28 debido a una reducción en el proceso de formación de canales descrito anteriormente. Por tanto, el sistema de suministro de gas de grabado 32 exhibe un flujo más uniforme del vapor de XeF_2 a la cámara de proceso 11.

45 Aunque se ha descrito el material 33 de relleno como que comprende PTFE, también puede emplearse cualquier material que no reaccione con XeF_2 , en forma de cristal o vapor, o el gas portador, por ejemplo, vidrio, o aluminio o acero inoxidable, debido a sus mejores propiedades de conducción térmica. Además, el material 33 de relleno puede comprender formas geométricas alternativas tales como estructuras de resorte o esferas.

50 Se logra una ventaja adicional del material 33 de relleno si este material también exhibe buenas propiedades de conductividad térmica. Esto es debido a que durante periodos en los que la fuente de gas de grabado 10 está inactiva (es decir, entre operaciones de disco) los cristales de XeF_2 28 y el vapor obtenido de los mismos alcanzan un equilibrio con la presión parcial de XeF_2 en la fuente de gas de grabado 10 que es igual a la presión de vapor para esa temperatura particular. Continúan teniendo lugar la sublimación y recristalización. Cuando el gas portador comienza a fluir de nuevo en el aparato de grabado de fase gaseosa 9, se activa la fuente de gas de grabado 10 para suministrar de nuevo el vapor de XeF_2 y por tanto se requiere más sublimación. Se necesita energía para generar el vapor y en el proceso de suministrar esta energía los cristales de XeF_2 28 se enfrían. Esto a su vez ralentiza la sublimación lo que da como resultado un menor flujo de vapor de XeF_2 y una velocidad de grabado inferior. Dado que el sistema continúa funcionando, se alcanza un estado de equilibrio de temperatura inferior efectivo y se logra un flujo de vapor de XeF_2 estable pero reducido. Sin embargo, el empleo de un material 33 de relleno que es térmicamente conductor da como resultado que se suministre fácilmente calor desde las paredes de la fuente de gas de grabado 10 y los elementos 61 térmicos, reduciendo por tanto el efecto de enfriamiento perjudicial sobre los cristales de XeF_2 28.

65 Por tanto, en un sistema altamente controlado tal como se describió anteriormente, puede añadirse una cantidad apropiada de calor adicional para compensar el calor que se pierde mediante el proceso de sublimación.

La figura 9 presenta un aparato alternativo para superar el efecto perjudicial de la creación de canales a través de los cristales de XeF_2 28. Dentro de este aparato alternativo, el sistema de suministro de gas de grabado 34 comprende una cámara sellada 27 que se conecta a la primera línea de suministro de gas 12 mediante dos tuberías 35 flexibles. Ubicado en el extremo inferior de la cámara sellada 27 hay un vibrador 36 mecánico que actúa en conjunto con las tuberías 35 flexibles para hacer vibrar mecánicamente la cámara sellada 27. Como resultado directo de este movimiento vibratorio, se mueven continuamente los cristales de XeF_2 28 contenidos dentro de la cámara sellada 27 para eliminar la posibilidad de que se formen canales de gas portador a través de los cristales de XeF_2 28. El vibrador 36 mecánico da por tanto como resultado una creación de canales reducida y de ese modo proporciona una recogida más fluida y un consumo uniforme de los cristales de XeF_2 28.

Las figuras 10(a) y (b) presentan una vista esquemática frontal y vista en planta de un sistema de suministro de gas de grabado 37 según una alternativa adicional. En esta alternativa, el gas portador de helio se introduce en la región inferior de la cámara sellada 27 mediante cuatro conductos de entrada sustancialmente tangenciales 38. Está presente un único conducto de salida 30 que es longitudinal para proporcionar medios para transmitir el vapor de XeF_2 y el gas portador de helio a la cámara de proceso 11, según sea apropiado.

La introducción del gas portador de helio mediante cuatro conductos de entrada sustancialmente tangenciales 38 independientes da como resultado que se cree un vórtice dentro de la cámara sellada 27. Este vórtice actúa para agitar los cristales de XeF_2 28 y por tanto impide de nuevo que se produzcan canales por el gas portador a través de los cristales de XeF_2 28. Por tanto, este diseño de sistema de suministro de gas de grabado 37 reduce la posibilidad de que se formen canales de gas portador y por tanto aumenta la eficacia y uniformidad del suministro de vapor de XeF_2 a la cámara de proceso 11.

La figura 11 presenta una alternativa adicional del sistema de suministro de gas de grabado. Tal como puede observarse, el sistema de suministro de gas de grabado 39 comprende muchas de las características del sistema de suministro de gas de grabado 32 presentadas en la figura 8, concretamente:

- 1) una cámara sellada 27 que comprende los cristales de XeF_2 28 y el material 33 de relleno;
- 2) un conducto de entrada 29 que penetra descendiendo a través de los cristales de XeF_2 28; y
- 3) un conducto de salida 30 que está ubicado por encima de la superficie de los cristales de XeF_2 28.

Además de las características anteriores, el sistema de suministro de gas de grabado 39 comprende además una tapa 40 que puede retirarse de la cámara sellada 27 para facilitar el llenado y la retirada de procesos de material. La tapa 40 se sella con la cámara sellada 27 mediante una junta tórica.

Ubicado dentro de la cámara sellada 27 hay un tubo 41 de soporte de conducto de entrada que desciende hasta la base de la cámara sellada 27 para encontrarse con un soporte 42 de malla térmicamente conductor. El soporte 42 de malla térmicamente conductor se emplea para permitir un acceso uniforme de gas portador y vapor de XeF_2 al conducto de salida 30, mediante el volumen ubicado por debajo de los cristales de XeF_2 28. Esta disposición da como resultado una reducción del efecto de creación de canales a través de los cristales de XeF_2 28. La presencia del tubo 41 de soporte de conducto de entrada quiere decir que a medida que se llena la cámara sellada 27 con material, se reserva siempre un espacio para que se inserte el conducto de entrada 29.

En la alternativa actualmente descrita, las paredes de la cámara sellada 27 están hechas de un material transparente. Esto permite la observación de los cristales de XeF_2 28 y material 33 de relleno, permitiendo por tanto que se recopile información útil acerca del perfil de utilización y la dinámica de gas dentro de la cámara sellada 27. Además, el empleo de paredes transparentes permite que se empleen sensores para detectar automáticamente la utilización de material dentro del recipiente.

Esto puede lograrse ópticamente utilizando una fuente de luz, tal como un LED o láser, montado en el lado de la cámara sellada 27 incidiendo la luz emitida sobre un sensor montado en el lado opuesto para detectar la transmisión a través de la cámara sellada 27. Alternativamente, podría montarse el sensor en alguna otra posición en la que pueda detectar el haz reflejado desde el contenido de la cámara sellada 27. Esta disposición podría usarse como un sensor de nivel para detectar el nivel de cristales de XeF_2 28 dentro de la cámara sellada 27.

Se describe ahora aún otro sistema de suministro de gas de grabado 43 alternativo adicional que queda fuera de la invención reivindicada haciendo referencia a la figura 12. En esta realización, la cámara sellada 27 se conecta a la primera línea de suministro de gas 12 mediante un único conducto 44. Durante el funcionamiento, la presión dentro de la cámara sellada 27 se mantiene a aproximadamente 533 Pa (4 Torr). Se provoca entonces que el gas portador de helio fluya a través de la primera línea de suministro de gas 12 a una presión de menos de 533 Pa (4 Torr). Como resultado, el vapor de XeF_2 dentro de la cámara sellada 27 se extrae por el gas portador al interior de la primera línea de suministro de gas 12 y a continuación se transporta a la cámara de proceso 11, según se requiera. La sublimación continuada de los cristales de XeF_2 28 dentro de la cámara sellada 27 actúa para mantener el flujo de vapor de XeF_2 requerido, dando como resultado un suministro continuo y uniforme de

vapor de XeF_2 a la cámara de proceso 11 siempre y cuando el gas de helio permanezca en una presión por debajo de $\sim 533 \text{ Pa}$ ($\sim 4 \text{ Torr}$).

La figura 13 presenta aún otra alternativa adicional del sistema de suministro de gas de grabado de figura 4, representada generalmente como 45 que, de nuevo, proporciona un suministro de vapor de XeF_2 más uniforme a la cámara de proceso 11. En esta alternativa particular, están ubicados sistemas de suministro de gas de grabado 25a y 25b primero y segundo en secuencia dentro de la primera línea de suministro de gas 12. Con esta ubicación, el gas portador de helio se propaga inicialmente a través del primer sistema de suministro de gas de grabado 25a y entonces posteriormente a través del segundo sistema de suministro de gas de grabado 25b para garantizar que el gas portador se sature con vapor de XeF_2 . El primer sistema de suministro de gas de grabado 25a está por tanto, preferentemente, agotado de cristales de XeF_2 28 mientras que el segundo sistema de suministro de gas de grabado 25b mantiene el nivel de vapor de XeF_2 que se porta a la cámara de proceso 11 a lo largo de la totalidad de la vida de servicio del primer sistema de suministro de gas de grabado 25a.

Cuando el primer sistema de suministro de gas de grabado 25a se agota, se cierran las válvulas 19 de tal manera que el primer sistema de suministro de gas de grabado 25a pueda retirarse del aparato. El segundo sistema de suministro de gas de grabado 25b se desplaza entonces desde su posición original hasta la posición del primer sistema de suministro de gas de grabado 25a. Se instala entonces un nuevo sistema de suministro de gas de grabado completo en la posición original del segundo sistema de suministro de gas de grabado. Se vuelven a abrir entonces las válvulas 19 y la producción de vapor de XeF_2 continúa tal como se describió anteriormente. En la práctica, el volumen de cristales de XeF_2 28 contenido dentro del sistema de suministro de gas de grabado 45 permite que el aparato funcione durante varios cientos de horas antes de que se requiera que se implemente el método de reemplazo descrito.

Se ha descrito el aparato descrito anteriormente haciendo referencia a vapor de grabado de XeF_2 y un gas portador de helio. Sin embargo, se conoce que pueden emplearse con igual carácter beneficioso vapores de grabado y gases portadores alternativos sin apartarse del alcance de la invención. Por ejemplo, el material de grabado puede comprender cualquier fluoruro de gas noble, por ejemplo, difluoruro de criptón, tetrafluoruro de xenón y hexafluoruro de xenón. Alternativamente, el material de grabado puede comprender un fluoruro de halógeno, por ejemplo, trifluoruro de bromo, trifluoruro de cloro o pentafluoruro de yodo.

De manera similar, el gas portador puede comprender cualquiera de los gases inertes. Un ejemplo de los gases inertes que también pueden emplearse es el gas de nitrógeno.

Como alternativa adicional, pueden emplearse dos o más de los vapores de grabado o gases portadores mencionados anteriormente en combinación dentro del aparato descrito.

La figura 14 presenta una representación esquemática de una fuente de gas de grabado presurizada 48. La presión en la cámara sellada 49 con solamente cristales de XeF_2 50 presentes se elevará a la presión de vapor a la temperatura de la cámara sellada 49 (es decir, $\sim 533 \text{ Pa}$ ($\sim 4 \text{ Torr}$) a 25°C). Cuando se hacen fluir gases es deseable controlar el flujo de gas con un controlador de flujo másico (MFC), sin embargo, a diferenciales de baja presión es difícil lograr un control preciso.

La cámara sellada 49 puede presurizarse utilizando otro gas, por ejemplo, un gas inerte tal como el helio. La cantidad de gas 51 de presurización que se añade a la cámara sellada 49 puede controlarse por un MFC 52, mientras se monitoriza la presión con un manómetro de presión 53. Diferentes cantidades de gas 51 de presurización que fluyen al interior de la cámara sellada 49 dan como resultado variaciones en la concentración de mezcla del vapor de XeF_2 . Sin flujo de salida, la presión parcial del XeF_2 se igualará con la presión de vapor.

Con una presión de cámara sellada aumentada puede utilizarse un MFC 54 adicional en la línea de salida 55 para controlar de manera precisa la cantidad de mezcla de gas que sale de la cámara sellada 49 y fluye a la cámara de proceso 11.

A medida que la mezcla de gas sale de la cámara sellada 49, la presión parcial del XeF_2 descenderá y aumentará la sublimación de los cristales de XeF_2 50 para restablecer la presión de vapor. Mediante el análisis del flujo del gas 51 de presurización, la presión de cámara sellada y el flujo de la mezcla de gas que sale de la cámara sellada 49, puede establecerse un control de proceso cuidadoso.

Mantener una presión más alta en la cámara sellada 49 permite un control preciso del flujo de gas a la cámara de proceso 11 utilizando el MFC 54 adicional. Tras detener el flujo del gas 51 de presurización y abrir la válvula de salida 56 de la cámara sellada 49, fluye vapor de XeF_2 a la cámara de proceso 11. El gas puede bombearse alejándose y a través de la cámara de proceso 11 por la bomba de vacío 17. La presión de cámara será una indicación de la cantidad de XeF_2 que fluye al interior de la cámara de proceso 11. La cantidad de flujo de XeF_2 es una indicación de la velocidad de sublimación de los cristales de XeF_2 50 en la cámara sellada 49. La velocidad de sublimación del XeF_2 depende de diversos parámetros incluyendo principalmente la cantidad de cristales de XeF_2 50 presentes en la cámara sellada 49, la temperatura de los cristales, el tamaño de cristal y la

densidad de relleno, y las geometrías de la cámara de proceso 11 y la cámara sellada 49. Determinar la velocidad de sublimación del XeF_2 proporciona una indicación directa de la cantidad de cristales de XeF_2 50 que permanecen en la cámara sellada 49. Esto puede utilizarse para monitorizar el consumo de XeF_2 en la cámara de proceso 11 e indicar cuándo se requiere reemplazar o rellenar la cámara sellada 49.

5 Cerrar la válvula de la bomba de vacío 17 detiene el gas que fluye fuera de la cámara de proceso 11 y la presión comienza a elevarse determinada por la cantidad de vapor de XeF_2 que fluye al interior de la cámara de proceso 11. La elevación de la presión de la cámara de proceso puede monitorizarse y se denomina normalmente velocidad de elevación. La cantidad de gas que fluye se determina por la velocidad de sublimación de los
10 cristales de XeF_2 50 en la cámara sellada 49. La presión en la cámara de proceso 11 se elevará de una forma distintiva, tal como se muestra en el gráfico de la figura 15. Inicialmente la velocidad de elevación será rápida y entonces a medida que la presión de cámara de proceso aumenta la velocidad de elevación disminuirá. La velocidad de elevación tenderá entonces a cero a medida que la presión de cámara de proceso tiende a la presión de vapor del XeF_2 . La rapidez de la velocidad de elevación y los cambios monitorizados se determinarán
15 directamente por el flujo de vapor de XeF_2 que a su vez se determina por la velocidad de sublimación de los cristales de XeF_2 50. Esto también puede utilizarse para monitorizar el consumo de XeF_2 en la cámara de proceso 11 e indicar cuándo se requiere que se reemplace o rellene la cámara sellada 49.

20 Puede utilizarse tal técnica para monitorizar el flujo de vapor como resultado de la sublimación a partir de cualquier sólido o vaporización a partir de cualquier líquido para determinar la cantidad de material que permanece en una cámara sellada 49 cerrada.

25 En la fuente de gas de grabado mostrada en la figura 16, se utiliza un flujómetro másico (MFM) 58 para monitorizar la salida de flujo de gas desde la cámara sellada 49. El flujo medido es una combinación del flujo de gas portador y el flujo de vapor de XeF_2 . Se conoce flujo de gas portador en la medida en que lo controla el MFC 52 a su entrada a la cámara sellada 49. Restando este flujo a la lectura del MFM y utilizando el factor de corrección apropiado para el MFM 58 puede determinarse el flujo de vapor de XeF_2 .

30 Para mantener un flujo de vapor de XeF_2 consistente, pueden realizarse cambios automáticamente haciendo que la lectura del MFM y el control de MFC formen parte de un bucle de realimentación controlado por software de sistema.

35 Pueden utilizarse cambios en el flujo de vapor de XeF_2 con respecto al flujo de gas portador para determinar la bajada de XeF_2 y la cantidad de cristales de XeF_2 50 presentes en la cámara sellada 49. Esto proporciona aún otro método alternativo para monitorizar el consumo de XeF_2 en la cámara de proceso 11 para determinar cuándo se requiere que se reemplace o rellene la cámara sellada 49.

40 Monitorizar constantemente el flujo de gas de XeF_2 permite determinar la cantidad de XeF_2 que sale de la cámara sellada 49. Esto puede utilizarse de nuevo para monitorizar la utilización de XeF_2 . Mantener un registro acumulativo de la utilización y compararlo con un valor inicial puede, por tanto, utilizarse también para indicar cuándo se requiere que se reemplace o rellene la cámara sellada 49.

45 En esta fuente de gas de grabado 48 basada en una única cámara sellada 49, dado que los cristales de XeF_2 50 se consumen hasta un nivel en el que la cantidad de cristales que permanecen son insuficientes para saturar el flujo de gas portador, la cantidad de vapor de XeF_2 recogido por el gas portador baja con respecto a la cantidad de cristales de XeF_2 50 que permanecen en la cámara sellada 49. El MFM 58 en la línea de salida 55 desde la cámara sellada 49 medirá el flujo de gas, y el análisis detectará cambios en el flujo de XeF_2 y por tanto determinará cambios en la recogida de vapor de XeF_2 . Para compensar la bajada en recogida de XeF_2 , puede aumentarse el flujo de gas portador. Sin embargo, esto cambia el flujo de gas y, por consiguiente, la
50 concentración de vapor de material de grabado en la cámara de proceso 11. Para mantener un flujo consistente de gas y concentración de vapor de XeF_2 a la cámara de proceso 11 se utiliza otra línea de suministro de gas 59 para compensar el cambio necesario en la línea de salida 55. La fuente de gas de grabado correspondiente se muestra en la figura 17. A medida que se aumenta el flujo de gas portador a la cámara sellada 49 para ajustarse a la bajada de la recogida de XeF_2 , el suministro 65 de gas en la otra línea de suministro de gas 59 se reduce la misma cantidad utilizando el MFC 66 adicional de manera que el suministro de gas a la cámara de proceso 11 se mantiene con respecto al flujo de gas y la concentración de mezcla.

60 Es necesario que el flujo de gas inicial en la otra línea de suministro de gas 59 sea lo suficientemente alto como para permitir el aumento en el flujo de gas portador para compensar el flujo de XeF_2 reducido. La otra línea de suministro de gas 59 hace fluir preferiblemente el mismo gas que la línea de suministro de gas portador. El aparato descrito anteriormente proporciona varias ventajas significativas con respecto a aquellas fuentes de gas de grabado y sistemas relacionados descritos en la técnica anterior. En el primer caso, la utilización de un sistema de suministro de gas de grabado permite un suministro continuo controlado del gas de grabado que va a proporcionarse a la cámara de proceso. Los expertos en la materia apreciarán que el coste de cristales de XeF_2
65 se ha reducido significativamente en los últimos años, haciendo por tanto que progresar a un sistema de flujo continuo sea significativamente más favorable de lo que se consideró anteriormente. El empleo del aparato

- descrito da como resultado un sistema de flujo continuo que mantiene la presión parcial del vapor de grabado a la presión parcial máxima (~533 Pa (~4 Torr) a temperatura ambiente para XeF_2) a lo largo de la totalidad del proceso de grabado. Esta presión se mantiene siempre y cuando haya suficientes cristales de XeF_2 para proporcionar el vapor a la velocidad de flujo requerida. Por tanto, la presente invención proporciona la máxima velocidad de grabado obtenible y mantiene esta velocidad a lo largo de la totalidad del proceso de grabado, es decir, no hay ninguna bajada en la velocidad de grabado tal y como se experimentaba por los sistemas de técnica anterior.
- 5
- 10 Aún una ventaja adicional es que empleando una velocidad de bombeo baja dentro del sistema, puede maximizarse el tiempo de residencia del vapor de grabado dentro de la cámara de proceso. En la práctica, la velocidad de bombeo se establece para optimizar el tiempo de residencia del vapor de XeF_2 dentro de la cámara de proceso y para retirar los productos derivados del grabado, maximizando por tanto la velocidad de grabado con un consumo de cristales de XeF_2 mínimo.
- 15 Una ventaja adicional del aparato descrito es que no requiere la incorporación de ninguna cámara de expansión u otras características mecánicas complicadas para lograr el flujo continuo de gas de grabado. Por tanto, el aparato actualmente descrito presenta un diseño significativamente más simple y por tanto es más económico de producir y hacer funcionar que aquellos sistemas descritos dentro de la técnica anterior.
- 20 La descripción de la invención anterior se ha presentado con fines de ilustración y descripción y no se pretende que sea exhaustiva o limite la invención a la forma precisa dada a conocer. Las realizaciones descritas se escogieron y describieron para explicar de la mejor manera los principios de la invención y su aplicación práctica para permitir por tanto a otros expertos en la materia utilizar la invención de la mejor manera en diversas realizaciones y con diversas modificaciones como sean adecuadas para la utilización particular de la invención
- 25 contemplada.

Por tanto, pueden incorporarse modificaciones o mejoras adicionales a las realizaciones de la invención descritas sin apartarse del alcance de la invención que está definido por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Método para grabar una o más microestructuras ubicadas dentro de una cámara de proceso (11), comprendiendo el método las etapas siguientes:

a) transformar un material de grabado dentro de una cámara sellada (27; 49) desde un primer estado en un vapor de material de grabado;

b) emplear un gas portador para la cámara sellada (27; 49) para transportar el vapor de material de grabado desde la cámara sellada (27; 49) y a continuación, suministrar el vapor de material de grabado a la cámara de proceso (11); y

c) controlar la cantidad de vapor de material de grabado dentro de la cámara de proceso (11) controlando la velocidad de bombeo de vacío desde la cámara de proceso (11),

caracterizado por que se selecciona una velocidad a la cual se suministra el vapor de material de grabado a la cámara de proceso (11) en respuesta a una velocidad de grabado deseada y una velocidad de retirada del vapor de material de grabado desde la cámara de proceso (11).

2. Método según lo descrito en la reivindicación 1, en el que el material de grabado comprende XeF_2 .

3. Método según lo descrito en la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el método comprende la etapa adicional de emplear un gas de proceso de entrada adicional para la cámara de proceso (11), y en el que la etapa de controlar la cantidad de vapor de material de grabado dentro de la cámara de proceso (11) comprende además la etapa de seleccionar una velocidad de suministro del gas portador a la cámara de proceso (11) y seleccionar una velocidad de suministro del gas de proceso de entrada adicional a la cámara de proceso (11).

4. Método según lo descrito en la reivindicación 3, en el que la etapa de seleccionar la velocidad de suministro del gas portador a la cámara de proceso (11) y seleccionar la velocidad de suministro del gas de proceso de entrada adicional a la cámara de proceso (11) comprende la etapa de aumentar de manera selectiva la velocidad de suministro del gas portador a la cámara de proceso (11) mientras se reduce de manera selectiva la velocidad de suministro del gas de proceso de entrada adicional a la cámara de proceso (11) de manera que el suministro de gas portador, el vapor de material de grabado, y el gas de proceso de entrada adicional a la cámara de proceso (11) se mantenga con respecto al flujo de gas y a la concentración de mezcla.

5. Método según lo descrito en la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que las etapas (a) y (b) se repiten para garantizar que el gas portador para la cámara de proceso (11) se satura con el vapor de material de grabado.

6. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la transformación del material de grabado comprende una sublimación del material de grabado; el primer estado es un sólido.

7. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que la transformación del material de grabado comprende una vaporización del material de grabado; el primer estado es un líquido.

8. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el gas portador para la cámara de proceso (11) también funciona como un refrigerante para el grabado de dicha una o más microestructuras dentro de la cámara de proceso (11).

9. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el gas portador para la cámara sellada (27; 49) recoge el vapor de material de grabado en la cámara sellada (27; 49) y se aumenta la eficacia de la recogida del vapor de material de grabado por el gas portador en la cámara sellada (27; 49) mediante la adición de vacíos mecánicos artificiales al material de grabado en la cámara sellada (27; 49).

10. Método según lo descrito en la reivindicación 9, en el que la adición de material (33) de relleno al material de grabado en la cámara sellada (27; 49) crea los vacíos mecánicos artificiales en la cámara sellada (27; 49).

11. Método según lo descrito en la reivindicación 9 o la reivindicación 10, en el que los vacíos mecánicos artificiales crean múltiples caminos en la cámara sellada (27; 49) a través de los cuales puede propagarse el gas portador en la cámara sellada (27; 49), de tal manera que se aumente una zona de contacto entre el gas portador en la cámara sellada (27; 49) y el material de grabado en la cámara sellada (27; 49).

12. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el gas portador para la cámara sellada (27; 49) recoge el vapor de material de grabado en la cámara sellada (27; 49) y se aumenta la eficacia de la recogida del vapor de material de grabado por el gas portador en la cámara sellada (27; 49) agitando el material de grabado en la cámara sellada (27; 49).

- 5 13. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se aumenta la eficacia del método para grabar calentando el material de grabado en la cámara sellada (27; 49) con el fin de mantener el material de grabado en la cámara sellada (27; 49) a una temperatura predeterminada constante.
14. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que una presión parcial del vapor de material de grabado dentro de la cámara de proceso (11) es mantenida por debajo de una presión de vapor del material de grabado.
- 10 15. Método según lo descrito en la reivindicación 14, en el que se aumenta la presión parcial del vapor de material de grabado dentro de la cámara de proceso (11) aumentando la temperatura del material de grabado en la cámara sellada (27; 49).
- 15 16. Método según lo descrito en la reivindicación 14 o la reivindicación 15, en el que se aumenta la velocidad a la que se produce el grabado aumentando la presión parcial del vapor de material de grabado dentro de la cámara de proceso (11).
- 20 17. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el método comprende la etapa adicional de seleccionar una presión parcial del vapor de material de grabado dentro de la cámara de proceso (11) en respuesta a un tamaño de dicha una o más microestructuras que van a grabarse.
- 25 18. Método según lo descrito en la reivindicación 1, en el que el método comprende la etapa adicional de proporcionar una etapa de ruptura en la que se graba una capa de óxido nativo.
- 30 19. Método según lo descrito en la reivindicación 18, en el que la etapa de ruptura comprende añadir un fluido seleccionado para reaccionar con el vapor de material de grabado dentro de la cámara de proceso (11), cuyo producto graba la capa de óxido nativo.
- 35 20. Método según lo descrito en la reivindicación 19, en el que la etapa de ruptura además comprende descomponer el vapor de material de grabado dentro de la cámara de proceso (11) utilizando una fuente de energía tal como un plasma, un haz de iones o luz UV.
- 40 21. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el método comprende las etapas adicionales siguientes:
- 45 1). impedir un suministro del gas portador a la cámara sellada (27; 49);
- 2). emplear una bomba de vacío (17) para bombear el vapor de material de grabado desde la cámara sellada (27; 49) hasta la cámara de proceso (11); y
- 3). medir una presión en la cámara de proceso (11);
- en el que la etapa de medir la presión en la cámara de proceso (11) proporciona unos medios para determinar una cantidad de material de grabado en la cámara sellada (27; 49).
- 50 22. Método según lo descrito en la reivindicación 21 en el que la cantidad de material de grabado en la cámara sellada (27; 49) se determina determinando una velocidad de sublimación del material de grabado en la cámara sellada (27; 49).
- 55 23. Método según lo descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que método comprende las etapas adicionales siguientes:
- i). impedir un flujo de gas fuera de la cámara de proceso (11);
- ii). monitorizar una subida de presión en la cámara de proceso (11); y
- iii). determinar una velocidad de subida de presión en la cámara de proceso (11); en el que la etapa de determinar la velocidad de subida de presión en la cámara de proceso (11) proporciona unos medios de monitorización del consumo de material de grabado en la cámara sellada (27; 49).
- 60 24. Método según lo descrito en la reivindicación 23, que además comprende las etapas adicionales siguientes:
- iv). medir un flujo de gas portador para la cámara sellada (27; 49);
- 65 v). medir un flujo de masa total de vapor de material de grabado y gas portador que sale de la cámara sellada (27; 49); y

- 5 vi). determinar un flujo de vapor de material de grabado que sale de la cámara sellada (27; 49) a partir del flujo de masa total de vapor de material de grabado y gas portador que sale de la cámara sellada (27; 49) y el flujo de gas portador para la cámara sellada (27; 49); en el que la etapa de determinar el flujo de vapor de material de grabado que sale de la cámara sellada (27; 49) proporciona unos medios de realimentación para controlar el flujo de gas portador para la cámara sellada (27; 49) con el fin de proporcionar un suministro controlado de vapor de material de grabado a la cámara de proceso (11).

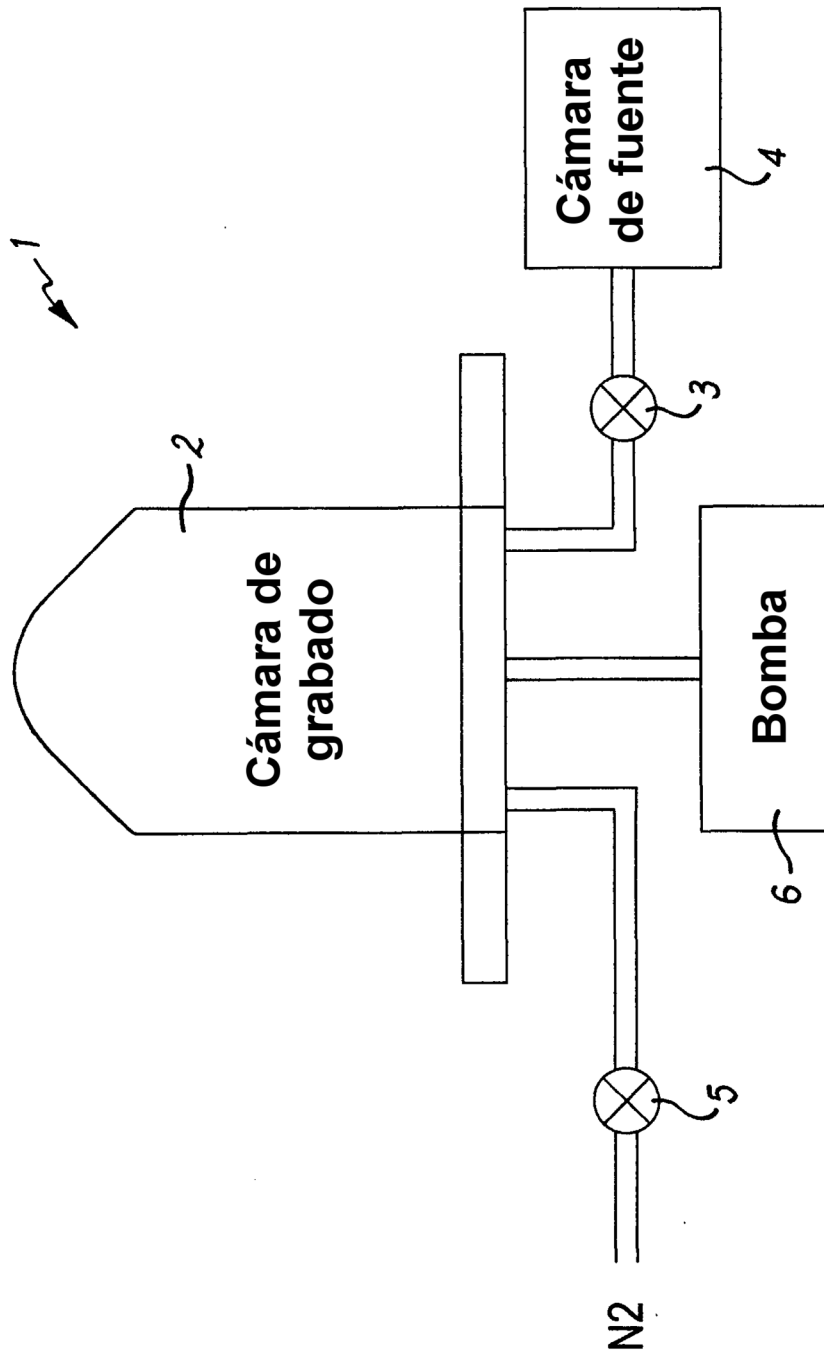


Fig. 1
(Técnica anterior)

7 ↘

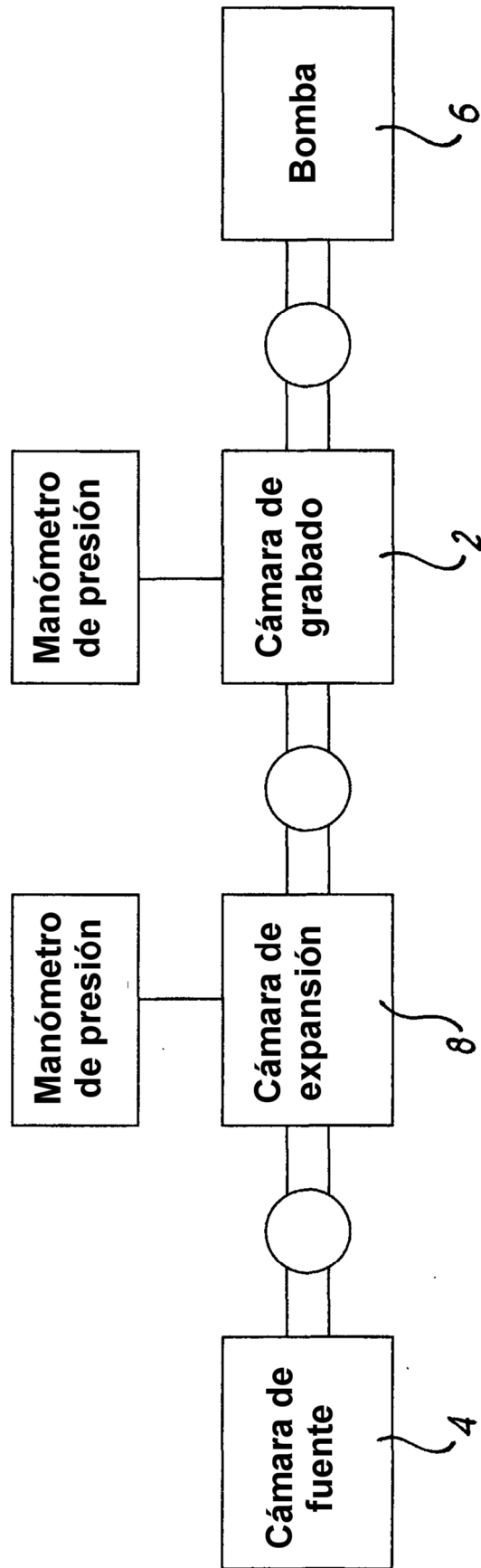


Fig. 2
(Técnica anterior)

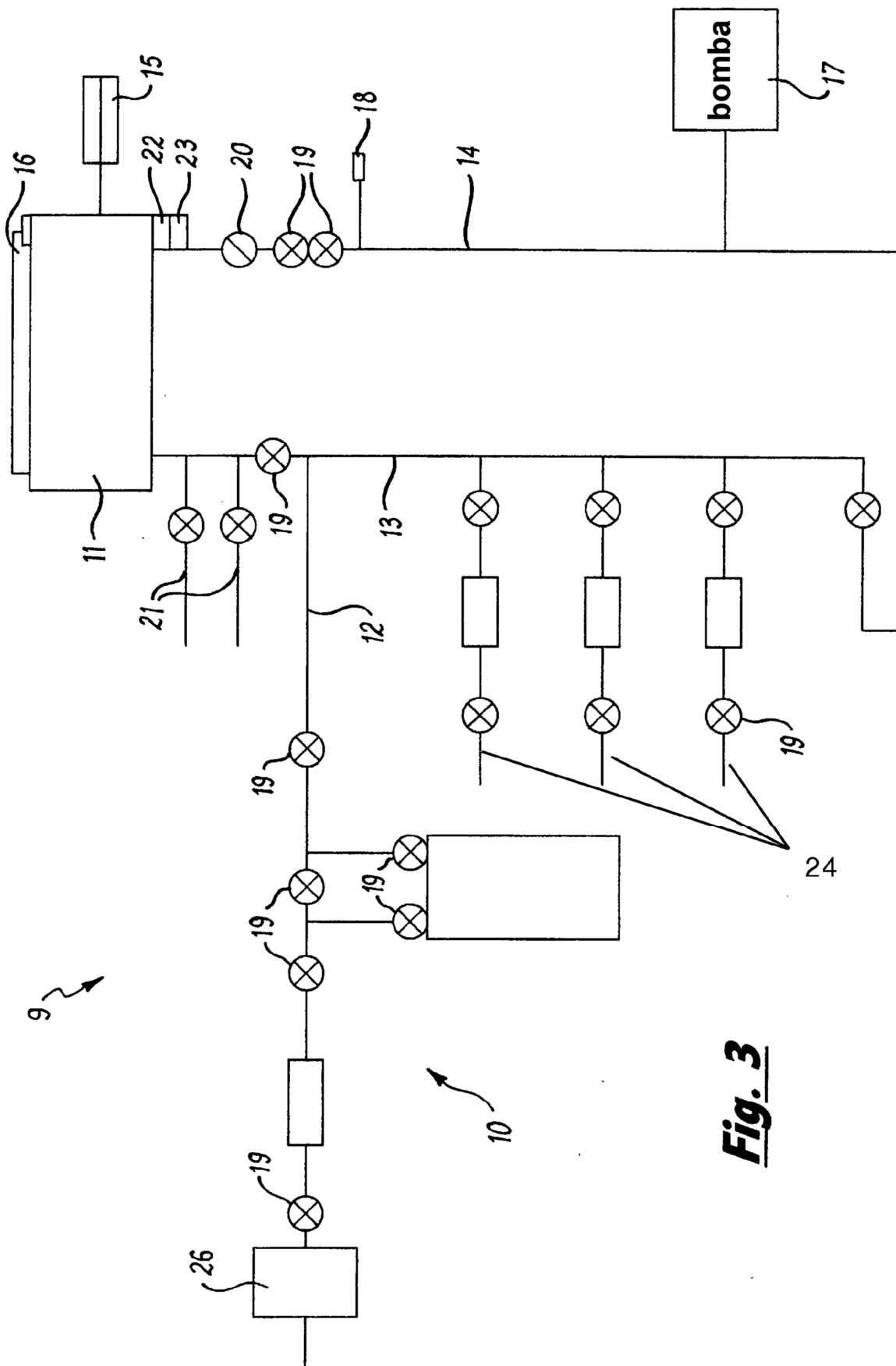


Fig. 3

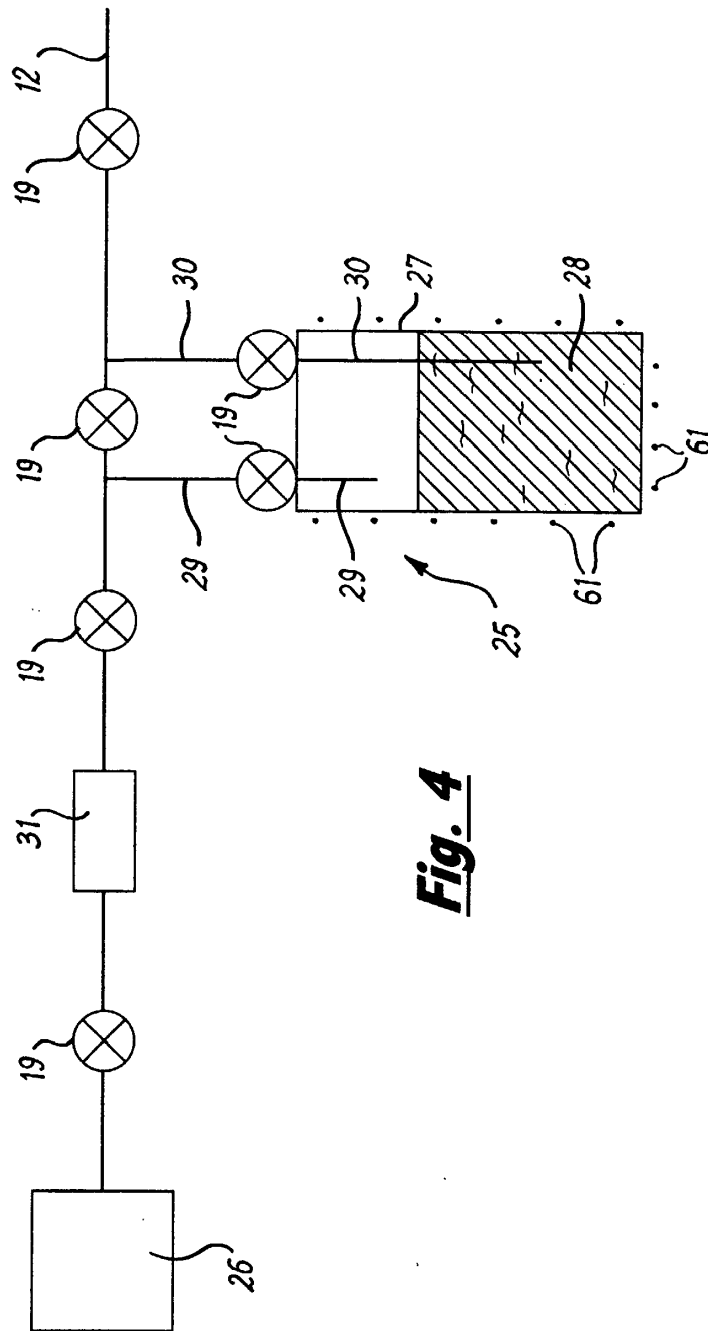


Fig. 4

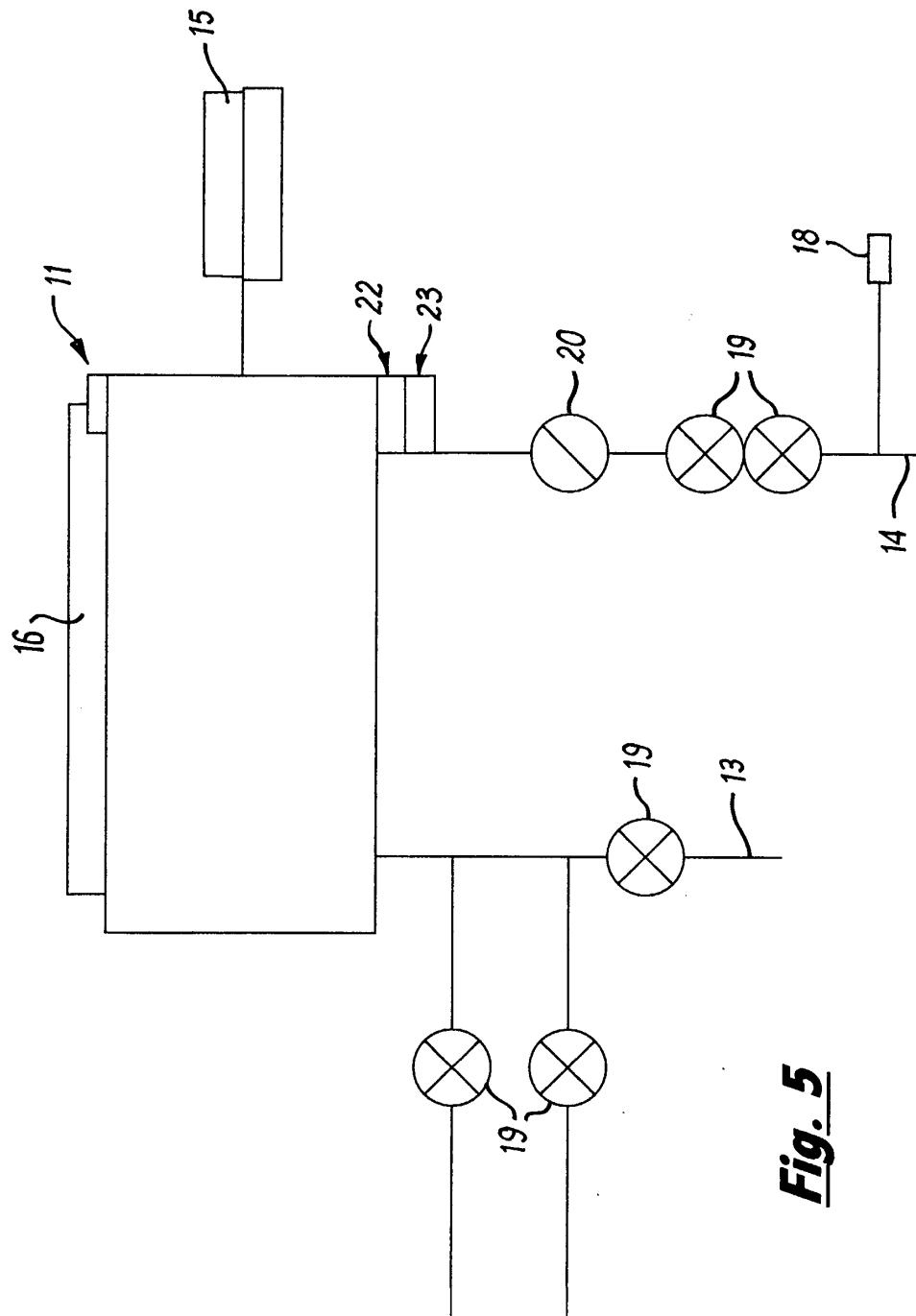
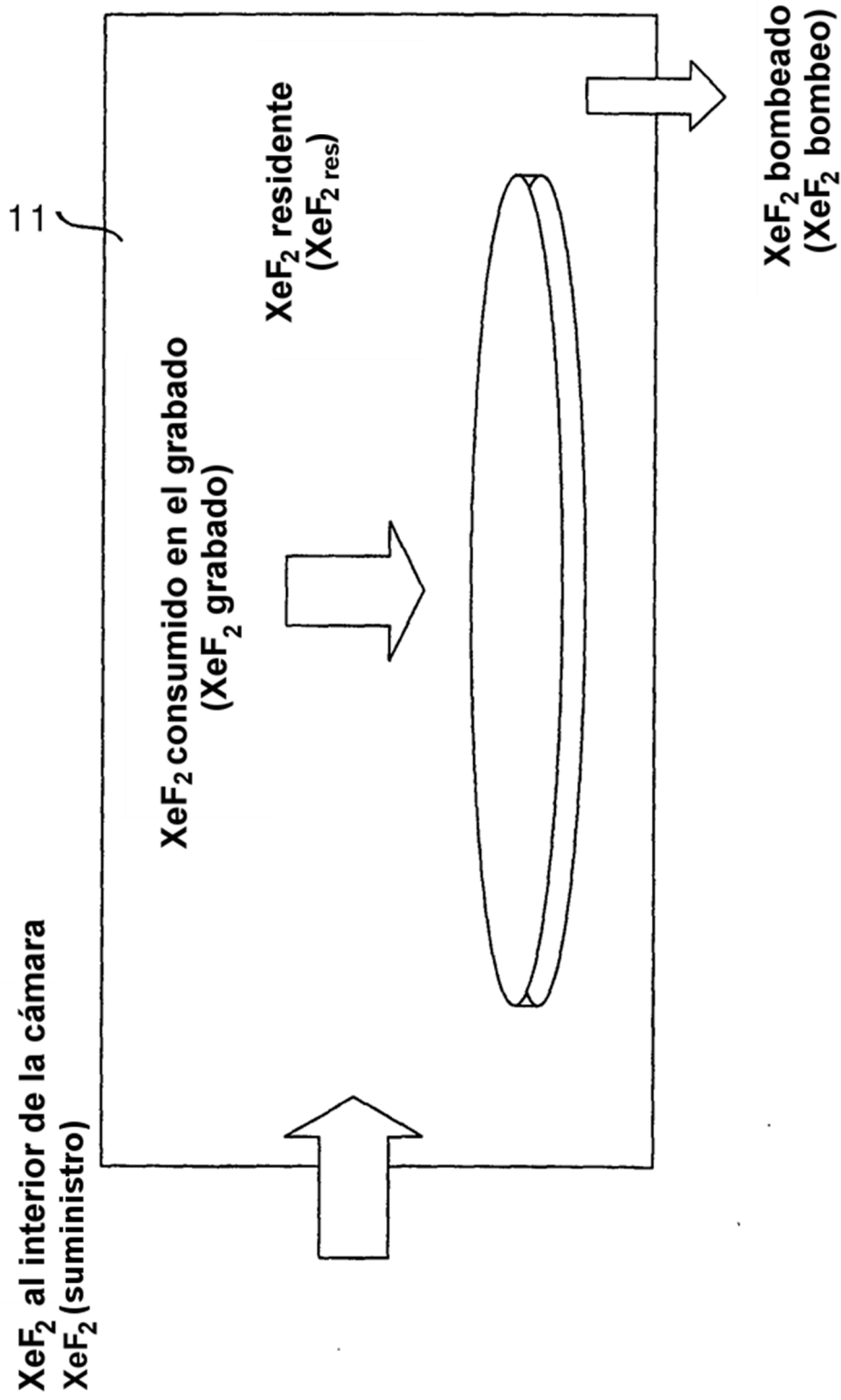


Fig. 5



$$\text{XeF}_2 \text{ suministro} = \text{XeF}_2 \text{ grabado} + \text{XeF}_2 \text{ res} + \text{XeF}_2 \text{ bombeo}$$

Fig. 6

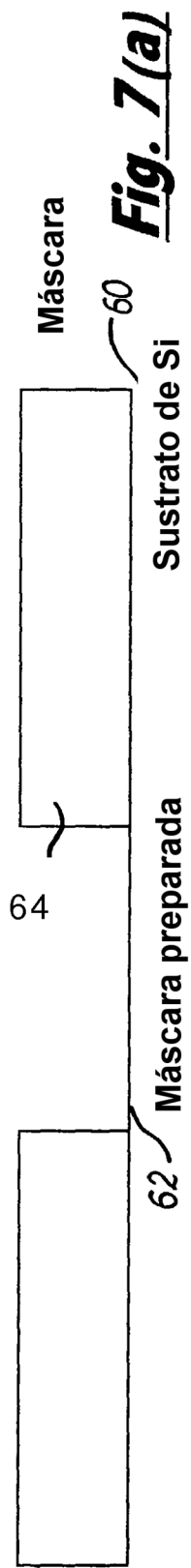
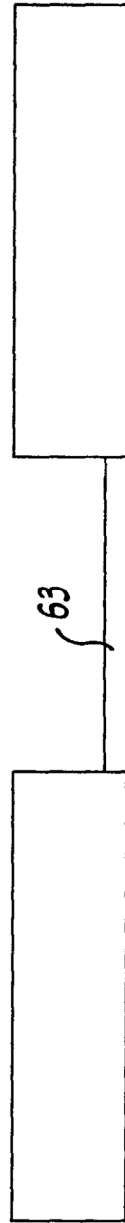
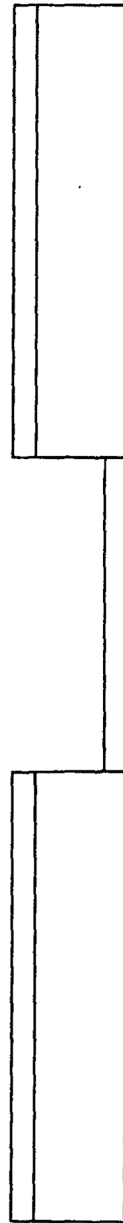


Fig. 7(b)



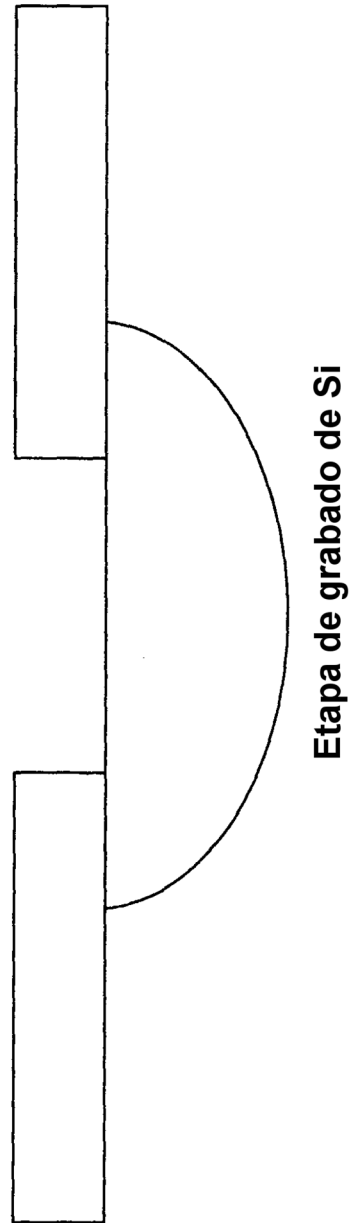
Si expuesto desarrolla óxido nativo

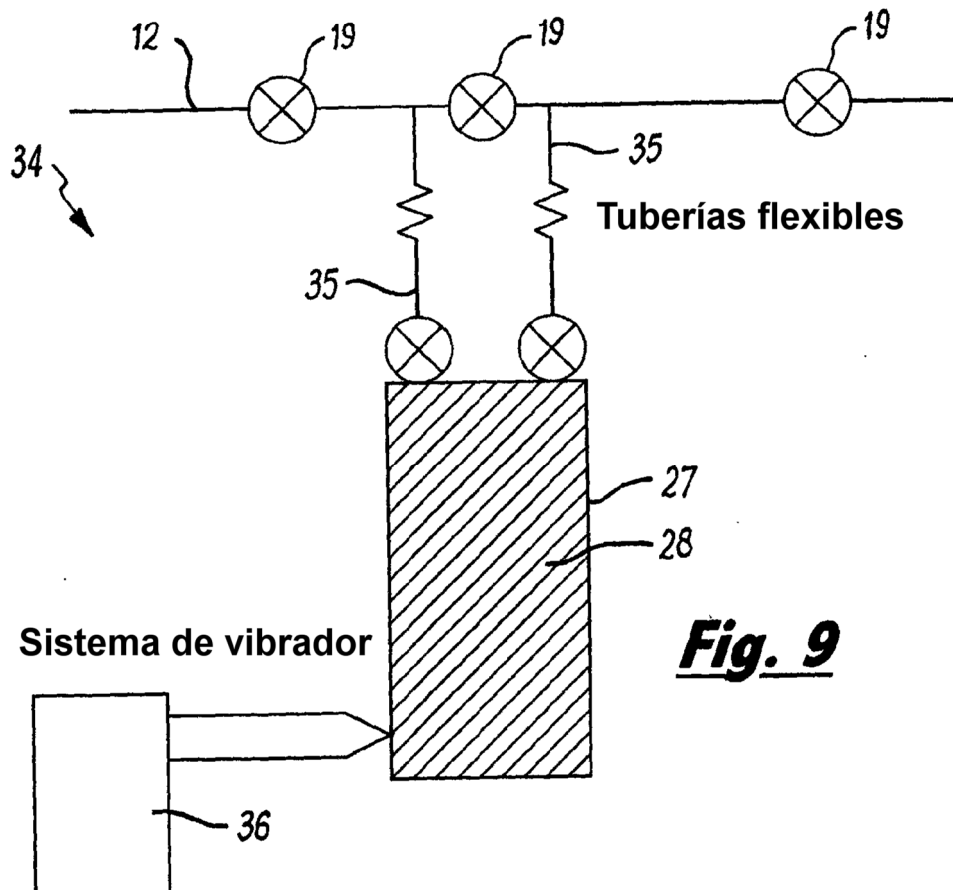
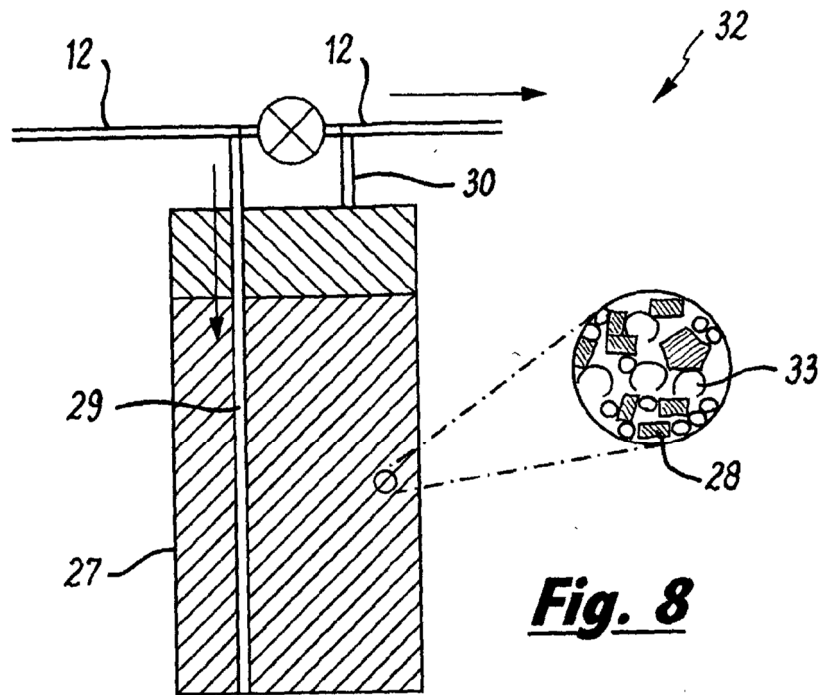
Fig. 7(c)



La etapa de ruptura retira el óxido nativo

Fig. 7(d)





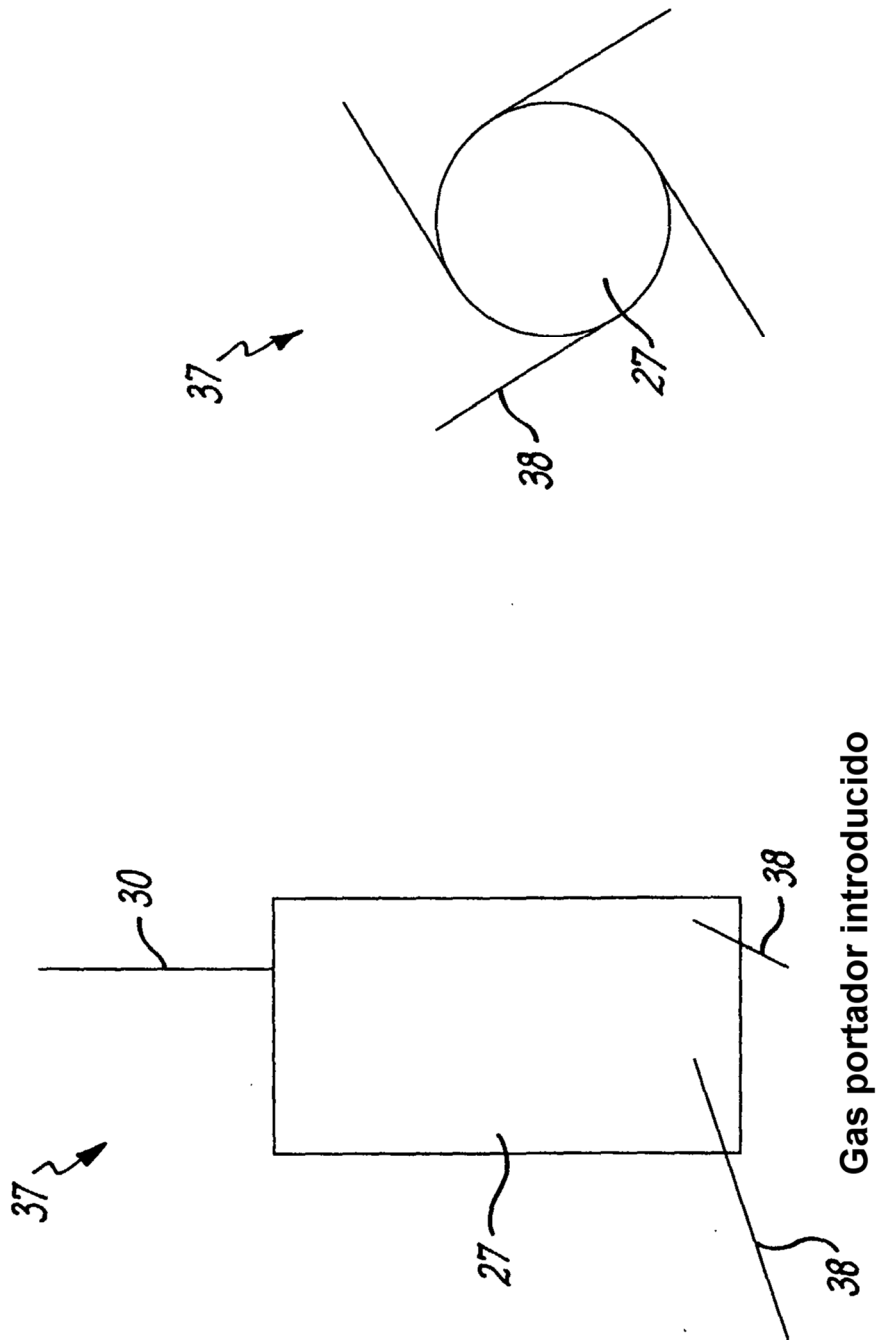
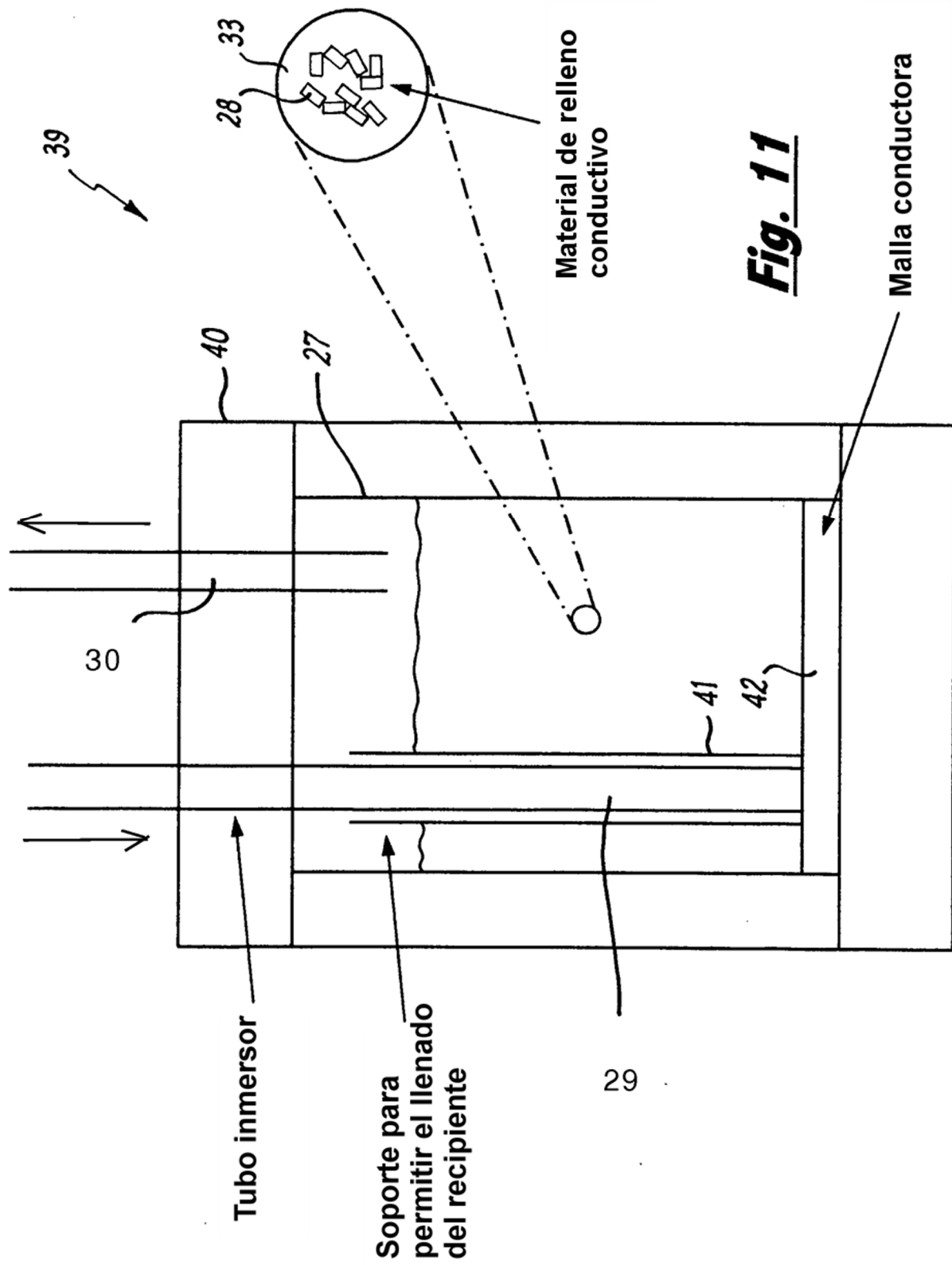


Fig. 10(a)

Fig. 10(b)



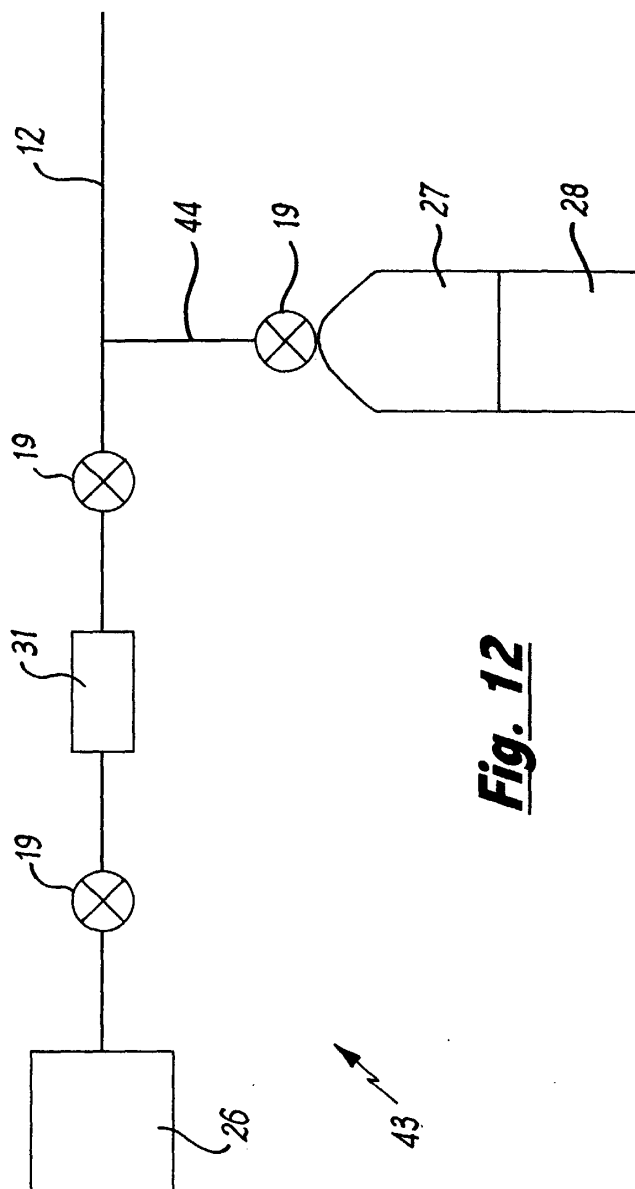


Fig. 12

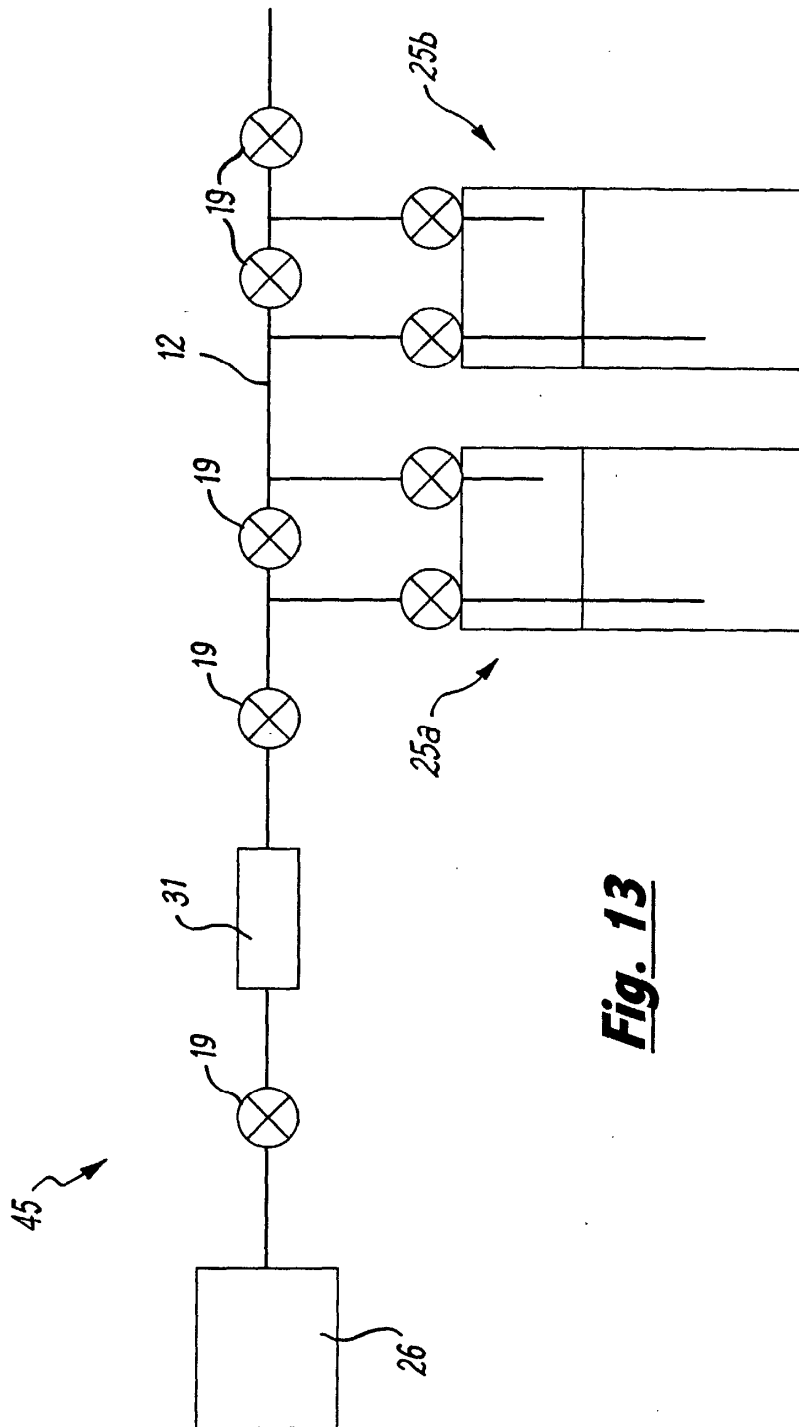


Fig. 13

48

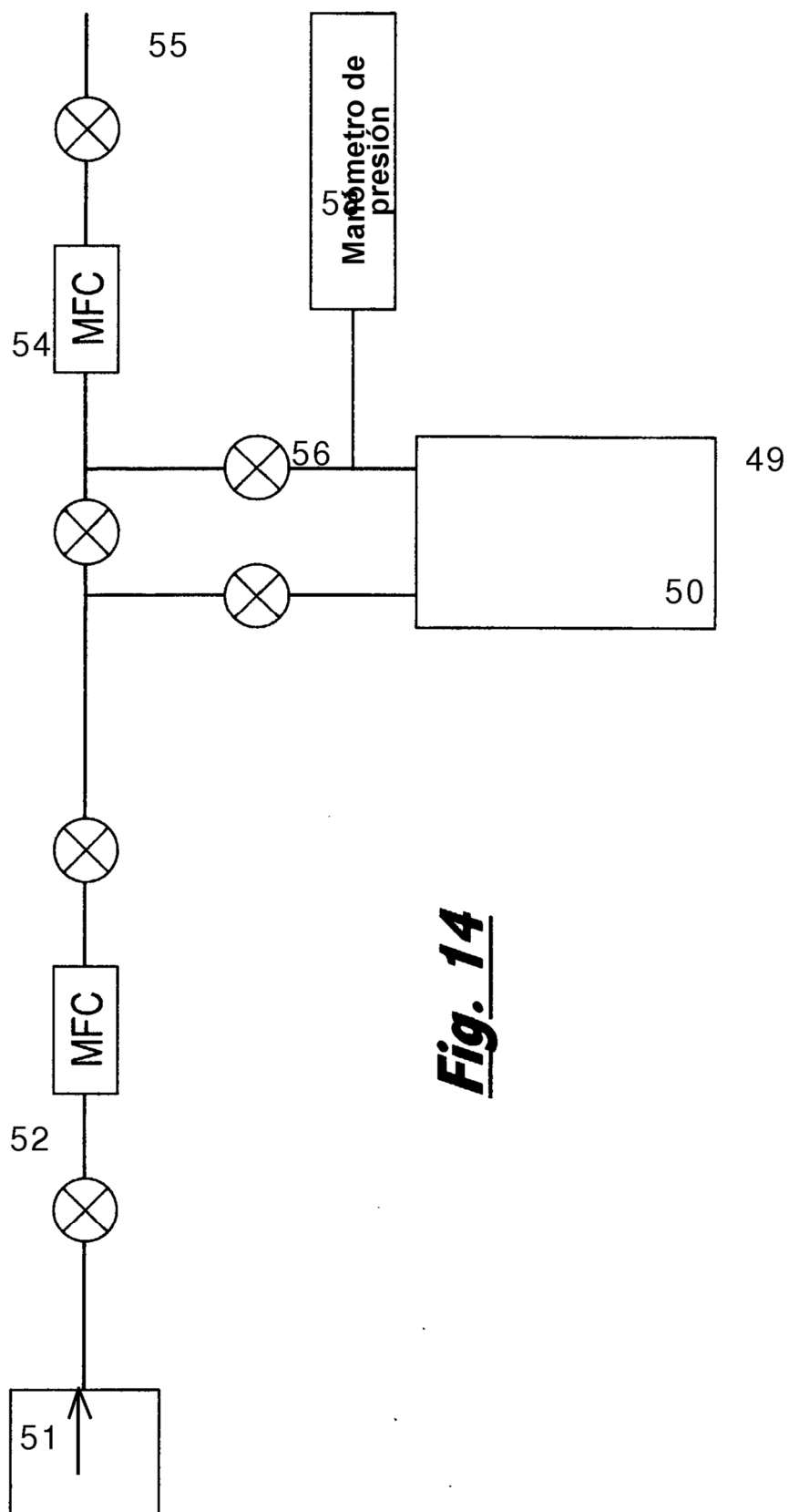


Fig. 14

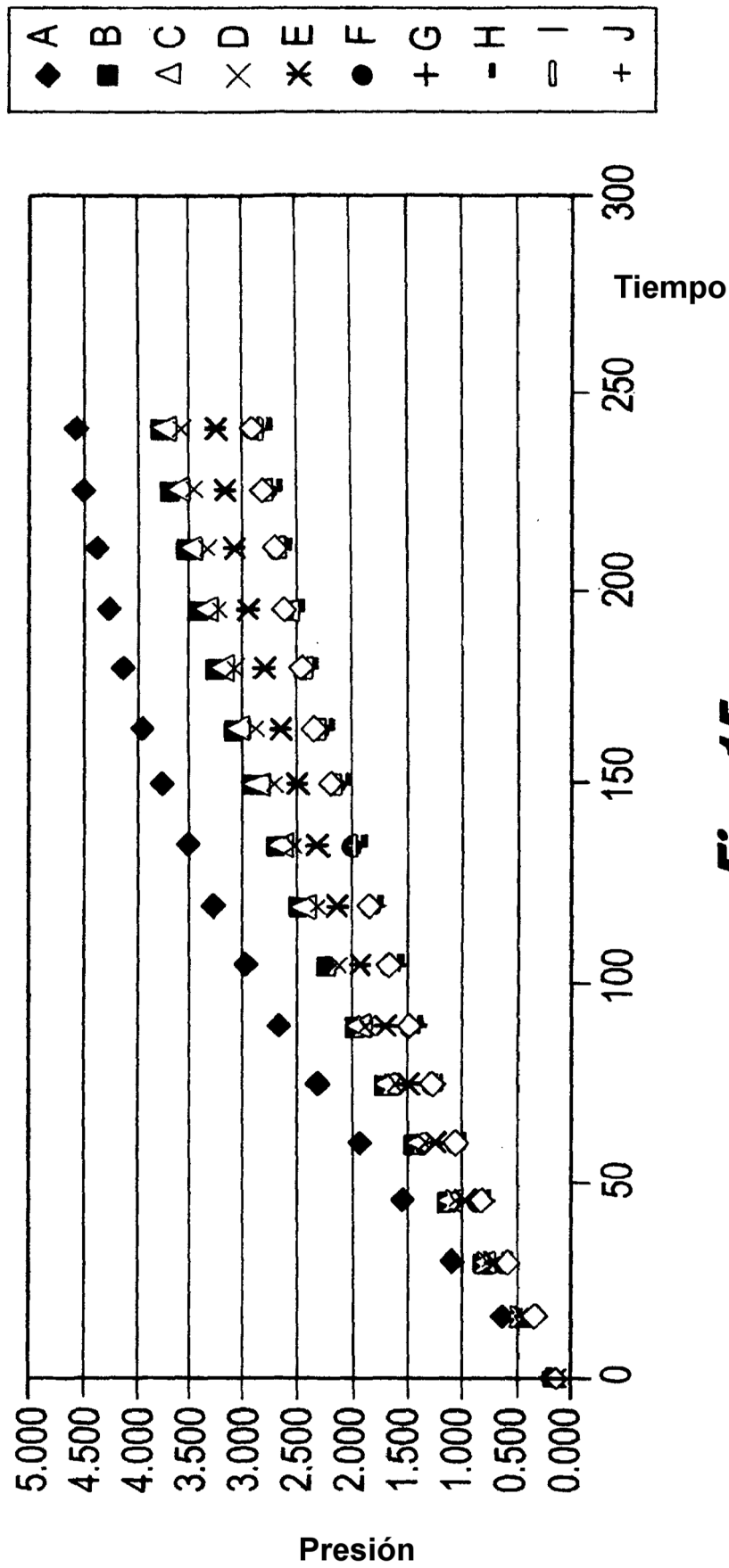
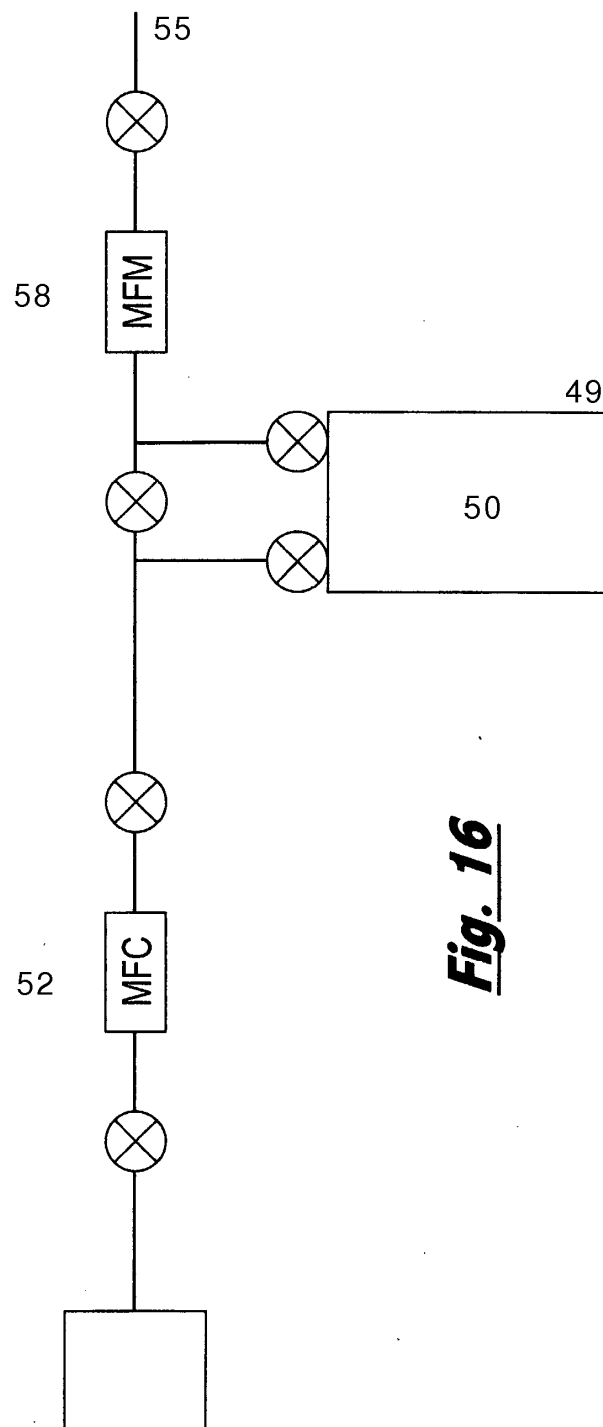


Fig. 15



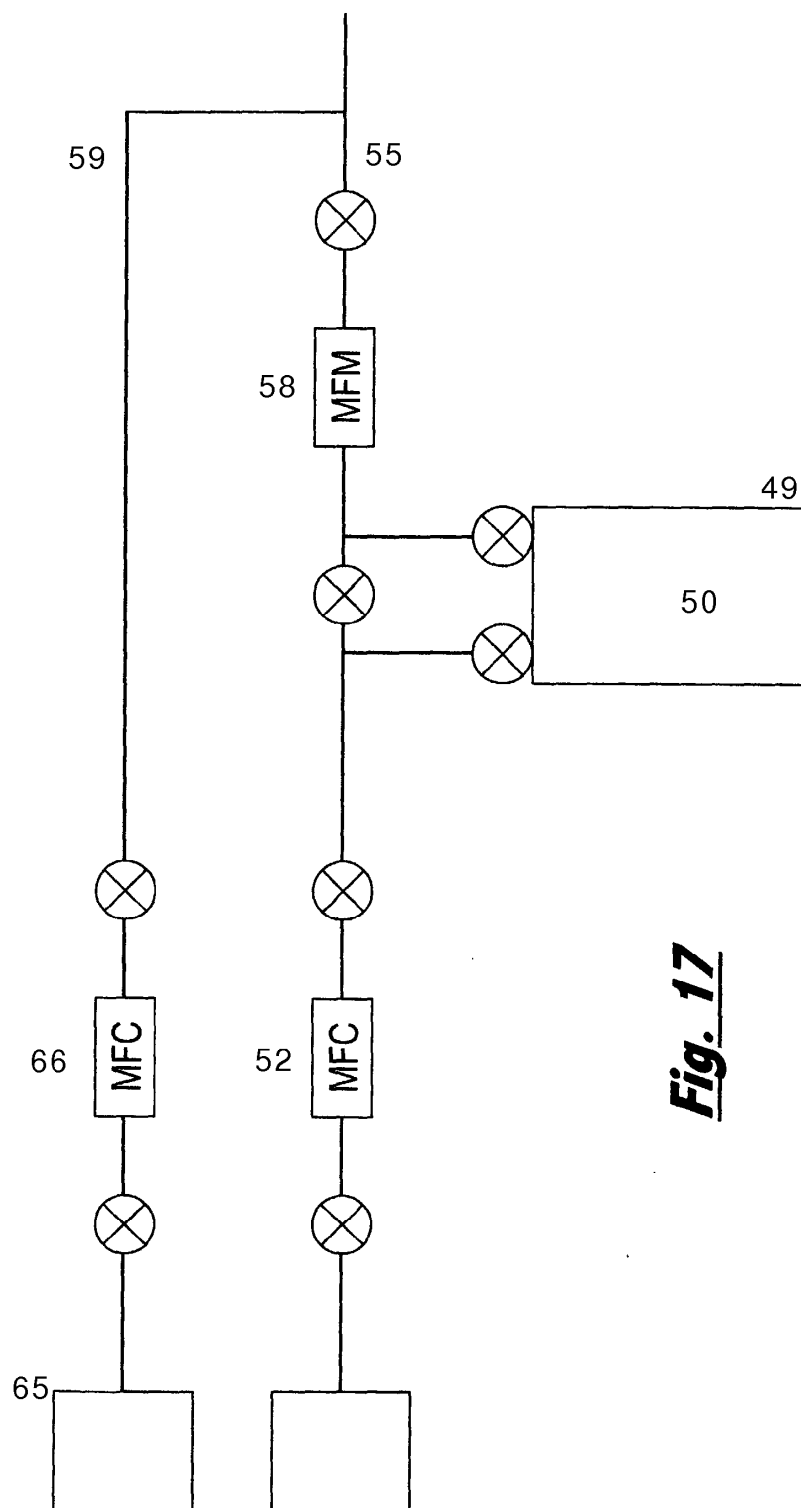


Fig. 17