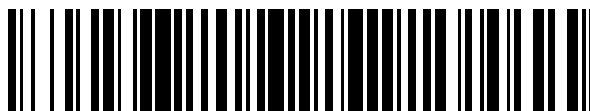


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 890 248**

51 Int. Cl.:

C01B 3/24 (2006.01)

C01B 3/28 (2006.01)

H01J 37/32 (2006.01)

H05H 1/46 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.08.2011** **PCT/NO2011/000224**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.02.2012** **WO12023858**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.08.2011** **E 11751678 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.06.2021** **EP 2606003**

54 Título: **Un aparato, un sistema y un método para producir hidrógeno**

30 Prioridad:

17.08.2010 NO 20101156

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

18.01.2022

73 Titular/es:

GASPLAS AS (100.0%)
P.O. Box 1001 Hoff
0218 Oslo, NO

72 Inventor/es:

RISBY, PHILLIP JOHN

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 890 248 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

Un aparato, un sistema y un método para producir hidrógeno

5 Campo de la invención

La invención se refiere al campo de la producción de hidrógeno. En particular, pero no exclusivamente, la invención se refiere a un dispositivo para producir hidrógeno usando plasma generado por microondas y un método asociado para producir hidrógeno.

10

Antecedentes de la invención

Con el enfoque actual en reducir las emisiones nocivas de plantas industriales, edificios, automóviles y otros vehículos causadas por su combustión de hidrocarburos, se ha investigado mucho para desarrollar fuentes de energía alternativas, tales como el hidrógeno.

15

Si bien la adopción de alternativas a los combustibles de hidrocarburos ofrece la oportunidad de un vehículo más respetuoso con el medio ambiente, el proceso mediante el cual se producen dichos combustibles alternativos está lejos de ser ideal. El hidrógeno, por ejemplo, se sintetiza actualmente mediante el craqueo catalítico de moléculas de hidrocarburos. Las altas temperaturas necesarias para que tenga lugar esta reacción se consiguen normalmente quemando petróleo o carbón, lo que da como resultado la emisión de más contaminantes medioambientales. Además, el proceso de generación de hidrógeno por electrólisis del agua consume más energía de la que se almacena en el hidrógeno producido. Si la electricidad consumida se produce a partir de fuentes de hidrocarburos, el resultado general es aún peor para el medio ambiente. Por lo tanto, se considera que los actuales procesos comerciales de producción de hidrógeno generan un mayor volumen de gases de efecto invernadero nocivos por cuota de energía útil de hidrógeno que la combustión directa del combustible que el hidrógeno pretende reemplazar. En otras palabras, actualmente el hidrógeno no es un combustible limpio cuando se tiene en cuenta su producción.

20

25

Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar un proceso capaz de producir hidrógeno con alta eficiencia y un impacto ambiental significativamente menor que el disponible actualmente. Idealmente, un proceso de este tipo sería altamente flexible en el sentido de que debería admitir fácilmente su funcionamiento a pequeña, mediana y gran escala comercial. Un método que ofrece el potencial de generar hidrógeno a costos ambientales más bajos que los sistemas comerciales existentes utiliza el procesamiento de plasma. En el procesamiento de plasma, los gases o líquidos que contienen hidrógeno se introducen en una cámara en la que se ionizan para formar un plasma, por ejemplo, mediante la exposición a un campo de alta intensidad. En el estado de plasma, los constituyentes del material de alimentación se disocian y pueden extraerse por separado, recombinarse o reaccionar con materiales de alimentación adicionales, dependiendo del producto de salida requerido. El procesamiento de plasma también ofrece ventajas significativas y capacidades únicas, por ejemplo, en las áreas de craqueo, disociación y deposición (incluida la deposición de diamantes y la fabricación de productos activados), así como el pulido con gas.

30

35

40

Se sabe que existen diversas formas de plasma, generalmente categorizadas por sus características de energía y densidad: principalmente plasmas térmicos (también denominados plasmas de equilibrio) y plasmas de no equilibrio (también denominados plasmas no térmicos o fríos). Este último grupo incluye los producidos por RF, inducción, descarga de barrera, microondas y excitación láser. Los plasmas inducidos electromagnéticamente, en particular, ofrecen el potencial para un craqueo altamente eficiente de materiales de alimentación tanto gaseosos como líquidos debido a un acoplamiento de energía superior entre la fuente de energía, el plasma y la materia prima. Se ha demostrado que dichos plasmas tienen un efecto catalítico, como resultado del acoplamiento entre el campo electromagnético, particularmente de microondas, y el material de alimentación, que aumenta la velocidad de reacción, lo que a su vez reduce el tiempo durante el cual debe mantenerse el material de alimentación en el estado de plasma, es decir, el tiempo de residencia.

45

50

Generalmente, se considera que las microondas se refieren a la radiación electromagnética con una longitud de onda en el intervalo de 1 m a 1×10^{-2} m. La radiación electromagnética fuera de este intervalo aún puede generar plasma de manera efectiva, pero las fuentes de microondas representan una tecnología madura, ya que se han utilizado durante mucho tiempo en los campos de los hornos de microondas y radar y en la preparación industrial de alimentos. Por lo tanto, las fuentes de microondas de niveles de potencia adecuados están fácilmente disponibles para fines de calefacción doméstica e industrial.

55

Sin embargo, existe un problema en la ampliación de las cámaras de reacción que utilizan microondas generadas para operaciones comerciales de plasma. Por lo tanto, mientras que los plasmas de microondas ofrecen una ruta ideal para facilitar las reacciones y los procesos químicos, hasta la fecha, estos solo se han llevado a cabo a una escala relativamente pequeña y solo como un proceso por lotes.

60

Las fuentes de plasma generadas por microondas se pueden dividir en dos grupos: aquellas que operan a baja presión (típicamente por debajo de 10^{-1} bar y que producen plasmas de baja densidad adecuados para aplicaciones de activación y limpieza de superficies), y las que operan a baja presión alrededor de la presión atmosférica y superior,

65

produciendo plasma de alta intensidad adecuado para aplicaciones de craqueo y reacciones químicas/síntesis. Cualquier sistema comercial que pueda usarse para la disociación de combustible se basa preferiblemente en un sistema de “alta presión”, que permite un mayor rendimiento de los fluidos de alimentación, tiempos de residencia más cortos y un equipo de proceso relativamente compacto, ofreciendo así una producción de productos finales eficaz y energéticamente eficiente. Además, las considerables diferencias de presión que pueden ocurrir en un sistema de baja presión hacen que la adopción de un sistema de baja presión no sea práctica para el funcionamiento continuo y/o aplicaciones comerciales.

Se conocen dos tipos anteriores de generador de plasma atmosférico: un solo tubo de bajo volumen y un magnetrón único de mayor volumen. Si bien los reactores basados en ambos tipos han tenido cierto éxito a escala de laboratorio, ningún diseño ha demostrado ser lo suficientemente flexible para funcionar a escala comercial. Los del primer tipo están limitados en tamaño por las dimensiones de la guía de ondas requeridas para contener la radiación excitante. Es decir, la guía de ondas limita el tamaño del plasma. Por lo tanto, un límite fundamental en el diámetro del tubo del reactor lo establece la frecuencia de la fuente de microondas, lo que limita la aplicación a dispositivos a escala de laboratorio. Los del último tipo se basan en una cavidad de resonador para generar regiones localizadas de campos electromagnéticos de alta intensidad, que a su vez generan y sostienen el plasma. Por lo tanto, se requiere una alta potencia de microondas, tanto para generar el plasma como para suministrar energía suficiente al material de alimentación para su procesamiento. El tamaño del dispositivo está nuevamente limitado por la frecuencia y la potencia de la fuente de microondas, ya que se requiere que la cámara de reacción sea resonante. Por lo tanto, tanto la frecuencia de microondas como la potencia a la que se genera limitan el tamaño potencial de la cámara de un reactor en función de cualquiera de estos principios operativos.

Si bien es relativamente sencillo combinar plasmas de CA, CC, RF y HF para generar más plasma para el procesamiento, hasta ahora esto no ha sido posible de manera significativa con los plasmas de microondas. Las dificultades asociadas con las fuentes de microondas de bloqueo de fase para aumentar el volumen de plasma en una cámara de reactor son bien conocidas y están bien documentadas. Hay una serie de tecnologías para la generación de energía electromagnética de RF que pueden controlarse en frecuencia y fase. Con el fin de proporcionar el bloqueo de fase necesario para que múltiples fuentes de plasma se combinen de forma aditiva, los generadores de RF se pueden ajustar para garantizar que todos funcionen en la misma fase y frecuencia. Los generadores de microondas como un magnetrón o Klystron no tienen características de fase y frecuencia fácilmente ajustables. La potencia, frecuencia, fase y tamaño del resonador están todos interrelacionados y simplemente no es posible ajustar uno sin afectar negativamente la contribución del otro. Además, los magnetrones y Klystrons emiten microondas en una banda de frecuencia de un valor fundamental. Existen componentes importantes fuera de la frecuencia fundamental y estos pueden ampliarse lo suficiente como para retroalimentar y dañar la fuente de microondas. Se pueden usar aisladores para proteger la fuente, pero juntos el bloqueo de fase y los aisladores añaden un costo considerable y reducen la energía de microondas disponible. En la práctica, se ha logrado el bloqueo de fase del magnetrón, pero solo para muy pocas fuentes, en condiciones muy limitadas y con una complejidad considerable.

Un ejemplo de un dispositivo para la producción de plasma usando microondas se describe en el documento US 6,204,603. Este dispositivo hace uso de un resonador coaxial al que se acoplan las microondas. Se establece un patrón de onda estacionaria electromagnética en el resonador que, en regiones de alta intensidad (amplitud), es suficiente para generar el plasma. Sin embargo, el uso de una cámara resonante en este dispositivo limita el volumen potencial de plasma que se puede generar al mismo tiempo.

En el documento JP2006/156100 se describe un generador de plasma de gran área. Este documento describe el uso de una serie de antenas de microondas individuales para generar plasma dentro de un espacio común con el fin de lograr una distribución más uniforme de plasma dentro de ese espacio. Aunque las antenas están separadas, son impulsadas por una sola fuente de microondas común para garantizar que todas las fuentes de plasma (antenas) estén en fase, lo que también limita la potencia máxima del plasma. El documento ilustra claramente las dificultades y complejidades involucradas en el mantenimiento de una región de plasma utilizando múltiples fuentes de plasma de microondas.

El documento US 2003/024806 A1 divulga un “reactor de molino de vórtice de chorro de plasma” que comprende una pluralidad de antorchas de plasma alineadas tangencialmente en la pared cilíndrica del reactor y el uso de dicho reactor en el tratamiento de desechos y gases de escape como COV.

Es un objeto de esta invención proporcionar un dispositivo y un método mejorados para la utilización de plasma empleando radiación electromagnética de microondas.

Otro objeto de la presente invención es proporcionar un dispositivo generador de plasma que no esté sujeto a las restricciones del volumen de plasma generado por microondas que se puede generar y mantener simultáneamente a las que están sujetos los dispositivos de la técnica anterior.

Otro objeto más de la presente invención es proporcionar un generador de plasma de microondas en el que el volumen y/o la potencia del plasma producido tienen una dependencia reducida de las características de la fuente utilizada en su generación en comparación con los reactores de plasma convencionales.

Otro objeto más de la presente invención es proporcionar un sistema y un método para producir hidrógeno utilizando un generador de plasma de microondas.

5 Sumario de la invención

La invención se expone y caracteriza en las reivindicaciones principales, mientras que las reivindicaciones dependientes describen otras características de la invención.

10 Se prevé un sistema de producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos gaseosos, caracterizado por un módulo (2) de pretratamiento de gas conectado de forma fluida a un depósito (66) de gas y al menos a un generador (100) de hidrógeno; y un módulo (3) de posprocesamiento de hidrógeno conectado de forma fluida a través de un conducto (81) de alimentación al generador y a un módulo (5) de almacenamiento y distribución, comprendiendo dicho generador de hidrógeno boquillas (105) de plasma; una cámara (102) de reacción acoplada a cada una de las boquillas de plasma; cada boquilla de plasma comprende un generador (301, 302) de plasma de microondas y un tubo (303) de alimentación para dirigir un flujo del hidrocarburo gaseoso a través del generador de plasma a entradas respectivas a la cámara de reacción, por lo que el generador de plasma de microondas es adecuado para al menos ionizar parcialmente el hidrocarburo gaseoso para formar un plasma antes de la entrada del hidrocarburo al menos parcialmente ionizado en la cámara de reacción, y la cámara de reacción comprende al menos una salida (101) a través de la cual se transporta hidrógeno al módulo (3) de posprocesamiento y el módulo (2) de pretratamiento comprende medios para precalentar el hidrocarburo gaseoso.

En una realización, el módulo de posprocesamiento comprende medios para enfriar el hidrógeno, preferiblemente un intercambiador de calor.

25 En una realización, el sistema comprende además un conducto y un medio para transportar el calor extraído del gas por dichos medios para enfriar, a una ubicación aguas arriba del generador de hidrógeno, donde el medio intercambia calor con el hidrocarburo gaseoso antes de su entrada en el generador de hidrógeno.

30 El sistema comprende ventajosamente un conducto de retroalimentación conectado de manera fluida al conducto de alimentación y adaptado para retroalimentar al menos una porción del hidrógeno al generador de hidrógeno.

En una realización, el módulo de almacenamiento y distribución comprende un compresor de hidrógeno y un medio de refuerzo, un medio de almacenamiento de hidrógeno y un medio de salida de hidrógeno. Un depósito de carbono se conecta preferiblemente a través de un conducto al generador de hidrógeno.

40 Un aparato adecuado para ser utilizado en el sistema de producción de hidrógeno a partir de un gas que comprende un hidrocarburo, se caracteriza por un medio de conexión a un suministro de hidrocarburo gaseoso; boquillas de plasma acopladas a las mismas y una cámara de reacción en comunicación fluida con cada una de las boquillas de plasma; cada boquilla de plasma comprende un generador de plasma de microondas y un tubo de alimentación para dirigir un flujo del hidrocarburo gaseoso a través de las boquillas de plasma a las respectivas entradas a la cámara de reacción, por lo que las boquillas de plasma ionizan al menos parcialmente el hidrocarburo gaseoso para formar un plasma antes de la entrada del hidrocarburo al menos parcialmente ionizado en la cámara de reacción, y la cámara de reacción comprende al menos una salida a través de la cual se recoge el hidrógeno, por lo que se puede producir hidrógeno de forma continua y sin la generación de óxidos de carbono.

En una realización, las boquillas de plasma están adaptadas para estimular un flujo estabilizador de plasma dentro del tubo de alimentación y las boquillas de plasma están adaptadas para estimular el flujo estabilizador dando forma al tubo de alimentación en su interior.

50 En una realización, las boquillas de plasma están adaptadas para estimular el flujo estabilizador mediante la incorporación de un elemento de agitación dentro del tubo de alimentación. El flujo estabilizador de plasma puede ser un vórtice.

55 La cámara de reacción tiene en una realización paredes laterales curvadas.

En una realización, el tubo de alimentación comprende un puerto de entrada para reactivos tales como partículas de sustrato aguas abajo del generador de plasma, estando dispuesto el puerto de entrada de tal manera que el flujo de material reactivo en el tubo de alimentación soporta el mantenimiento del flujo estabilizador del plasma dentro del tubo de alimentación.

En una realización, la boquilla y su entrada a la cámara de reacción están alineadas coaxialmente con la cámara de reacción, por lo que se establece un flujo estabilizador adicional dentro de la cámara de reacción.

65 En una realización, el acoplamiento de las boquillas de plasma a la cámara de reacción está adaptado para establecer un flujo estabilizador adicional en la cámara de reacción. La dirección de salida de cada boquilla de plasma está

orientada a la entrada de materiales de alimentación a la cámara de reacción en un ángulo agudo con la pared circunferencial de la cámara de reacción. El flujo estabilizador adicional puede ser un vórtice.

5 En una realización, se proporciona una capa fija o móvil de un material de sustrato dentro de la cámara de reacción para la separación y recogida de uno o más componentes de la reacción de plasma.

El flujo estabilizador adicional es capaz de soportar la suspensión de partículas dentro de la cámara de reacción.

10 Ventajosamente, la suspensión de partículas se utiliza en la separación y recogida de uno o más componentes de la reacción del plasma dentro de la cámara de reacción.

En una realización, el generador de plasma de cada boquilla está alimentado por un magnetrón.

15 Preferiblemente, la cámara de reacción no es resonante con respecto al generador de plasma.

En una realización, la salida se extiende una longitud ajustable dentro de la cámara.

20 El aparato comprende en una realización una cámara secundaria en comunicación fluida con la cámara de reacción, teniendo dicha cámara secundaria un puerto de salida.

En una realización, uno o más colectores electrostáticos están dispuestos dentro de la cámara secundaria, y el puerto de salida está conectado de forma fluida a un precipitador de polvo y/o un colector de polvo.

25 La cámara de reacción comprende en una realización un canal de entrada que está adaptado para un flujo secundario de uno o más reactivos, y comprende además medios para alimentar selectivamente partículas desde el puerto de salida inferior al canal de entrada y luego a la cámara de reacción.

30 En una realización, el aparato comprende además un dispositivo atomizador o vaporizador, antes del generador de plasma para atomizar o vaporizar el material de alimentación.

También se proporciona un método para producir hidrógeno a partir de un gas que comprende un hidrocarburo, caracterizado por las etapas de:

35 a) alimentar cantidades separadas del gas a una presión controlada a las regiones respectivas donde cada cantidad de gas se somete a un campo electromagnético respectivo, por lo que se genera un plasma en desequilibrio a presión atmosférica y superior en cada región;

40 b) alimentar las cantidades separadas de plasma en una cámara de reacción a través de entradas separadas mientras se controlan las propiedades de flujo del plasma con el fin de sostener el plasma y mantenerlo en un estado ionizado hasta que este entre en la cámara de reacción y durante un tiempo después de eso; y

45 c) extraer el hidrógeno producido a través de una salida de la cámara de reacción, por lo que el hidrógeno puede producirse virtualmente a demanda, de forma continua y sin la generación de óxidos de carbono, y la respectiva pluralidad de campos electromagnéticos se generan mediante fuentes de microondas separadas e individuales, y

d) extraer carbono precipitado de la cámara de reacción.

50 En una realización, el método comprende además la mezcla de dichas cantidades separadas de plasma en la cámara de reacción mientras los plasmas están en un estado ionizado.

En una realización, el control de las propiedades de flujo del plasma en la etapa b) comprende formar un flujo de gas de vórtice antes de que el gas entre en el estado de plasma.

55 En una realización, se introduce un sustrato en forma de partículas en el plasma en la cámara de reacción, y el sustrato en una realización comprende carbono precipitado extraído de la cámara de reacción.

60 Un sistema construido de acuerdo con esta invención tiene numerosas ventajas sobre la técnica anterior. Lo más importante es que con la presente invención se pueden generar mayores volúmenes de plasma generado por microondas a presión atmosférica y superior y este plasma y el resplandor asociado se pueden recolectar simultáneamente en un solo volumen, en contraste con la generación de plasma previamente disponible, lo que hace que el sistema y el método de generación de plasma particularmente adecuado para operaciones de procesamiento a escala comercial y permite lograr eficiencias mejoradas en operaciones de procesamiento de plasma, tales como en la producción de hidrógeno. Esta configuración permite el aislamiento electromagnético de los generadores de plasma entre sí, lo que a su vez asegura que su riesgo de daño por interferencia mutua se reduce notablemente. El plasma y el resplandor generado por tales fuentes son aditivos, ya que se acumulan en la cámara de reacción, lo que permite

el control de las formaciones del producto final. Esto se consigue sin necesidad de bloqueo de fase, que resultó ser un factor limitante importante para el estado de la técnica.

Un sistema construido de acuerdo con esta invención es considerablemente más flexible que los reactores de plasma conocidos en la técnica anterior como resultado de que la cámara de reacción está espacialmente separada de la fuente de plasma. El mismo reactor se puede adaptar fácilmente para adaptarse a diferentes procesos, que se pueden ejecutar de forma continua si se desea.

Como se indicó anteriormente, el intervalo aceptado para la radiación de microondas son longitudes de onda en el intervalo de 1 m a 1×10^{-2} m. Se prefiere que las microondas utilizadas para generar plasma de acuerdo con esta invención estén en el intervalo de 0.5 m a 0.05 m. La ubicación de la cámara de reacción alejada del generador de plasma permite utilizar múltiples fuentes generadoras de plasma en las que su salida es aditiva. Es decir, el volumen de plasma y/o el resplandor producido y, por lo tanto, disponible para las reacciones del proceso, aumenta con el número de fuentes. Esto contrasta directamente con la técnica anterior en la que las características de la propia radiación generadora de microondas proporcionan una limitación fundamental: con los reactores de plasma convencionales, la cámara debe ser resonante para esta radiación o debe generar una región limitada de guía de ondas alrededor del plasma, la función de guía de ondas a su vez limita el tamaño a uno que está dictado por la frecuencia de microondas.

No se sabe que se haya logrado escalar los procesos de la técnica anterior para la generación de plasma por microondas, como los descritos en los documentos US 6,204,603 y JP2006/156100, a escala comercial y simplemente no es factible con la tecnología disponible anteriormente. Los procesos de un solo tubo están restringidos a un volumen bajo debido a la necesidad de formar una guía de ondas en la superficie del plasma. No es factible generar más plasma usando tal proceso extendiéndolo a múltiples fuentes de microondas. Las fuentes necesitarían estar sincronizadas en frecuencia y fase, lo cual es difícil de lograr, pero, más fundamentalmente, el volumen de plasma aún estaría limitado por las dimensiones de la guía de ondas: múltiples fuentes darían como resultado un plasma más intenso para un procesamiento más intensivo en energía, pero no más plasma de procesamiento per se. Los procesos de magnetron único, como se describe en el documento US 6,204,603, se basan en que la cámara de reacción sea resonante con respecto a un modo adecuado de radiación de microondas. De esta manera, se pueden producir regiones localizadas de campos de alta intensidad dentro de la cámara, que son suficientes para excitar y sostener el plasma en escalas de tiempo suficientes para permitir que tenga lugar la reacción deseada. El requisito de que la cámara resuene en uno de un número limitado de modos significa necesariamente que su tamaño viene dictado por la frecuencia de la fuente de microondas. En consecuencia, es imposible escalar un dispositivo de este tipo hacia arriba y hacia abajo para una frecuencia de excitación determinada.

Como se mencionó anteriormente, en la presente invención la región generadora de plasma está alejada de la cámara de reacción. La distancia de separación mínima entre una región generadora de plasma y la cámara de reacción es la distancia mínima necesaria para asegurar el aislamiento electromagnético de los campos de microondas individuales de las boquillas de plasma. La distancia máxima de separación depende de la persistencia del estado del plasma que, a su vez, depende de al menos la energía del plasma, la velocidad y estabilización del flujo de alimentación y las reacciones y recombinaciones deseadas determinadas por la posición dentro del plasma/resplandor. Preferiblemente, la distancia de separación está entre 0.005 m y 1 m, más preferiblemente entre 0.05 m y 0.5 m, más preferiblemente todavía entre 0.02 m y 0.2 m. La separación mínima depende parcialmente de la longitud de onda de la radiación electromagnética empleada.

Idealmente, el plasma generado de acuerdo con la presente invención se induce a fluir en un patrón estabilizador, lo que extiende su existencia más allá de los sitios de generación de plasma y así permite la recolección del plasma en la cámara de reacción. El flujo de fluido dentro de la cámara de reacción también permite delinear una "zona de reacción" dentro de la cámara dentro de la cual tienen lugar la mayoría de las reacciones requeridas. Predominantemente, es el resplandor del plasma el que persiste en la cámara de recolección, siendo el resplandor la región en la que el plasma es sostenido por mecanismos distintos de la excitación generadora. Se cree que dicha persistencia se ve favorecida por el flujo estabilizador.

Con las fuentes de plasma alejadas de una cámara común y transfiriendo y combinando chorros de plasma en la cámara común en la que pueden tener lugar las reacciones, con el (los) reactivo (s) persistiendo en un estado de plasma, esta invención ofrece una enorme flexibilidad en aspectos fundamentales del procesamiento del plasma. En particular, la etapa de disociación del proceso de plasma se produce en un lugar que está físicamente separado de la etapa de recombinación del proceso de reacción y aislado del entorno en el que se produce la disociación. Esto permite establecer diferentes condiciones de proceso para cada etapa. Esto, a su vez, permite que se establezcan las condiciones ideales para la recombinación en la cámara de reacción con el fin de estimular la reacción/recombinación deseada. Por lo tanto, se ofrece flexibilidad tanto en el potencial para aumentar y reducir el tamaño y la producción de la vasija del reactor como en el tipo e intervalo de procesos de reacción químicos y físicos que se pueden realizar en la cámara de reacción.

A diferencia de las cámaras de plasma de la técnica anterior que combinan múltiples generadores de plasma de microondas de fase bloqueada, con la presente invención no hay restricción en el número de generadores de plasma

de microondas que se pueden acoplar a una cámara de recogida en exceso de dos. El único límite práctico es el del tamaño de la cámara de recogida y las dimensiones físicas del acoplamiento de una boquilla de plasma a la cámara de recogida, es decir, el número de boquillas de plasma que se pueden colocar físicamente alrededor de la cámara. En algunas aplicaciones, el número de boquillas de plasma puede estar limitado por la necesidad de establecer características particulares de flujo de gas dentro de la cámara de reacción. Con las realizaciones particulares descritas en el presente documento, preferiblemente al menos cuatro generadores de plasma están acoplados a una única cámara de reactor.

La generación de plasma total introducida en la cámara de recogida puede ser de 1 kW a varios MW dependiendo de la aplicación y es función del número de boquillas de plasma utilizadas.

El término “boquilla de plasma” debe entenderse aquí como cualquier dispositivo equipado con una fuente de energía (por ejemplo, un magnetrón) que sea capaz de dirigir los fluidos de alimentación desde un puerto de entrada a través de una región o zona generadora de plasma hasta un puerto de salida.

La boquilla de plasma puede adaptarse para estimular el flujo estabilizador en la cámara de recogida definiendo un tubo de guía en la misma. Por ejemplo, el diseño de la boquilla puede basarse en un tubo de vórtice en el que las entradas laterales conducen a un flujo de gas de salida con un fuerte movimiento de vórtice. Alternativamente, las boquillas pueden comprender un elemento de agitación dentro del tubo, por ejemplo, un impulsor en espiral o un ventilador.

Idealmente, la adaptación de la boquilla para estimular el flujo estabilizador está ubicada aguas arriba del generador de plasma. Esta disposición tiene la ventaja añadida de incrementar la exposición del material de alimentación a la zona de plasma, lo que, a su vez, conduce a una mayor uniformidad en el procesamiento.

El flujo estabilizador es más preferiblemente un flujo de vórtice, por lo que se quiere decir que los gases experimentan un flujo generalmente helicoidal, de radio decreciente. Se sabe que el flujo de vórtice puede estabilizar el plasma hasta cierto punto, pero hasta ahora no se ha apreciado que tal mecanismo estabilizador pueda tener los sorprendentes beneficios de flexibilidad en el diseño de recipientes de reacción, como se describe en el presente documento.

Alternativamente, o además, el reactor de plasma puede adaptarse adicionalmente para estimular un flujo estabilizador adicional dentro de la cámara de recogida. Este flujo estabilizador adicional puede ser favorecido por las características de flujo del flujo estabilizador en las boquillas y/o por medio de la disposición de las boquillas de plasma alrededor de la cámara de recogida y/o su forma de acoplamiento a la cámara. Las boquillas se pueden acoplar a la cámara para introducir materiales de alimentación/plasma en la cámara formando un ángulo con las paredes de la cámara, preferiblemente un ángulo tangencial. El flujo estabilizador adicional también puede ser un flujo de vórtice. También se prevén inductores de flujo alternativos, separados de las boquillas, tales como un elemento de agitación dentro de la cámara de reacción.

Preferiblemente, la cámara de reacción tiene paredes laterales curvadas. Por ejemplo, la cámara puede tener forma cilíndrica, toroidal o incluso esférica. Esto, en combinación con el flujo estabilizador, tiene un gran potencial de mejora en una amplia gama de procesos químicos y físicos. En el primer caso, los chorros de plasma/resplandor se extenderán fuera de la salida de la boquilla hacia la cámara de reacción y serán moldeadas por el patrón de flujo para extenderse lateralmente a lo largo de la pared de la cámara de reacción. Las partículas de alimentación, recolección o sustrato, u otros materiales reactivos que fluyen alrededor de la cámara tendrán entonces un mayor tiempo de residencia en un ambiente de resplandor, a medida que se encuentre el resplandor de las sucesivas boquillas. Esto permite un procesamiento de plasma más completo y, por lo tanto, una mejor eficiencia de reacción. Si las boquillas de plasma están lo suficientemente cerca y/o los chorros persisten durante el tiempo suficiente, estos chorros individuales pueden fusionarse para formar un toro de plasma continuo dentro de la cámara.

Otra ventaja proporcionada por las condiciones de flujo dentro de la cámara es que, en muchos casos, se puede permitir una fácil separación de los productos de reacción. Por ejemplo, si el carbono y el hidrógeno son los productos de reacción, se puede permitir que el carbono se agrupe y caiga bajo la gravedad, mientras que el flujo de hidrógeno se puede dirigir hacia arriba. Las salidas en o cerca de la parte superior e inferior de la cámara permiten, por lo tanto, que estos productos se eliminen a medida que continúa la generación de plasma y la reacción en el recipiente de reacción. Es decir, se facilita la eliminación del producto sin detener el proceso de reacción. El potencial de funcionamiento continuo mejora significativamente la productividad.

En otra realización, el flujo estabilizador puede ser capaz de soportar un cinturón de partículas en suspensión dentro de la cámara. Estas partículas pueden actuar luego como sustrato para uno o más de los productos de reacción, lo que ayuda a su separación y eliminación de la cámara. De nuevo, esto permite el funcionamiento continuo del recipiente de reacción en contraposición a un proceso discontinuo, que hasta ahora era el único medio de funcionamiento de tales recipientes de reacción.

El recipiente de reacción o cámara de recogida de la presente invención no está limitado por el tipo de plasma que se utiliza. Cada boquilla de plasma puede comprender una fuente de bajo volumen o una fuente resonante de gran

volumen, o de hecho cualquier otra fuente de plasma de microondas adecuada. De hecho, además de las fuentes de plasma de microondas, el recipiente de reacción puede tener otras fuentes de plasma que no sean de microondas y boquillas de plasma. Sin embargo, se considera beneficioso para aplicaciones comerciales probables, operar a presión atmosférica y superior. Un intervalo de funcionamiento preferido es de 0.01 a 8 bar, aunque se pueden prever presiones de funcionamiento más altas (por ejemplo, de 10 a 25 bar).

Específicamente, con la presente invención, la fuente de plasma de cada boquilla se deriva preferiblemente usando un magnetrón como fuente de microondas. Cada boquilla comprende un tubo de alimentación a través del cual fluyen los materiales de alimentación y cada magnetrón puede comprender al menos una guía de ondas dimensionada para la radiación de microondas y dispuesta para intersecar el tubo de alimentación en o cerca de una posición en la que el campo eléctrico de la radiación de microondas es más intenso. Tal diseño es simple de implementar y, de hecho, tales fuentes de microondas están disponibles fácil y económicamente.

En la realización preferida de esta invención, el tubo de alimentación comprende un inductor de remolino situado en o cerca de la intersección del tubo de alimentación con la guía de ondas del magnetrón. Esto asegura que se induzca el flujo estabilizador (preferiblemente en vórtice) antes de la generación de plasma, lo que asegura una mejor mezcla de las materias primas con el plasma, lo que a su vez asegura un mejor procesamiento.

Como se indicó anteriormente, el intervalo aceptado para la radiación de microondas son longitudes de onda en el intervalo de 1 m a 1×10^{-2} m. Utilizando dispositivos actuales, fácilmente disponibles, se prefiere que las microondas utilizadas para generar plasma de acuerdo con esta invención tengan longitudes de onda del dispositivo en el intervalo de 0.5 m a 0.05 m.

El generador de plasma de microondas empleado en la boquilla de plasma es preferiblemente un magnetrón coaxial. La energía suministrada al generador de microondas de cada boquilla de plasma está preferiblemente entre 0.1 kW y 500 kW, más preferiblemente entre 0.5 kW y 120 kW, lo más preferiblemente entre 1 kW y 75 kW.

En una realización preferida, cada una de las boquillas de plasma del reactor de plasma tiene un generador de plasma por microondas. Sin embargo, también se prevé que el reactor de plasma pueda comprender un intervalo de diferentes fuentes de plasma conectadas a la cámara de recogida, algunas de las cuales pueden no ser generadores de plasma por microondas. Lo más preferido es que ninguno de los generadores de plasma de microondas del reactor de plasma esté bloqueado en fase, pero, más generalmente, no más de una minoría de los generadores de plasma por microondas conectados a una cámara de reacción común puede estar bloqueado en fase.

El flujo de material a través de la boquilla de plasma comprende preferiblemente un fluido, más preferiblemente un gas. Además, el flujo a través de la zona de generación de plasma de la boquilla de plasma contiene preferentemente uno o más reactivos. Dependiendo de la reacción del proceso, preferiblemente una parte principal, o idealmente la totalidad, de al menos uno de los reactivos fluye a través de la zona de generación de plasma. Los reactivos pueden constituir más del 50 % del flujo a través de la zona de generación de plasma, más preferiblemente más del 75 % del flujo y lo más preferiblemente más del 90 % del flujo.

El fluido alimentado a la boquilla de plasma está preferiblemente a una temperatura de entre -20°C y $+600^{\circ}\text{C}$, más preferiblemente de 0°C a 200°C , lo más preferiblemente de 50°C a 150°C .

La presión dentro de la boquilla de plasma es preferiblemente de 0.01 bar abs. hasta 8 bar abs., más preferiblemente desde 0.3 bar abs. a 5 bar abs., lo más preferiblemente de 0.8 bar abs. a 3 bar abs.

El tiempo medio de residencia dentro de la boquilla de plasma puede ser de 10^{-6} segundos a 10^{-1} segundos, pero preferiblemente de 2×10^{-6} segundos a 10^{-2} segundos. Sin embargo, se entenderá que el tiempo medio de residencia depende del material que se ioniza. Como ejemplo, la energía específica consumida para craquear completamente el metano que pasa a través del generador de plasma de microondas de la presente invención con una eficiencia del 100 % es de aproximadamente 23 kJ/mol.

Si bien el volumen de la cámara del reactor en cada caso dependerá de la aplicación prevista y los requisitos de procesamiento del reactor de plasma, en el caso de un generador de plasma de microondas de 2.45 GHz, los intervalos de volúmenes ejemplares son 10^{-3} m^3 a 10^3 m^3 , más preferiblemente 10^{-2} m^3 a 10^2 m^3 , lo más preferiblemente 1.5 m^3 a 10^2 m^3 . El volumen de la cámara de reacción no debe ser inferior a $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ por boquilla por kW, pero puede extenderse hacia arriba sin limitación.

El tiempo de residencia dentro de la cámara de reacción depende de la reacción o reacciones que ocurren dentro de la cámara y del producto de salida deseado, pero puede extenderse desde 0.1 segundos hasta varias horas.

La cámara de reacción (también denominada en el presente documento cámara de resplandor o cámara de recogida) comprende idealmente un canal de salida que se extiende a través de una pared superior de la cámara, y que preferiblemente está situado en el centro. El canal de salida puede extenderse una longitud preseleccionada o ajustable dentro de la cámara. El canal de salida actúa como un punto de recogida de las salidas gaseosas de la

cámara de reacción. Su altura dentro de la cámara se puede ajustar para recolectar un producto de gas en particular. Además, dentro del canal de salida pueden instalarse internamente varios tubos más pequeños de tal manera que fomenten que el movimiento del vórtice permanezca en la cámara de reacción y no se disipe con el flujo de salida de los gases de escape.

La provisión de una o más salidas de la cámara de reacción permite extraer los productos de reacción sin detener o interferir con la generación de plasma. Es decir, sin afectar el funcionamiento continuo del proceso. La eliminación del producto también es deseable para evitar que obstruya el sistema (por ejemplo, en un proceso de generación de carbono) o para liberar una acumulación de presión (por ejemplo, en un proceso de producción de hidrógeno u otro gas).

El reactor de plasma puede comprender además una cámara secundaria en comunicación fluida con la cámara de reacción. La cámara secundaria también puede comprender un puerto de salida. En una realización preferida, la cámara secundaria está ubicada debajo de la cámara de reacción. Este puerto inferior está idealmente ubicado para extraer productos sólidos de la cámara. Además, puede extraerse un vórtice secundario a través de este puerto de salida, orientado centralmente dentro de la cámara, con el fin de arrastrar un producto de reacción para su recogida. Para evitar que el gas escape por el puerto de salida inferior, el puerto puede estar equipado con una válvula de restricción de gas.

Se puede incluir un coadyuvante de recogida, tal como un colector electrostático, un precipitador de polvo o un sustrato formador de polímero dentro o en comunicación fluida con una o ambas cámaras superior e inferior. Estos proporcionan medios posibles adicionales para recoger un producto de salida dependiendo de la naturaleza de la reacción que tiene lugar dentro de la cámara de reacción. Por ejemplo, una placa o anillo electrostático atraerá sólidos, fomentando su separación de un flujo de gas.

Para permitir la introducción de sustratos u otros materiales para la recogida del producto, la cámara de reacción puede comprender además un canal de entrada a lo largo del cual puede pasar un flujo secundario. Alternativamente, se pueden introducir otros materiales en la cámara de reacción a través de una o más de las boquillas de plasma que pueden estar generando plasma activamente o no en ese momento.

El reactor de plasma también puede comprender uno o más dispositivos de atomización o vaporización para permitir que los líquidos se procesen en esta invención. Los dispositivos de atomización o vaporización pueden ubicarse en una boquilla de plasma o en una entrada a la cámara de reacción.

Breve descripción de los dibujos

Estas y otras características de la invención quedarán claras a partir de la siguiente descripción de una forma de realización preferencial, dada como ejemplo no restrictivo, con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

La figura 1 es un diagrama de bloques que ilustra una realización del sistema y método de acuerdo con la invención;

La figura 2 es una ilustración esquemática de una realización de un recipiente de reacción utilizado en la invención;

Las figuras 3a y 3b son ilustraciones esquemáticas de dispositivos electrostáticos dispuestos en la cámara inferior, para recoger productos de salida en estado particulado o pulverizado;

La figura 4a es una ilustración esquemática de un dispositivo colector y precipitador de polvo, dispuesto en comunicación fluida con el puerto de salida inferior;

La Figura 4b es una ilustración esquemática de una disposición para alimentar polvo precipitado desde el puerto de salida inferior y hacia la región superior de la cámara de reacción;

Las figuras 5a y 5b son ilustraciones esquemáticas de realizaciones alternativas de la invención, que muestran diferentes disposiciones de boquillas de plasma alrededor de la cámara de reacción;

La figura 6 ilustra esquemáticamente un ejemplo de un aparato de una región generadora de plasma, adecuado para su incorporación en las boquillas;

La figura 7 ilustra esquemáticamente un segundo ejemplo de un aparato de una región generadora de plasma, adecuado para su uso con esta invención;

La figura 8 es una ilustración esquemática de un componente de la boquilla de plasma, configurada para dirigir los gases de alimentación en un movimiento de vórtice a través de la región generadora de plasma;

La figura 9 es una ilustración esquemática de un componente alternativo dentro de la boquilla de plasma, configurado para dirigir los gases de alimentación en un movimiento de vórtice a través de la región de generación de plasma;

Descripción detallada de realizaciones

- Con referencia inicialmente a la figura 1, el sistema de acuerdo con la invención comprende generalmente un reactor 100 de plasma, módulos 2, 3 de pre y posprocesamiento y un módulo 5 de almacenamiento y distribución. El funcionamiento de los módulos dentro del sistema es controlado por un módulo 4 de control y monitorización, a través de líneas 41 de comunicación.
- Un gas de hidrocarburo, preferiblemente un gas natural como el metano, se alimenta desde un depósito 66 a través de una línea 67 de alimentación, al módulo 2 de preprocesamiento. El depósito 66 puede ser un recipiente adecuado cerca o en las proximidades del módulo de preprocesamiento, o puede comprender una línea de suministro de gas conectada a una fuente distal.
- En el módulo 2 de preprocesamiento, el gas se somete a lavado, secado y separación de una manera que per se es conocida en la técnica, antes de ser alimentado al generador 100 de plasma a través de la línea 63 de alimentación.
- La figura 2 muestra, de forma general, una realización de un reactor 100 de plasma de acuerdo con la presente invención. El reactor 100 de plasma comprende un canal 103 de entrada a través del cual los gases de alimentación fluyen a un colector 104 anular. Una pluralidad de boquillas 105 de plasma conectan el colector 104 a una cámara 102 de reacción. En una construcción específica (no mostrada en la figura 2), se utilizan cuatro boquillas de plasma de 35 mm de diámetro. También es posible un número mayor o menor de boquillas que el número ilustrado, así como diámetros dentro del intervalo de 25 mm a 50 mm. La cámara 102 de reacción podría tener ventajosamente en esta construcción un diámetro de 500 mm, pero este diámetro podría estar en el intervalo de, por ejemplo, 250 mm a varios metros, dependiendo de la escala de producción deseada.
- Dentro de cada boquilla 105 de plasma, los gases de alimentación pueden excitarse de forma selectiva y controlable para formar plasma en una zona o región generadora de plasma, un proceso que se explica más adelante. En cada boquilla de plasma, la distancia de separación mínima entre una región generadora de plasma y la entrada a la cámara de reacción (es decir, la salida de la boquilla) es la distancia mínima necesaria para asegurar el aislamiento electromagnético de los campos de microondas individuales de las boquillas de plasma. La distancia de separación máxima depende de la persistencia del estado del plasma que, a su vez, depende de al menos la energía del plasma y la velocidad y estabilización del flujo de alimentación. Preferiblemente, la distancia que separa la región generadora de plasma de la cámara de reacción en cada boquilla está entre 0.005 m y 1 m, más preferiblemente entre 0.05 m y 0.5 m, más preferiblemente todavía entre 0.02 m y 0.2 m.
- Cada boquilla 105 comprende un inductor 110 de remolino que está situado en la entrada de la boquilla o entre la entrada de la boquilla y la región de generación de plasma (no mostrada en la figura 2) de la boquilla. El inductor 110 de remolino está adaptado para estimular el flujo del gas de alimentación con un movimiento de vórtice. Este movimiento de vórtice estabiliza el plasma generado dentro de la boquilla de tal manera que se sostiene y permanece en un estado ionizado mientras fluye hacia la cámara 102 de reacción. Por consiguiente, el plasma es reactivo durante algo de duración de su tiempo en la cámara 102 de reacción. Idealmente, la dirección de rotación de cada flujo de vórtice dentro de las boquillas es tal que el flujo de vórtice puede contribuir positivamente a la estabilización general del plasma dentro de la cámara de reacción.
- Una cámara 108 inferior, que puede usarse para separar los productos de reacción, está ubicada debajo de la cámara 102 de reacción. Por ejemplo, un producto sólido de la reacción puede separarse en la cámara inferior, como se explica a continuación. Es deseable establecer un flujo de fluido rotatorio que tenga un plano de rotación sustancialmente horizontal o en espiral dentro de la cámara de reacción y así la cámara 102 de reacción con la cámara 108 inferior contigua definen preferiblemente un ciclón para la recogida de partículas sólidas. El producto sólido pasa a través de una válvula 106 de restricción de gas, por ejemplo, una válvula giratoria, a un puerto 107 de salida inferior.
- Se proporciona un puerto 101 de salida superior encima de la cámara 102 de reacción y, en esta realización de la invención, se utiliza para recoger productos de reacción gaseosos (que no pueden salir a través del puerto 107 de salida inferior mediante la válvula 106 rotativa).
- El funcionamiento del reactor 100 de plasma se describirá ahora con referencia a la Figura 2.
- Un suministro de gas a procesar entra en el colector 104 a través del canal 103 de entrada a una presión controlada, típicamente entre 1 y 2 bar abs. El caudal del gas de alimentación se ajusta de acuerdo con diversas condiciones de la reacción, por ejemplo: la energía del generador de plasma (es decir, el aparato antes mencionado de la región generadora de plasma), la composición química del gas de alimentación y las salidas de reacción deseadas. Por ejemplo, cuando se usa un magnetrón de 6 kW para la generación de plasma, los flujos de gas pueden establecerse típicamente entre 10 l/min y 100 l/min por boquilla.
- Desde el colector 104, el gas de alimentación fluye luego a través de las múltiples boquillas 105 de plasma. Dentro de las boquillas de plasma, el gas de alimentación se agita primero para lograr un patrón de flujo estabilizador, tal como

un movimiento de vórtice, mediante inductores 110 de remolino, y luego se excita a un plasma en la región generadora de plasma. El resultado es una nube en movimiento de gas disociado y/o parcialmente disociado, que continúa en su patrón de flujo hacia la cámara 102 de reacción. El patrón de flujo del plasma aumenta la estabilidad del plasma en el sentido de que los gases se mantienen en el estado del plasma aguas abajo de la región generadora de plasma y dentro de la cámara 102 de reacción. Tal estabilización permite que los gases ionizados permanezcan concentrados tanto después del generador de plasma como dentro de la cámara de reacción, extendiendo así la región activa en la que pueden tener lugar las reacciones.

En la cámara 102 de reacción, los constituyentes del gas disociado pueden separarse o recombinarse para formar otros productos, o pueden reaccionar con un sustrato u otra sustancia introducida en la cámara 102, dependiendo de las características específicas de la reacción requerida. Cualquiera que sea la ruta de reacción que se utilice, los productos se extraen a través de un puerto 101 de salida superior o un puerto 107 de salida inferior.

Los magnetrones en la realización descrita anteriormente son magnetrones de 6 kW, pero podrían usarse fuentes de magnetrones alternativas de hasta 100 kW o incluso más, dependiendo de la disponibilidad. El magnetrón puede ser de un tipo que entregue una potencia constante, o puede ser un magnetrón pulsado que genera valores de potencia pico a intervalos especificados. Por ejemplo, se puede operar un magnetrón pulsado de 1 kW para generar picos de potencia de 10 kW a intervalos regulares. Por lo tanto, para los propósitos de esta descripción, las referencias a la potencia del magnetrón (kW) deben entenderse como energía electromagnética, independientemente de si la energía es generada por un magnetrón pulsado o un magnetrón de potencia constante. Se preferirán caudales de fluido más altos a través de las boquillas y en la cámara de reacción para valores más altos de energía electromagnética.

La separación de las regiones generadoras de plasma de la cámara de reacción tiene un efecto doble. En primer lugar, la salida de plasma de las boquillas es aditiva. Es decir, cada boquilla 105 alimenta su plasma a la cámara 102 de reacción y el volumen de plasma en la cámara de reacción se multiplica en proporción al número de boquillas de plasma utilizadas. En segundo lugar, la cámara de reacción no está limitada de ninguna manera por el método con el que se genera el plasma, específicamente la longitud de onda de las microondas que son responsables de su generación. Esto, a su vez, significa que el diseño del reactor de plasma es enormemente flexible, lo que permite que se adapte fácilmente a la reacción que está teniendo lugar en su interior. Por ejemplo, se puede introducir un sustrato en la cámara directamente o mediante las boquillas de plasma o se puede utilizar un flujo de gas para arrastrar productos específicos.

En otros modos operativos, se pueden introducir diferentes materiales de alimentación en diversas boquillas de plasma alrededor de la cámara de reacción. Esto permite establecer las condiciones de la cámara para permitir que tengan lugar reacciones más complejas. En el contexto de la generación de hidrógeno, en determinadas circunstancias sería ventajoso introducir un sustrato de carbono en la cámara.

Las dimensiones y valores anteriores de los parámetros usados para el recipiente de reacción son ilustrativos de una realización particular solamente y no pretenden ser limitantes. El sistema descrito se amplía fácilmente. Por ejemplo, los magnetrones de 6 kW que operan a 2450 MHz podrían reemplazarse por magnetrones de 1 kW a 30 kW. Magnetrones aún más grandes que están disponibles de entre 35 kW y 100 kW, que operan a una frecuencia más baja, pueden usarse con boquillas más grandes, de más de 100 mm de diámetro. La cámara de reacción debe ampliarse en tamaño proporcionalmente y de acuerdo con el número de boquillas instaladas.

La estabilización del plasma es una característica importante de la separación del resplandor del plasma de su fuente energizante, ya que permite que la fase reactiva del gas de alimentación se mantenga en la cámara 102 de reacción, alejada de la región de generación de plasma. Se sabe que un movimiento de vórtice, que es simplemente un movimiento del fluido en un patrón aproximadamente helicoidal, forma una estructura de flujo relativamente estable. Esta estructura se puede extraer fácilmente a través de la región de generación de plasma de las boquillas y el movimiento helicoidal asegura una distribución uniforme del gas de alimentación expuesto a la fuente de excitación. El vórtice debe persistir hasta el momento en que el plasma esté cómodamente dentro de la cámara 102 de reacción. Obviamente, el tiempo real dependerá de factores tales como la velocidad del vórtice y el flujo de gas inicial.

Al considerar la estabilización, es necesario tener en cuenta el equilibrio que debe lograrse entre alimentar la reacción que está teniendo lugar y formar el plasma. El aumento del flujo a través de la región generadora de plasma de las boquillas transferirá el plasma más rápidamente, lo que a su vez debería reducir la necesidad de estabilización del vórtice. Sin embargo, un mayor flujo significa una mayor demanda de energía en el aparato para generar el plasma al proporcionar energía para la ionización, con el fin de evitar reducir la densidad del plasma.

Por supuesto, son posibles métodos de estabilización alternativos, aunque se prefiere el flujo de vórtice. Simplemente se requiere que se aplique una fuerza externa al flujo para mantener la "nube" de plasma en una forma particular, que se mantiene mientras el plasma fluye hacia la cámara 102 de reacción. Por ejemplo, se puede usar una fuerza magnética o un flujo sónico. Las fuerzas magnéticas se ven típicamente en el sistema de fuente de plasma de resonancia ciclotrónica de electrones empleado típicamente en sistemas de plasma de microondas de baja presión, técnica anterior fácilmente disponible.

Dentro de la cámara 102 de reacción, la nube de plasma se extiende desde las boquillas 105 y luego adyacente a la pared de la cámara de reacción. Esto da como resultado regiones extendidas de plasma, distribuidas a lo largo de la pared. El espacio entre las boquillas alrededor de la cámara de reacción determina la forma y la intensidad de la(s) nube(s) de plasma dentro de la cámara. En particular, cada nube que emerge de su respectiva boquilla puede fusionarse con sus vecinas para producir una zona de plasma toroidal continua ubicada adyacente a la pared de la cámara de reacción.

Una aplicación práctica para la que el reactor de plasma es particularmente adecuado es la producción de hidrógeno a partir de un gas de hidrocarburo, como el metano. El metano se alimenta al colector 104 y a las boquillas 105, desde las que entra en la cámara 102 de reacción como plasma, siguiendo el proceso de generación de plasma descrito anteriormente. Desde el punto en que se genera el plasma, comienza la reacción dentro del plasma para formar carbono e hidrógeno disociados, y continúa dentro de la cámara 102 de reacción. El gas hidrógeno se recoge a través del puerto 101 de salida superior, desde donde se alimenta al módulo 3 de posprocesamiento, como se describe anteriormente con referencia a la figura 1. En una realización, ilustrada en las figuras 3a y 3b, una o más placas o anillos electrostáticos, conectados a una fuente de alimentación adecuada (no mostrada), se colocan en la cámara 108 inferior, con el fin de mejorar la recolección de carbono disociado. La figura 3a ilustra dos anillos 131, 132 electrostáticos, mientras que la figura 3b muestra dos placas 133, 134 electrostáticas. El carbono sólido disociado es atraído a esta placa o anillo, sobre el cual se deposita en consecuencia preferentemente. El anillo se puede quitar y reemplazar según sea necesario. El carbón se transforma fácilmente en productos como carbón activo o negro de carbón. Estos productos de carbono son ventajosos en comparación con los productos comerciales actualmente disponibles porque están libres de impurezas de azufre y oxígeno.

La figura 4a ilustra un medio alternativo para recoger el carbono disociado, en forma de un precipitador 140 de polvo conectado de forma fluida al puerto 107 de salida inferior, y un colector de polvo 141 conectado al precipitador.

En una realización, el polvo puede usarse como reactivo en el plasma, siempre que se reintroduzca en la cámara 102 de reacción. Esto se ilustra en la figura 4b, que muestra una línea 160 de fluido en un extremo conectado al precipitador 140 de polvo, a través de una bomba 150, y en el otro extremo a la cámara 102 de reacción a través del puerto 111 de entrada. El puerto de entrada está preferiblemente provisto de una boquilla adecuada, por ejemplo, una boquilla 152 de tipo educor.

Con referencia ahora a las Figuras 5a y 5b, se muestran orientaciones alternativas de las boquillas 105 de plasma con respecto a la cámara 102 de reacción. En la Figura 5a, la disposición mostrada es una cámara 102a de reacción de formación de espiral de múltiples inicios. El flujo de vórtice desarrollado dentro de la boquilla, en esta formación 102a, se estimula más en la cámara 102 de reacción. Esto puede ser beneficioso para algunos procesos. La disposición alternativa mostrada en la Figura 5b proporciona un flujo más axial en la cámara 102 de reacción. Esto es más adecuado para la formación de gas de síntesis en contraposición a la formación de carbono sólido, usando los ejemplos descritos anteriormente. Un experto en la técnica entenderá que las configuraciones de boquillas entre estos dos extremos forman una gama de realizaciones.

En virtud de la disposición de la boquilla, se puede mantener el flujo de fluido dentro de la cámara de reacción. En determinadas circunstancias, este flujo puede ser suficiente para soportar una cinta suspendida de partículas introducidas, que puede actuar como sustrato para uno o más de los productos de reacción. Los medios alternativos para mantener el flujo de fluido en la cámara de reacción comprenden mecanismos mecánicos, un sustrato móvil tipo paleta, un flujo forzado de partículas de sustrato inyectadas u otro chorro que no sea una boquilla de plasma, un campo electromagnético en movimiento que influye en las partículas magnéticas en suspensión.

La cámara 102 de reacción ilustrada en esta realización es de forma toroidal pero alternativamente puede tener la forma de una esfera o cilindro, u otra forma, preferiblemente con paredes curvas.

Para reducir o prevenir la formación de carbono en la región de la salida de la boquilla, la relación entre el número de boquillas y el diámetro de la cámara de reacción se puede determinar de manera que las salidas de las boquillas estén espaciadas de manera óptima entre sí alrededor de la circunferencia de la cámara de reacción. Tales relaciones de espaciado de boquillas se encuentran típicamente entre 1 y 30 diámetros de boquilla.

En los ejemplos de las Figuras 5a y 5b, se muestran cuatro boquillas 105 de plasma alimentando la cámara 102 de reacción, pero esto es solo para claridad de ilustración. Se pueden usar muchas más boquillas, siendo el factor limitante esencialmente cuántas se pueden colocar alrededor de la cámara 102. Por supuesto, tampoco es esencial que todas las boquillas se utilicen para generar plasma. Por ejemplo, en una cámara con diez boquillas, quizás solo se puedan usar cinco para la generación de plasma para una reacción en particular. El resto se cerrará para evitar que los gases de alimentación pasen por alto las regiones generadoras de plasma de las boquillas activas y entren en la cámara. Alternativamente, como se describió anteriormente con referencia a la figura 4b, las boquillas que no se utilizan para la generación de plasma pueden usarse para inyectar partículas de sustrato o para inyectar gases (incluidos los gases de la salida de la cámara de reacción) para suministrar reactivos y/o aumentar la energía cinética dentro de la cámara de reacción.

Como se indicó anteriormente, la separación de la generación de plasma de la cámara de reacción es fundamental para esta invención, ya que permite que las boquillas hagan una contribución aditiva a la generación de plasma. Por consiguiente, la estructura de estas boquillas se describirá ahora con más detalle con referencia a las Figuras 6 a 9.

- 5 Las Figuras 6 y 7 ilustran posibles disposiciones para el aparato de la región generadora de plasma, ambas basadas en la generación de plasma por microondas. Las figuras 8 y 9 ilustran ejemplos de los inductores de remolino 110.

10 Pasando primero a la Figura 6, se muestra un magnetrón 301 y una guía de ondas 302 configurados como un generador de plasma. El magnetrón 301 es una estructura de generador de microondas convencional, similar a las que se encuentran generalmente en los hornos de microondas, que genera un campo electromagnético (campo E) de una manera conocida en la técnica. En esta disposición, un magnetrón 301 alimenta una guía de ondas 302 estándar con un extremo 304 cerrado que forma un tramo de un cuarto de onda. El magnetrón puede suministrar energía en el intervalo de 1 kW a 75 kW. Un tubo 303 dieléctrico adecuado, por ejemplo, un tubo de cuarzo, está ubicado en un punto donde el campo E es máximo, es decir, un cuarto de longitud de onda hacia atrás desde el extremo 304 cerrado, de modo que la intensidad del campo E provoca que se ionice el gas contenido en el tubo. 303. El gas a procesar se alimenta al tubo 303 y fluye desde la intersección del tubo 303 con la guía de ondas 302 hasta una salida 305 en un estado disociado. Un ejemplo de una guía de ondas adecuada es la Surfaguide™ suministrada por Sairem. El tubo 303 de cuarzo se puede reemplazar igualmente por un tubo de otro material que sea eléctricamente aislante y con una constante dieléctrica baja a la frecuencia de funcionamiento preferida.

20 Un inconveniente asociado con las fuentes de microondas disponibles comercialmente, a saber, que son de baja potencia, se soluciona en esta invención porque las salidas de los generadores de plasma individuales se suman. Este avance es significativo. Los magnetrones más grandes disponibles comercialmente están en el intervalo de 75 a 120 kW. Usando varios de tales magnetrones, digamos 10, orientados alrededor de una cámara de reacción, se puede generar una zona de plasma de intensidad de MW.

25 El paso de fluido de cada boquilla es preferiblemente recto y el diámetro de la boquilla en la zona de generación de plasma es preferiblemente entre 5 mm y 100 mm, más preferiblemente entre 10 mm y 50 mm, lo más preferiblemente 30 mm a 40 mm para un Magnetron de 6 kW.

30 El generador de plasma de microondas empleado en la boquilla de plasma es preferiblemente un magnetrón coaxial. Además, las microondas generadas y utilizadas en las boquillas de plasma tienen preferiblemente una longitud de onda del dispositivo de entre 0.01 m y 1 m, más preferiblemente de 0.05 m a 0.5 m, lo más preferiblemente de 0.1 m a 0.3 m. Además, la energía suministrada al generador de microondas de cada boquilla de plasma está preferiblemente entre 0.1 kW y 500 kW, más preferiblemente entre 0.5 kW y 120 kW, lo más preferiblemente entre 1 kW y 75 kW.

35 El flujo de material a través de la boquilla de plasma comprende preferiblemente un fluido, más preferiblemente un gas. Además, el flujo a través de la zona de generación de plasma de la boquilla de plasma contiene preferentemente uno o más reactivos. Preferiblemente, una parte principal, o idealmente la totalidad, de al menos uno de los reactivos fluye a través de la zona de generación de plasma. Los reactivos pueden constituir más del 50 % del flujo a través de la zona de generación de plasma, más preferiblemente más del 75 % del flujo y lo más preferiblemente más del 90 % del flujo.

40 El fluido alimentado a la boquilla de plasma está preferiblemente a una temperatura de entre -20 °C y +600 °C, más preferiblemente de 0 °C a 200 °C, lo más preferiblemente de 50 °C a 150 °C. La presión dentro de la boquilla de plasma es preferiblemente de 0.01 bar abs. hasta 8 bar abs., más preferiblemente desde 0.3 bar abs. a 5 bar abs., lo más preferiblemente de 0.8 bar abs. a 3 bar abs. El volumen de la región generadora de plasma está preferiblemente entre $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kW}$ y $10 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kW}$, más preferiblemente $4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kW}$ - $10 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kW}$, lo más preferiblemente $6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kW}$ - $10 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kW}$. Considerando que, el tiempo medio de residencia dentro de la boquilla de plasma puede ser de 10^{-6} segundos a 10^{-1} segundos, dependiendo del material a ionizar.

45 Como ejemplo, la energía específica consumida para craquear completamente el metano que pasa a través del generador de plasma de microondas de la presente invención con una eficiencia del 100 % es de aproximadamente 23 kJ/mol.

50 Mientras que el volumen de la cámara del reactor dependerá en cada caso de la aplicación prevista y los requisitos de procesamiento del reactor de plasma, en el caso de un generador de plasma de microondas de 2.45 GHz, los intervalos de volúmenes ejemplares son 10^{-3} m^3 a 10^3 m^3 , más preferentemente de 10^{-2} m^3 a 10^2 m^3 , lo más preferentemente de 1.5 m^3 a 10^2 m^3 . Sin embargo, el volumen de la cámara de reacción es preferiblemente no menos de $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ por boquilla por kW, pero puede extenderse hacia arriba sin limitación.

Además, el tiempo de residencia dentro de la cámara de reacción depende de la reacción o reacciones que ocurren dentro de la cámara y del producto de salida deseado, pero puede extenderse desde 0.1 segundos hasta varias horas.

65 La disposición mostrada en la Figura 7 representa un generador de plasma mejorado alimentado por dos pequeños magnetrones. Los dos magnetrones (no mostrados) están dispuestos para alimentar un tubo 404 de cuarzo común

sin interferir entre sí o sin requerir elaborados sistemas de bloqueo de fase y frecuencia. Cada boquilla de plasma del reactor que se muestra en la Figura 2 puede ser de este tipo, en cuyo caso el reactor es capaz de generar significativamente más energía que un reactor que emplea boquillas de plasma del tipo que se muestra en la Figura 6.

En la Figura 7, dos guías de ondas 405 y 406 están diseñadas para estrecharse de manera que el campo E se intensifica en la región del tubo 404 de cuarzo común. El gas a procesar pasa a través del tubo 404 de cuarzo desde el colector 104 en la dirección indicada mediante la flecha 402 hacia la cámara 102 de reacción. El gas pasa primero a través de una región generadora de plasma producida por la guía de ondas 405 del magnetrón y luego a través de una región generadora de plasma formada por la guía de ondas 406 del magnetrón. Es preferible para las dos regiones generadoras de plasma estar muy cerca, de modo que se forme una única nube de plasma que se extiende entre las dos regiones generadoras de plasma, lo que no quiere decir que las guías de ondas 405, 406 deben ser antiparalelas, como se muestra en la Figura 7. Esta orientación se muestra solo para mayor claridad. Con esta disposición, se puede aumentar la intensidad y la envoltura (longitud) del plasma generado.

Como se indicó anteriormente, otros diseños de generador de plasma son conocidos en la técnica y también son adecuados para su uso con esta invención. Sin embargo, es probable que la producción a escala comercial requiera un alto rendimiento de los gases de alimentación y, como tal, se prefiere un generador de plasma que funcione a la presión atmosférica o por encima de ella. Las microondas son generadores de plasma atmosférico particularmente eficaces para el procesamiento de gas combustible.

Con referencia a la Figura 8, se muestra un primer diseño de inductor de remolino que se incorpora en la boquilla 105 de plasma antes de la región generadora de plasma. Si se usa en combinación con los generadores mostrados en las Figuras 6 y 7, el inductor de remolino está ubicado en el tubo 303, 404 de cuarzo aguas arriba de las regiones generadoras de plasma. El propósito del inductor de remolino es agitar el gas de alimentación en un flujo estabilizador, como un flujo de vórtice, a medida que pasa a través de la zona de plasma. El inductor de remolino comprende una serie de ranuras 502 en una saliente 501. Una brida 503 de acoplamiento, que puede enfriarse externamente, permite un sellado flexible de manera que el tubo 303, 404 de cuarzo no se dañe al contraerse y permanecer sellado al expandirse, porque las fluctuaciones de temperatura son comunes durante el proceso de generación de plasma. El gas se impulsa a presión al interior de la saliente 501 y se fuerza a salir por las ranuras 502, lo que induce un patrón de flujo generalmente helicoidal. El sello 503 evita el reflujo al colector.

En la Figura 9 se muestra un inductor 110 de remolino alternativo. Esto se basa en una versión pequeña de un tubo Hilsch, que se sabe que induce un fuerte movimiento de vórtice en el flujo de gas. El gas comprimido se alimenta tangencialmente a un tubo 600 de mayor diámetro a lo largo de los brazos 601a, b, c, d. El gas sale en un flujo de vórtice tanto del tubo 600 de diámetro mayor como de un tubo 602 de diámetro más pequeño contiguo. El gas del tubo 602 más pequeño tiene el flujo de vórtice más fuerte y luego se alimenta a la región de generación de plasma. El gas que sale del tubo 600 más grande se recircula.

También se prevén diseños alternativos de inductores de remolino, por ejemplo, un impulsor en espiral, una disposición de tubo Vortex o una disposición de ventilador simple. Todo lo que es importante es que el gas de alimentación se induzca a un flujo estabilizador antes de pasar a través de la región de generación de plasma de la boquilla. El propósito es doble. En primer lugar, estabilizar el plasma dentro del tubo 303, 404 de cuarzo y así asegurar que persista en la cámara de reacción. En segundo lugar, para garantizar que todo el gas de alimentación pase a través de la región generadora de plasma, lo que mejora la uniformidad de su procesamiento.

Puede verse a partir de la descripción anterior que existen o pueden desarrollarse muchas aplicaciones útiles de un reactor de plasma de acuerdo con esta invención. En particular, se pueden usar realizaciones de la invención para disociar gases de alimentación tales como metano, gas natural y biogás con una eficacia no conocida previamente. Los productos disociados pueden recombinarse para formar combustibles limpios como el gas hidrógeno y subproductos valiosos como el negro de humo de alta calidad.

La invención es adaptable a muchas escalas de funcionamiento. La operación a pequeña escala se presta a suministros de combustible distribuidos a pedido, como estaciones de servicio de hidrógeno para futuros sistemas de transporte basados en hidrógeno como combustible. Alternativamente, la invención podría proporcionar pequeños sistemas domésticos que se integran con pilas de combustible para producir electricidad y agua limpias y ecológicas. La operación a gran escala se presta a sistemas centralizados de producción de hidrógeno limpio.

Debido a la naturaleza aditiva de las múltiples boquillas de plasma que permite ampliar el reactor de plasma de la presente invención, es posible adaptar el reactor de plasma a escapes existentes e integrarlos en escapes futuros de industrias a escala comercial.

Aunque el reactor de plasma se ha descrito principalmente en relación con el uso de fuentes generadoras de plasma de microondas, se prevé que el reactor de plasma de la presente invención pueda emplear otros tipos de fuentes de plasma en combinación con dos o más boquillas de plasma de microondas. Un ejemplo de una fuente de plasma que no es de microondas es el siguiente: tres electrodos dispuestos en un plano de manera que son equidistantes entre sí

- con una región generadora de plasma que se encuentra en el plano de los tres electrodos y equidistante del mismo. Un tubo aislado eléctricamente de un material inerte adecuado, como una cerámica, está dispuesto a lo largo de un eje a 90 grados del plano de los tres electrodos y que interseca ese plano. El tubo se usa para contener un flujo de gas que fluye a través de la región generadora de plasma. Se aplica una CC, CA (que puede ser de alimentación trifásica) o CC pulsada de alto voltaje a los electrodos de modo que se descargue un arco entre los electrodos que pasan a través de las aberturas del tubo y, por lo tanto, a través de la zona de generación de plasma. El arco ioniza el gas que fluye a través de la región generadora de plasma entre los electrodos, produciendo un plasma. El voltaje aplicado a los electrodos debe exceder el voltaje de ruptura del gas que fluye entre los electrodos y la corriente puede estar limitada por los circuitos de control de corriente de modo que la potencia transferida al plasma se controle de acuerdo con la reacción deseada. Cuando el suministro es CA o CC, el plasma es predominantemente térmico; sin embargo, cuando se usa CC pulsada, también se produce un grado de plasma en desequilibrio. Por supuesto, será evidente que el plasma generado se puede estabilizar usando técnicas iguales o similares a las descritas anteriormente.
- 15 Con referencia de nuevo a la figura 1, el gas hidrógeno generado por el generador 100 de plasma se alimenta a través de una línea 61 de alimentación a un módulo 3 de posprocesamiento, mientras que el carbono producido se transporta a un depósito 91 a través de conductos 9 adecuados.
- 20 En la unidad 3 de posprocesamiento, el hidrógeno producido se enfría primero usando un intercambiador de calor/unidad de recuperación de calor (no mostrado) y luego se filtra (por ejemplo, usando métodos de precipitación electrostática) antes de pasar a una fase de purificación (por ejemplo, que comprende celdas de difusión de aleación de paladio de múltiples etapas) y luego al módulo 5 de almacenamiento y distribución a través del conducto 81. Opcionalmente, una fracción del hidrógeno puede dirigirse de regreso al puerto de entrada del reactor de plasma a través de la línea 65 de retorno. La unidad 3 de posprocesamiento también puede comprender una unidad de precipitación electrostática (no mostrada en la figura 1) para recoger cualquier carbono residual en la corriente de hidrógeno. El carbono capturado se alimenta al depósito 91 de carbono a través de la línea 9 de alimentación.
- 30 El calor generado por el proceso de enfriamiento de gas en el módulo 3 de posprocesamiento puede opcionalmente reciclarse mediante el uso de un intercambiador de calor (no mostrado). Opcionalmente, el calor extraído se puede realimentar al módulo 2 de preprocesamiento a través del conducto 64 (que lleva un medio de transporte de calor adecuado conocido en la técnica), donde éste se puede usar en el secado del gas de alimentación. El calor generado también puede dirigirse (opcionalmente) al reactor 100 de plasma (a través del conducto 68) donde puede usarse ventajosamente para precalentar el gas de alimentación antes de entrar en la región de generación de plasma.
- 35 El módulo 5 de almacenamiento y distribución comprende un compresor 83 y un amplificador 84, un recipiente 82 de almacenamiento, interconectado por las líneas 81a, y una instalación 85 de salida desde la cual el hidrógeno generado se puede proporcionar a un consumidor a través de la salida 81b, como se muestra en Figura 1.
- 40 Se prevén cambios en el reactor de plasma distintos de los descritos anteriormente sin apartarse del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos gaseosos, caracterizado por un módulo (2) de pretratamiento de gas conectado de forma fluida a un depósito (66) de gas y al menos a un generador (100) de hidrógeno; y un módulo (3) de posprocesamiento de hidrógeno conectado de forma fluida a través de un conducto (81) de alimentación al generador y a un módulo (5) de almacenamiento y distribución, comprendiendo dicho generador de hidrógeno boquillas (105) de plasma; una cámara (102) de reacción acoplada a cada una de las boquillas de plasma; cada boquilla de plasma comprende un generador (301, 302) de plasma de microondas y un tubo (303) de alimentación para dirigir un flujo del hidrocarburo gaseoso a través del generador de plasma a entradas respectivas a la cámara de reacción, por lo que el generador de plasma de microondas es adecuado para al menos ionizar parcialmente el hidrocarburo gaseoso para formar un plasma antes de la entrada del hidrocarburo al menos parcialmente ionizado en la cámara de reacción, y la cámara de reacción comprende al menos una salida (101) a través de la cual se transporta hidrógeno al módulo (3) de posprocesamiento, y el módulo (2) de pretratamiento comprende medios para precalentar el hidrocarburo gaseoso.
2. El sistema de la reivindicación 1, en el que el módulo (3) de posprocesamiento comprende medios para enfriar el hidrógeno, preferiblemente un intercambiador de calor.
3. El sistema de la reivindicación 1 o 2, que comprende además un conducto (65) de retroalimentación conectado de manera fluida al conducto (81) de alimentación y adaptado para retroalimentar al menos una porción del hidrógeno al generador de hidrógeno.
4. El sistema de una cualquiera de las reivindicaciones 1 - 3, en el que el módulo (5) de almacenamiento y distribución comprende un compresor (83) de hidrógeno y un medio de refuerzo (84), un medio (82) de almacenamiento de hidrógeno y un medio (85) de salida de hidrógeno.
5. El sistema de una cualquiera de las reivindicaciones 1 - 4, que comprende además un depósito (91) de carbono, conectado a través de un conducto (9) al generador (100) de hidrógeno.
6. Un método para producir hidrógeno a partir de un gas que comprende un hidrocarburo, caracterizado por las etapas de:
 - a) alimentar cantidades separadas del gas a una presión controlada a las regiones respectivas donde cada cantidad de gas se somete a un campo electromagnético respectivo, por lo que se genera un plasma en desequilibrio a presión atmosférica y superior en cada región;
 - b) alimentar las cantidades separadas de plasma en una cámara (102) de reacción a través de entradas separadas mientras se controlan las propiedades de flujo del plasma para sostener el plasma y mantenerlo en un estado ionizado hasta que éste entre en la cámara de reacción y durante un período de tiempo a partir de entonces; y
 - c) extraer el hidrógeno producido a través de una salida (101) de la cámara de reacción, por lo que el hidrógeno se puede producir virtualmente bajo demanda, de forma continua y sin la generación de óxidos de carbono, y la respectiva pluralidad de campos electromagnéticos se generan mediante fuentes de microondas separadas e individuales, y
 - d) extraer carbono precipitado de la cámara de reacción.
7. El método de la reivindicación 6, que comprende además la mezcla de dichas cantidades separadas de plasma en la cámara de reacción mientras los plasmas están en un estado ionizado.
8. El método de la reivindicación 6 o 7, en el que el control de las propiedades de flujo del plasma en la etapa b) comprende formar un flujo de gas de vórtice antes de que el gas entre en el estado de plasma.
9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 - 9, que comprende además la introducción de un sustrato en forma de partículas en el plasma en la cámara de reacción.
10. El método de la reivindicación 9, en el que dicho sustrato comprende carbono precipitado extraído de la cámara de reacción.

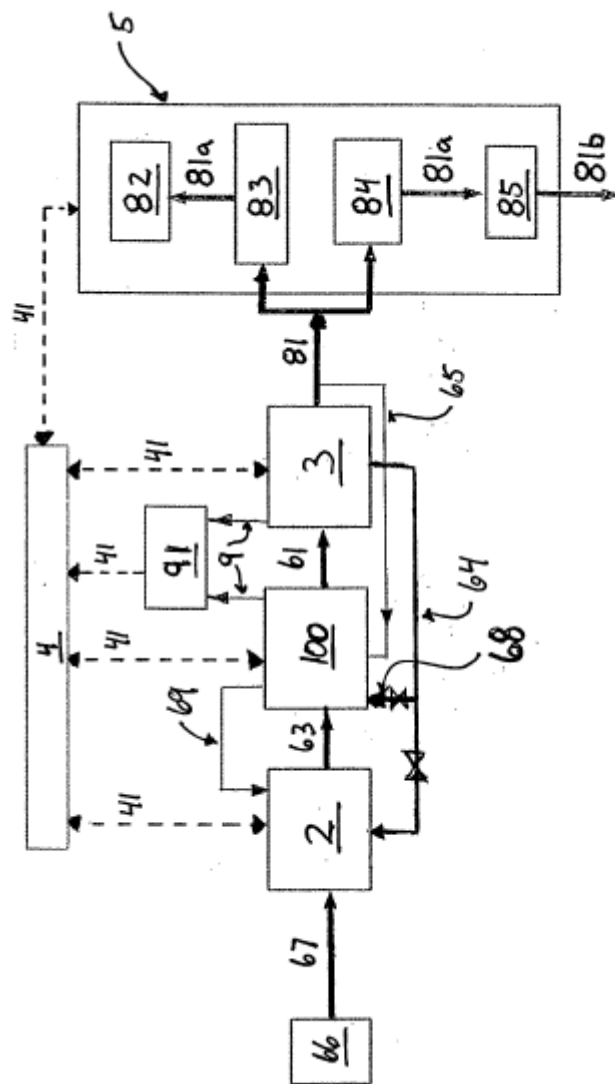


Fig. 1

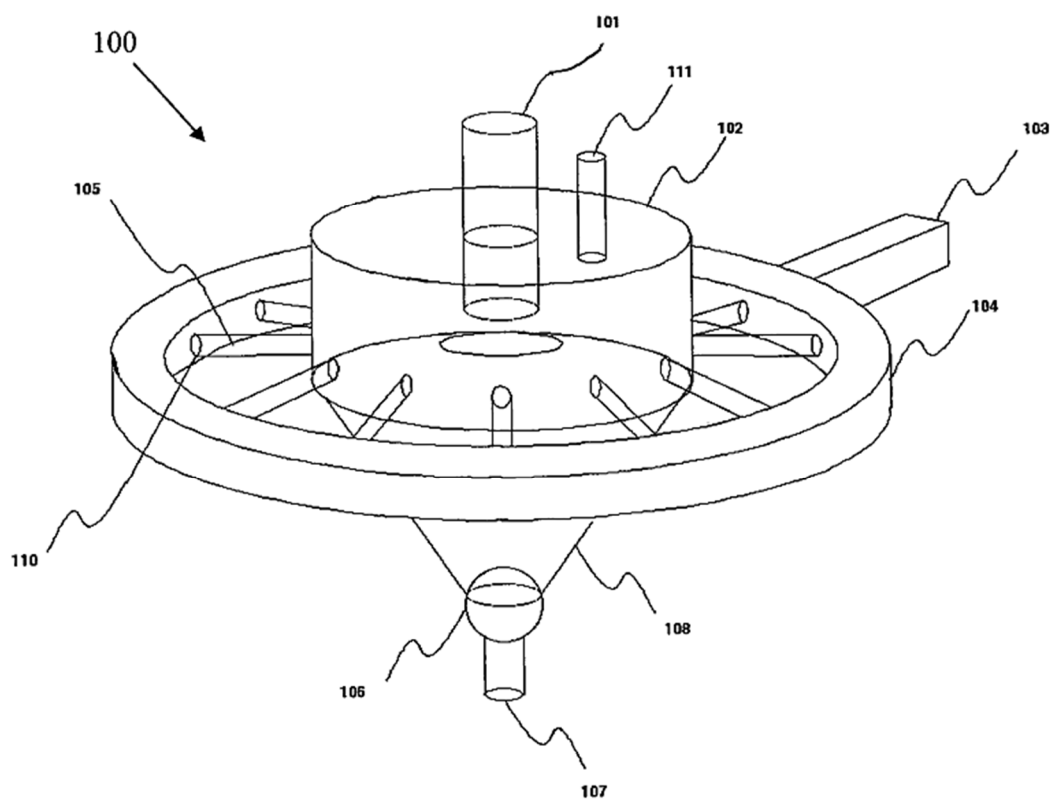


FIG. 2

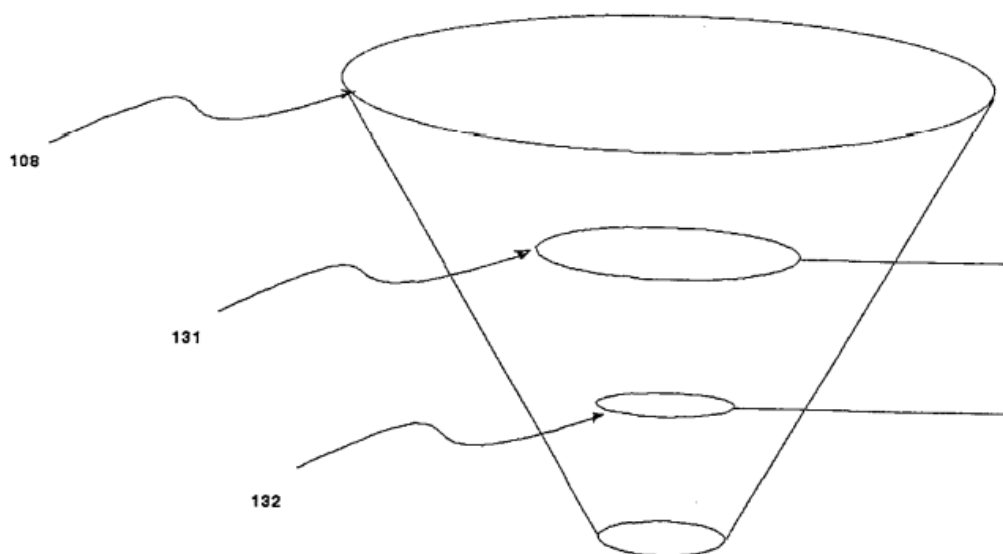


FIG. 3a

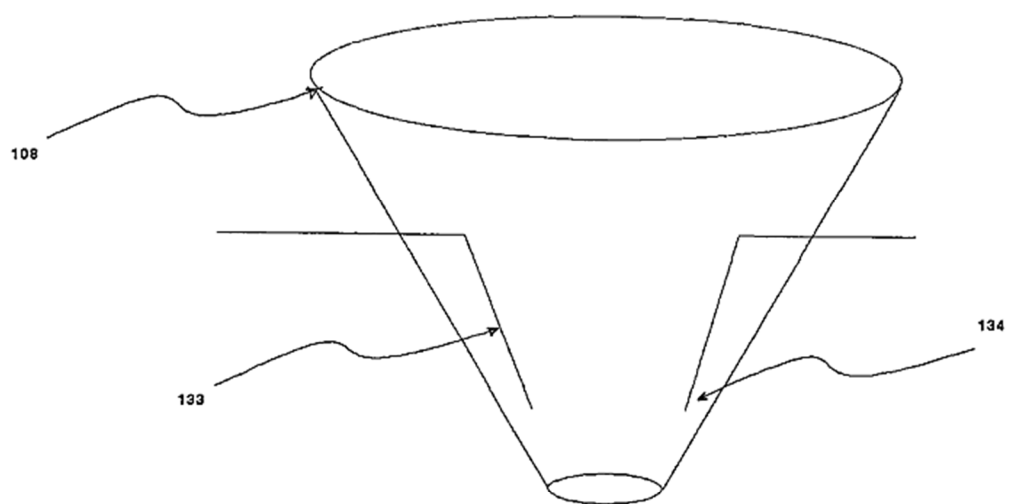


FIG. 3b

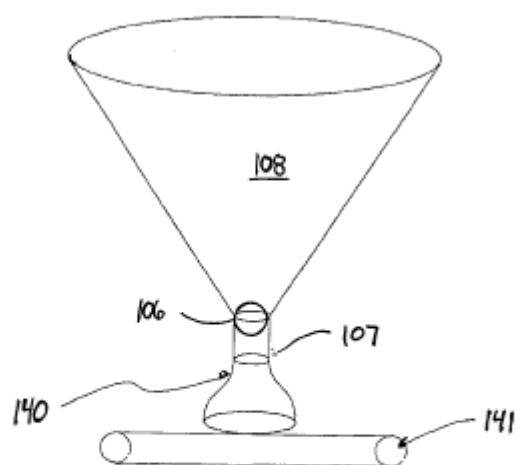


FIG. 4a

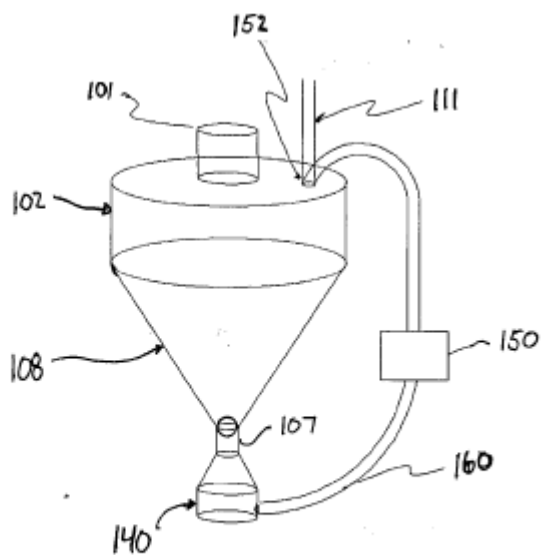


FIG. 4b

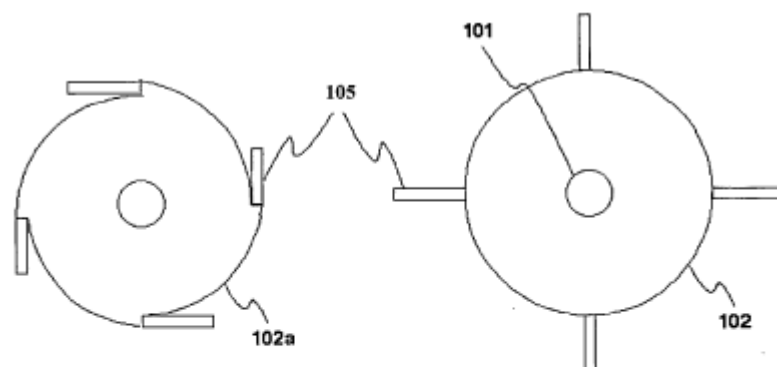


Fig. 5a

Fig. 5b

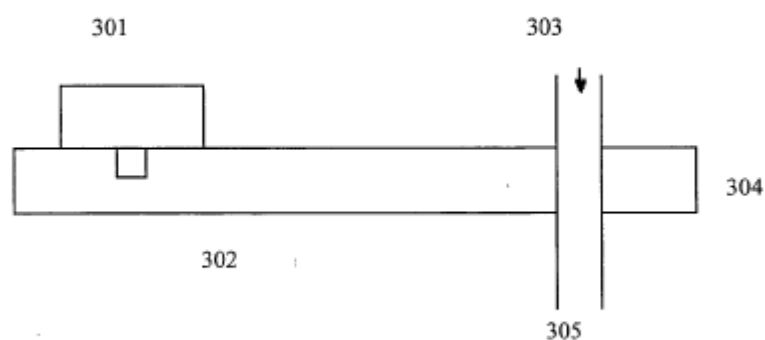


Fig. 6

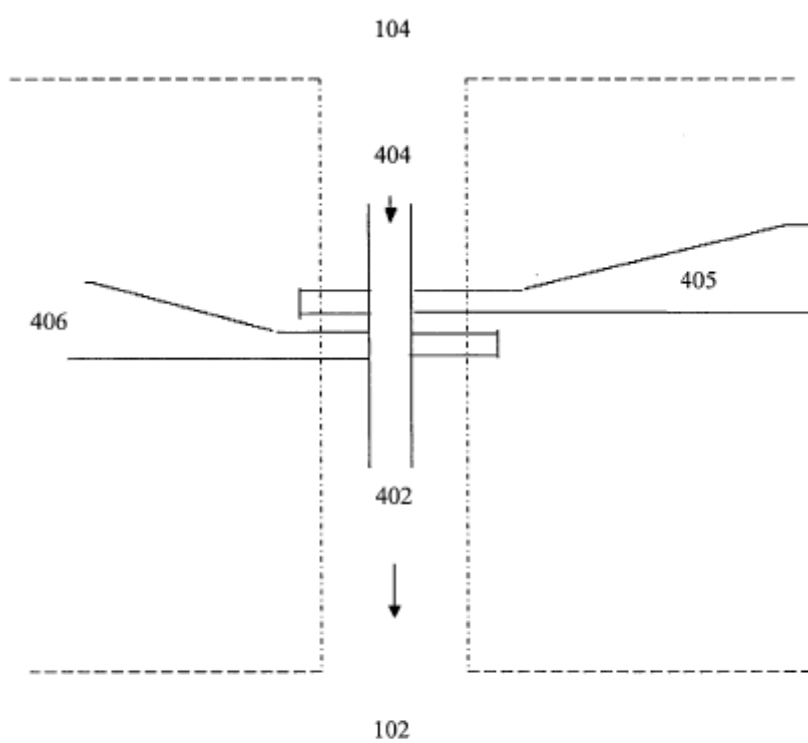


Fig. 7

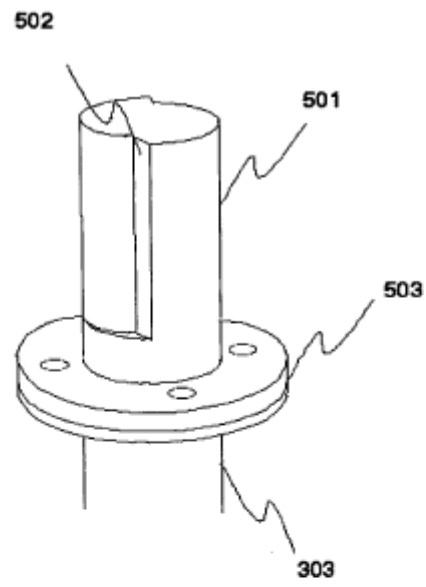


Fig. 8

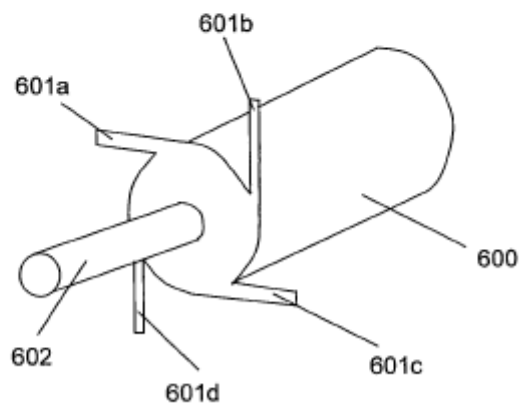


Fig. 9