

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 745 473**

51 Int. Cl.:

H05H 1/54 (2006.01)

F03H 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.10.2015 PCT/EP2015/074879**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.05.2017 WO17071739**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.10.2015 E 15790868 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.06.2019 EP 3369294**

54 Título: **Acelerador de plasma con empuje modulado y vehículo espacial con el mismo**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.03.2020

73 Titular/es:
**AERNNOVA (50.0%)
Poligono Industrial y Tecnológico Illescas,
Avenida de Barajas, 3
45200 Illescas - Toledo , ES y
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (50.0%)**

72 Inventor/es:
**CASTILLO ACERO, MIGUEL ANGEL;
CONDE LOPEZ, LUIS;
DOMENECH GARRET, JUAN LUIS;
DONOSO VARGAS, JOSÉ MANUEL y
DEL RIO FERNANDEZ, EZEQUIEL**

74 Agente/Representante:
CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 745 473 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

Acelerador de plasma con empuje modulado y vehículo espacial con el mismo

Sector de la técnica

5 La presente invención se refiere a fuentes de iones empleadas como motores de plasma para propulsión espacial y correcciones en órbita de sondas espaciales y satélites.

Antecedentes

10 Los propulsores de iones y los aceleradores de plasma producen flujos de iones y electrones de alta velocidad que imparten cantidad de movimiento a las naves espaciales. La propulsión de satélites utilizando chorros de plasma tiene una creciente demanda para mejorar el rendimiento de los satélites. Un importante factor limitante es el agotamiento del propergol, esencial para sus maniobras en órbita, que eventualmente podría forzar la retirada anticipada del satélite. Dichas correcciones de órbita y los cambios de orientación compensan las pequeñas variaciones producidas en el movimiento periódico de los satélites por las fuerzas gravitacionales del sol y la luna, así como por la distribución irregular de la masa terrestre. Reemplazar los motores de cohetes químicos habituales con sistemas de propulsión basados en plasma, caracterizados por altas velocidades de eyección del propergol y grandes valores del impulso específico, aumenta la vida útil operacional de los satélites.

20 En los dispositivos de propulsión de plasma, el gas neutro empleado como propulsor se introduce en una cavidad longitudinal denominada cámara de plasma o de descarga. Esta última tiene diferentes formas y materiales y dispone de un lado abierto para permitir la salida de los iones. El plasma compuesto de electrones e iones se produce dentro de la cámara de descarga por la ionización colisional de átomos de gases neutros mediante electrones emitidos desde cátodos activos. Tal como se usa en el presente documento, el término "cátodo activo" se refiere a electrodos emisores de electrones que tienen densidades de corriente de emisión sustanciales, aproximadamente por encima de 10^{-2} A/cm². Estos dispositivos, como los cátodos huecos o los emisores de electrones termoiónicos, pueden funcionar como fuentes de electrones. Por el contrario, los "cátodos pasivos" también son electrodos polarizados negativamente pero tienen densidades de corriente de emisión de electrones mucho más bajas o insignificantes, típicamente por debajo de 10^{-3} A/cm².

25 Los iones de este plasma fluyen a través del lado abierto de la cámara de descarga siendo acelerados por distintos mecanismos físicos. El empuje es impartido a la nave por la corriente de plasma que se crea cuando se agregan electrones a dicho haz de iones de alta energía para neutralizar los efectos de carga espacial. Este chorro de plasma compuesto de electrones e iones también podría emplearse en aplicaciones para el procesamiento de materiales, dirigiendo el flujo de los iones energéticos sobre la superficie de materiales con objeto de modificar sus propiedades físicas.

30 Los aceleradores de plasma electrostáticos pueden clasificarse en términos generales como motores iónicos de rejillas, propulsores de efecto Hall y aceleradores de plasma de etapas múltiples. Solo los motores iónicos de rejillas producen un empuje variable o modulado mediante un control eléctrico de la velocidad de salida del flujo de plasma, manteniendo constantes otros parámetros operativos del propulsor. Este control o modulación del empuje es esencial para las maniobras orbitales y/o la formación en vuelo de los satélites. Otros sistemas propulsivos proporcionan un empuje constante esencialmente determinado por los parámetros de la descarga de plasma, como la corriente de electrones ionizantes, el flujo másico del gas neutro, etc.

35 Los motores iónicos de rejillas producen la aceleración electrostática de los iones extraídos de un plasma y se describen en los documentos US 4466242, US 3956666, US 3969646 o EP 0733800B1. Las paredes conductoras de su cámara de descarga constituyen el ánodo de una descarga eléctrica, producida por los electrones ionizantes emitidos por un primer cátodo activo dispuesto en su interior.

40 Un conjunto mínimo de dos rejillas paralelas con múltiples aberturas está dispuesto frente al lado abierto de la cámara de descarga para la extracción y aceleración del haz de iones. La primera rejilla, habitualmente denominada rejilla de extracción o de pantalla, está conectada eléctricamente al cátodo activo y permite que los iones pasar a través de sus espacios abiertos. La segunda rejilla está polarizadas a elevados voltajes y acelera el flujo de iones salientes. Finalmente, un segundo cátodo activo dispuesto más allá de las rejillas proporciona electrones para neutralizar los efectos de la carga espacial del haz de iones y produce la corriente de plasma eyectada. El voltaje de aceleración de la segunda rejilla permite modular la velocidad de los iones que salen y, por lo tanto, el empuje producido por el motor iónico.

45 Una tercera rejilla desaceleradora descrita en US 5369953 y US 5559391 se emplea para evitar las colisiones de intercambio de carga entre iones y átomos neutros y también reduce la erosión de la rejilla del acelerador por el reflujo de electrones del segundo cátodo activo empleado para la neutralización del haz de iones. Dicha rejilla protectora

extiende la vida útil del sistema. Se han descrito mejoras adicionales de este esquema básico, como mayores tasas de producción de iones por medio de campos magnéticos con cúspides múltiples dentro de la cámara de descarga como en US 4466242 o redes aceleradoras mejoradas en US 2010/0212284A1.

5 Los motores de iones con rejillas requieren un mínimo de dos cátodos activos y, por lo tanto, una serie de fuentes de alimentación que aumentan la complejidad del sistema eléctrico, así como su consumo de energía eléctrica. El control térmico también se convierte en un problema debido a las elevadas temperaturas operativas de los cátodos activos, por lo general más de 2000 K. Diferentes elementos del propulsor se calientan a altas temperaturas por la emisión de radiación infrarroja. Además, los elevados voltajes de polarización requeridos para la aceleración del haz de iones, típicamente de unos pocos kilovoltios, también dan lugar a chispas y arcos eléctricos entre las rejillas, también sometidas a esfuerzos térmicos y al bombardeo de partículas cargadas. Todos estos factores reducen la vida útil de los motores de iones por rejillas.

15 El principio del acelerador de plasma llamado propulsor de efecto Hall es la aceleración electrostática de iones sin las rejillas requeridas por los motores iónicos. Esta configuración, descrita en EP 0541309A1 o US 8468794 (y en la solicitud internacional relacionada WO 2011/088335A1), es más simple y necesita menos fuentes de alimentación para operar. La cámara de descarga es una cavidad cilíndrica de forma de anular hecha de un material no conductor o cerámico que se extiende a lo largo de su dirección axial. El ánodo anular pasivo está ubicado en su fondo posterior cerrado, en la dirección opuesta al lado abierto de esta cámara destinado a la salida del haz de iones. Un campo magnético radial intenso dentro de la cámara de plasma es producido por la configuración de un primer polo magnético dispuesto en el eje central, que está rodeado por la cámara de plasma. La configuración del segundo polo rodea la cámara de plasma en su exterior, como un polo magnético opuesto.

20 El único cátodo activo de los propulsores de efecto Hall está ubicado fuera de la cámara de descarga, cerca de la salida del haz de iones. El flujo de electrones emitidos se propaga en dos direcciones, hacia el interior de la cámara de descarga y también a lo largo de la dirección del haz de iones saliente para neutralizar su carga espacial.

25 El campo magnético radial en la cámara de descarga anular inhibe el movimiento axial del electrón confinándolos a lo largo de las trayectorias de deriva en forma anular. Estos electrones confinados radialmente ionizan el gas neutro introducido en la cámara de descarga anular. Además, la alta tensión aplicada entre el cátodo activo y el ánodo produce un campo eléctrico dentro de la cámara de descarga a lo largo de su eje de simetría que impulsa los iones hacia su extremo abierto. Esta combinación de campo magnético radial y campo eléctrico axial produce una corriente electrónica que circula rápidamente alrededor del eje de simetría del propulsor con un desplazamiento lento hacia el ánodo. Los iones se ven menos afectados por el campo magnético y son acelerados por el campo eléctrico axial originado por la densidad de carga negativa, causada por la concentración de electrones en el extremo abierto del propulsor.

35 El empuje axial proporcionado por los propulsores de efecto Hall no es modulado y está esencialmente determinado por los parámetros físicos de descarga de plasma. Modificaciones de este esquema básico con configuraciones de campo magnético más complicadas y esquemas mejorados se han divulgado en US 5847493, US 7543441B2, US 5845880 o en US 2012/0206045A1

40 La eficiencia en la ionización y el impulso específico de los propulsores de efecto Hall son más bajos que los que pueden alcanzar los motores iónicos. El fuerte campo magnético también introduce oscilaciones rotacionales, ondas e inestabilidades en el plasma dentro de la cámara de descarga anular con frecuencias aproximadamente entre 1 kHz y decenas de MHz. Además, el bombardeo de iones y electrones sobre la superficie de las paredes dieléctricas de la cámara de descarga deposita importantes cantidades de energía, en particular en su sección de salida. La subsiguiente erosión y degradación de estas paredes dieléctricas determina la vida útil de los propulsores de efecto Hall.

45 La configuración del acelerador de plasma denominado de etapas múltiples descrita en DE 19828704A1, US 6523338B1, US 2003/0048053A1 o US 7084572B2 también proporciona un empuje axial constante sin modulación. Al igual que en los aceleradores de efecto Hall, la cámara de descarga cilíndrica está hecha de materiales no conductores y se extiende longitudinalmente con un extremo abierto para la salida del haz de iones. La fuente de electrones está dispuesta frente a dicho lado abierto, y también una fracción de los electrones emitidos se guía hacia la cámara de descarga. Por lo tanto, el cátodo activo proporciona electrones para la neutralización del haz de iones salientes y también para la ionización colisional de gas neutro.

55 Esta cámara de descarga está rodeada por imanes permanentes anulares con polaridades alternadas dispuestos a lo largo de su eje longitudinal. Confinan los electrones a lo largo de un campo magnético periódico en el espacio a lo largo de la dirección longitudinal, mientras que los movimientos de los iones más masivos del gas de operación se ven menos afectados. El ánodo se sitúa en el extremo cerrado de esta cámara de plasma tubular y se disponen electrodos adicionales intermedios de forma anular en su interior a lo largo de su dirección longitudinal.

5 Estos electrodos intermedios están concebidos para la aceleración de los iones y se encuentran conectados eléctricamente a los potenciales eléctricos crecientes. En consecuencia, los electrones están esencialmente confinados cerca del eje de la descarga, mientras que los iones se aceleran en la dirección hacia el extremo abierto de la cámara de descarga. Además, el campo eléctrico también acelera los electrones desde el cátodo activo corriente abajo hacia el ánodo. Esta combinación de confinamiento de los electrones por el campo magnético y aceleración por el campo eléctrico local incrementa la tasa de ionización del gas de operación dentro de la cámara de descarga. Como en los aceleradores de plasma Hall, el flujo de iones está básicamente determinado por los parámetros físicos de la descarga de plasma, que controlan el empuje axial suministrado.

10 Las corrientes de plasma producidas por los propulsores de varias etapas están menos colimadas que las de los propulsores Hall y los motores de iones de rejillas. El confinamiento de los iones es mejor que en los propulsores Hall, excepto en las posiciones de las cúspides del campo magnético a lo largo del eje longitudinal de la cámara de descarga, lo que reduce el desgaste de sus paredes dieléctricas. Además, la simetría radial del campo magnético en propulsores de múltiples etapas produce un régimen de rotación de radial en la columna de plasma a lo largo de la dirección perpendicular a los campos eléctrico y magnético, con frecuencias típicas de 15-35 kHz, que pueden causar regímenes turbulentos.

15 El propulsor de plasma con una configuración magnética de múltiples cúspides descrita en US 2012/0167548A1 o en el EP 2414674A1 está destinado esencialmente a proporcionar un empuje no axial al cambiar el chorro de plasma eyectado. La cámara de descarga cilíndrica que también tiene un lado abierto y un lado cerrado está rodeada por una pluralidad de imanes situados en el plano perpendicular a su eje de simetría. El ánodo está ubicado en el extremo cerrado de la cámara de descarga y la fuente de electrones activa se coloca frente a su lado abierto para la ionización y neutralización del gas de operación. En esta configuración magnética, el polo de cada imán está dispuesto adyacente al polo similar del imán adyacente y al menos uno de ellos es un electroimán, dispuesto para producir un campo magnético variable.

20 Esta configuración produce un empuje constante sin modulación a lo largo de la dirección axial en función de los parámetros físicos de descarga de plasma. El control del campo magnético variable en el extremo abierto de la cámara de descarga defleca parcialmente la salida de iones del eje de simetría, agregando un componente de empuje no axial. Alternativamente, este propósito también podría lograrse por medio de electrodos pasivos adicionales combinados con imanes permanentes o electroimanes dispuestos fuera de la cámara de descarga.

25 Las variaciones en el tiempo y los transitorios del campo magnético variable introducen fluctuaciones de las corrientes de partículas cargadas en el plasma. Esto produce oscilaciones en la desviación de salida del haz de plasma en la dirección perpendicular al eje de simetría del propulsor que son difíciles de controlar y, por lo tanto, el empuje suministrado.

Breve descripción de la invención

35 Sería deseable un enfoque diferente que aborde las deficiencias del estado de la técnica. La presente invención propone una configuración ventajosa de acelerador de plasma que permite el control o modulación de la aceleración utilizando solo un cátodo activo. Un ejemplo de realización proporciona un dispositivo de aceleración de plasma de rejillas en el que el voltaje aplicado a una de dichas mallas controla o modula la corriente de plasma de salida y, por lo tanto, la magnitud del empuje impartido a la nave espacial.

40 La invención emplea un solo cátodo activo tanto para la descarga de plasma como para la neutralización del haz de iones, reduciendo el impacto térmico y el consumo de energía eléctrica. Además, los voltajes impartidos a las rejillas siempre están por debajo del rango del kilovoltio, mucho más bajos que en los motores iónicos. Esto reduce el desgaste de las rejillas causado por el bombardeo de electrones e iones, así como los posibles arcos eléctricos entre sus superficies metálicas.

45 La invención proporciona un acelerador de plasma con una cámara de descarga eléctricamente conductora (por ejemplo, metálica) extendida, preferentemente a lo largo de un eje de simetría, con un extremo abierto. Frente a esta abertura, se disponen al menos dos rejillas conductoras paralelas están dispuestas, que llamaremos aquí rejilla catódica y rejilla de control. Sus espacios abiertos están alineados para facilitar el flujo de partículas cargadas a través de los mismos. La invención también puede comprender un sistema de suministro de propergol, dispuesto para introducir el gas de operación en la cámara de descarga.

50 Esta configuración del acelerador de plasma comprende además una fuente de electrones colocada cerca de la rejilla de control, que está polarizada negativamente con respecto a las paredes eléctricamente conductoras de la cámara de descarga. Este cátodo activo proporciona electrones tanto para la ionización del gas de operación como para la neutralización del haz de iones eyectados. El sistema también incluye una primera fuente de alimentación conectada entre este cátodo activo y las paredes de la cámara de descarga que proporciona un voltaje de aceleración V_{AC} para electrones e iones. Este campo eléctrico impulsa una fracción de los electrones emitidos desde la fuente de electrones

a la cámara de descarga, que pasan a través de los espacios abiertos de las rejillas de control y cátodo. Dicho campo eléctrico también acelera hacia el exterior los iones que salen hacia el extremo abierto de la cámara de descarga.

5 Dentro de la cámara de descarga también existe un campo eléctrico adicional entre sus paredes y al menos dos cátodos pasivos. El primer cátodo pasivo es de tamaño pequeño, ubicado a lo largo del eje de simetría del sistema dentro de la cámara de descarga y cerca de su extremo posterior cerrado. El segundo cátodo pasivo es la rejilla catódica dispuesta delante del extremo abierto de la cámara de descarga. El sistema también incluye una segunda fuente de alimentación para impartir un voltaje eléctrico V_{DS} entre la cámara de descarga y estos dos cátodos pasivos.

10 En esta configuración, las líneas de campo eléctrico desde las paredes en el lado posterior de la cámara de descarga se enfocan sobre el pequeño cátodo pasivo central. Las líneas de campo eléctrico de la sección delantera de la cámara de descarga también terminan en la dirección opuesta sobre la superficie de la rejilla catódica.

15 Una fracción de los electrones del cátodo activo entra a la cámara de descarga, donde se aceleran a lo largo de las líneas del campo eléctrico, aumentando allí su tasa de ionización por colisiones con el gas neutro. Los iones también se mueven a lo largo de las líneas del campo eléctrico hacia el cátodo pequeño en la parte posterior o hacia la rejilla catódica. Dentro de la cámara de descarga, los iones se aceleran hacia su sección de salida. Este efecto de enfoque de iones dentro de la cámara de descarga produce un flujo de iones hacia afuera que sale de la cámara de descarga a través de los espacios abiertos alineados de las rejillas catódica y de control. La configuración de los electrodos en la presente invención difiere de los aceleradores de plasma de múltiples etapas en los que la aceleración iónica es proporcionada por electrodos anulares dispuestos a lo largo de la cara interna de su cámara de descarga dieléctrica.

20 Esta configuración del acelerador de plasma también comprende una tercera fuente de alimentación para impartir el voltaje V_{CT} a la red de control con respecto a la tierra eléctrica. Al contrario de los motores iónicos de rejillas, este voltaje negativo V_{CT} no está diseñado para la aceleración de iones, sino para el control del empuje. La rejilla de control se encuentra entre la rejilla catódica y el cátodo activo dispuesto fuera de la cámara de descarga. Cuando está polarizada negativamente, se desarrolla un pozo de potencial eléctrico con una profundidad controlada por el potencial V_{CT} impartido a la rejilla de control. Esto reduce la entrada de electrones ionizantes del cátodo activo, que son repelidos por la rejilla de control. La salida de iones también se ve obstaculizado, porque solo una fracción de los iones con energía sobre un umbral determinado por V_{CT} podría moverse hacia afuera más allá de la rejilla de control. En consecuencia, el voltaje de control V_{CT} aplicado a la malla de control permite la modulación del flujo de salida de iones y, por lo tanto, el empuje axial suministrado por el acelerador de plasma.

30 Otra realización de la presente invención comprende además una pluralidad de imanes permanentes espaciados rodeando la cámara de descarga, a lo largo del eje del propulsor, y adicionalmente dispuestos en su extremo posterior cerrado. Estos imanes tienen polaridades alternas con sus polos norte y sur separados entre sí de tal manera que el polo de cada imán es adyacente al polo opuesto del imán próximo. La realización comprende además una cubierta que encierra el acelerador de plasma, que protege al equipo externo del intenso campo magnético producido por dichos imanes.

35 Esta configuración magnética preferida tiene polos magnéticos alternados tanto a lo largo de la dirección radial como a lo largo del eje longitudinal de simetría. Por lo tanto, las líneas del campo magnético a lo largo de las direcciones axial y radial conectan las superficies de los imanes cercanos. Esta configuración especular múltiple de las líneas de campo magnético a lo largo de las direcciones axial y radial restringe el movimiento de electrones. La estructura de múltiples botellas magnéticas limita el movimiento de deriva axial y radial de los electrones y evita el aumento de las inestabilidades del plasma, lo que mejora la tasa de ionización por impacto de electrones. Por otra parte, el movimiento de iones masivos dentro de la cámara de descarga no se ve afectado por estos campos magnéticos locales.

45 Dicha configuración de imanes permanentes difiere de los aceleradores de plasma Hall o de etapas múltiples. En el primero, el campo magnético es producido por una configuración anular de dos polos y el confinamiento de electrones tiene lugar esencialmente a lo largo de la dirección radial, mientras que la corriente de electrones circula dentro de la cámara de descarga en forma de anillo. En el acelerador de plasma de múltiples etapas, los imanes anulares están dispuestos a lo largo de la cámara de descarga y están esencialmente destinados a confinar los electrones en un campo magnético espacialmente periódico a lo largo de la dirección axial, manteniendo la simetría radial de la cámara de descarga.

50 Por lo tanto, los electrones del cátodo activo que entran en la cámara de descarga describen un movimiento complejo. Se aceleran a lo largo de las líneas de campo eléctrico entre el cátodo pasivo y las paredes de la cámara y también están confinados por múltiples campos en forma de botella magnética. Este efecto combinado de confinamiento y aceleración de los electrones aumenta en gran medida la tasa de ionización colisional de los electrones con los átomos de gas neutros y, por lo tanto, la tasa de producción de iones.

55 Los masivos iones del gas de operación son menos afectados por el campo magnético y esencialmente se mueven a lo largo de las líneas del campo eléctrico dentro de la cámara de plasma. Las cargas positivas se mueven hacia el

pequeño cátodo pasivo en la parte posterior o hacia la rejilla catódica en la sección de salida de la cámara de descarga. Los iones se aceleran hacia afuera por el efecto de enfoque del campo eléctrico y salen a través de los espacios abiertos alineados de las rejillas catódica y de control.

5 Esta configuración del acelerador de plasma es ventajosa debido a su estructura simple que necesita solo tres fuentes de alimentación y requiere un menor consumo de energía eléctrica y del gas de operación. Además, empleando solo un cátodo activo tiene requisitos menos exigentes para el control térmico y las conexiones eléctricas. Estas reducciones en la cantidad del propergol requerido para sostener la descarga de plasma y el consumo de energía eléctrica son ventajosos para los satélites. En particular, la energía eléctrica disponible está limitada por el rendimiento de los paneles solares y su exposición a la luz solar a lo largo de la órbita.

10 Las realizaciones preferentes de la presente invención se describirán ahora a modo de ejemplo solo con referencia a los dibujos adjuntos.

Breve descripción de los dibujos

15 Una serie de dibujos que ayudan a comprender mejor la invención y que están expresamente relacionados con una realización de dicha invención, presentada como un ejemplo no limitativo de la misma, se describen muy brevemente a continuación.

La figura 1 es un esquema en planta transversal del acelerador de plasma por rejillas y sus conexiones eléctricas básicas de acuerdo con la realización preferida de la presente invención. La figura también muestra la disposición de las coronas de imanes permanentes con polaridades alternativas a lo largo de la dirección longitudinal de la cámara de descarga.

20 La Figura 2 es un esquema en planta de la sección transversal de la distribución de la línea del campo eléctrico (líneas de puntos) entre los dos cátodos pasivos dentro de la cámara de descarga que se muestra en la Figura 1.

La figura 3 es un esquema de las coronas de los imanes permanentes 13, también indicado en la figura 1, que muestra los imanes permanentes con polaridades alternativas dispuestas concéntricamente alrededor de la cámara de descarga 11 y encerradas por la carcasa para el aislamiento del equipo externo del campo magnético.

25 La figura 4 representa la corriente de iones 18 contra el voltaje de control de haz de iones V_{CT} para diferentes voltajes de aceleración V_{AC} indicados en la figura 1 según se mide en una realización de la presente invención.

Descripción de al menos una realización de la invención

30 La Fig. 1 muestra el esquema en planta de la sección transversal a lo largo de la dirección de simetría axial de la presente invención con sus conexiones eléctricas. El gas neutro empleado como propergol se introduce a través de la tubería 10 en la cámara de descarga 11. La tubería 10 está aislada eléctricamente del sistema de inyección controlada de gas por el conector cerámico 12.

35 El plasma se produce esencialmente por ionización colisional de los átomos de gas neutro por electrones del cátodo activo 19 situado fuera de la cámara de descarga 11. La fuente de electrones 19 puede tener diferentes formas, como una descarga de plasma de cátodo hueco o un emisor de electrones termoiónico. Este cátodo activo 19 proporciona electrones a lo largo de la dirección de la rejilla de control 18 y también en la dirección opuesta del haz de iones de salida indicado por la flecha en la Fig. 1 para la neutralización de la carga espacial. El bloque HC en las Figs. 1 y 2 representan el sistema de control y calentamiento de la fuente de electrones 19.

40 Una fracción de los electrones emitidos desde el cátodo 19 ingresa en la cámara de descarga 11 a través de los espacios abiertos alineados de las rejillas de control 18 y catódica 14. Resultan atrapados dentro de la cámara de descarga por los múltiples campos de botella magnética producidos por las coronas de imanes permanentes 16 mostrados en las Figs. 1 y 3.

45 La Fig. 1 muestra dos electrodos que actúan como cátodos pasivos; el electrodo central 13 y la rejilla catódica 14, colocados frente al extremo abierto de la cámara de descarga 11. El cátodo central 13 está aislado eléctricamente de la cámara de descarga 11 por la carcasa de cerámica 15, que coloca este electrodo 13 sobre el eje longitudinal de simetría del sistema. La tensión V_{DS} de CC se aplica entre las paredes conductoras de la cámara de descarga y los dos cátodos pasivos conectados eléctricamente 13 y 14. El esquema de la Fig. 2 muestra las líneas de campo eléctrico resultantes de esta configuración de tres electrodos con simetría cilíndrica alrededor de la dirección longitudinal del propulsor por plasma.

50 El material conductor de la cámara de descarga 11 también es esencialmente transparente al campo magnético producido por los imanes permanentes 16 de las Figs. 1 y 3. Las tres coronas 16 están hechas de ocho imanes

permanentes con polaridades alternadas que se muestran en la Fig. 3 y se colocan de manera concéntrica a la cámara de descarga 11. Estas coronas 16 de imanes permanentes también están dispuestas como en la Fig. 1 con polaridades magnéticas alternadas a lo largo de la dirección longitudinal de la cámara de descarga 11. Finalmente, un imán en forma de anillo 17 está ubicado alrededor del cátodo central 13 colocado en el extremo cerrado de la cámara de descarga.

Dicha configuración de imanes permanentes produce un patrón espacial periódico de líneas de campos magnéticos dentro de la cámara de descarga 11, donde las líneas de campos magnéticos conectan las superficies de los imanes cercanos. Los electrones realizan un movimiento complejo dentro de la cámara de descarga donde son acelerados a lo largo de las líneas de campo eléctrico indicadas por las líneas de puntos en la Fig. 2 y también confinados por las múltiples líneas de campo de botella magnética (no mostradas en la Fig. 2). Esta combinación de captura y aceleración de electrones reduce su recorrido libre media de colisión, lo que aumenta las colisiones ionizantes con átomos de gas neutros. La tasa de ionización del gas neutro, por lo tanto, se incrementa considerablemente. El sistema está encerrado dentro de la carcasa 20 como se ilustra en las Figs. 1 y 3. La carcasa 20 confina las líneas del campo magnético para proteger el equipo cercano al acelerador de plasma del intenso campo magnético producido por los imanes permanentes 16 y 17.

Los iones que resultan de las colisiones ionizantes de electrones son esencialmente conducidos a lo largo de las líneas del campo eléctrico de la Fig. 2 porque son más masivos y, por lo tanto, menos afectados por el campo magnético local. Las cargas positivas son atraídas hacia el cátodo central 13 o, alternativamente, se aceleran a lo largo de las líneas del campo eléctrico hacia la rejilla catódica 14.

Las líneas de campo eléctrico de esta configuración con dos cátodos pasivos de la Fig. 2 enfocan una fracción importante de los iones positivos creados dentro de la cámara de descarga hacia la rejilla catódica 14. En consecuencia, un grupo de iones sale de la cámara de descarga moviéndose a lo largo de su dirección axial y pasando a través de la rejilla catódica 14 y la rejilla de control 18, que tienen sus espacios abiertos alineados.

Este flujo de iones salientes se acelera aguas abajo por el potencial eléctrico de CC V_{AC} impartido entre la cámara de descarga 11 y la conexión a tierra eléctrica del sistema, como se muestra en la figura 1. La corriente fluye a través de la fuente de alimentación que suministra la tensión de aceleración V_{AC} y es proporcional al flujo de iones que pasan a través de la rejilla del cátodo 14. Este campo eléctrico también acelera aguas arriba de los electrones del cátodo activo 19 que pasan a través de las rejillas 14 y 18 hacia la cámara de descarga. La energía de estos electrones ionizantes también se incrementa por el voltaje V_{AC} muy por encima del umbral de ionización del gas neutro. Este hecho aumenta adicionalmente la tasa de ionización dentro de la cámara de descarga, reduciendo la cantidad de gas neutro requerido para operar este acelerador de plasma.

Como se observa en la Fig. 1, la rejilla de control 18 está polarizada por el potencial eléctrico de CC V_{CT} , que actúa como un potencial de control. Cuando el voltaje V_{CT} es nulo, la rejilla 18 permite el contraflujo de electrones del el cátodo activo 19 y de los iones que salen de la cámara de descarga 11. Cuando se imparte el voltaje V_{CT} , la rejilla de control 18 repele los electrones del cátodo activo 19 que se mueven hacia la rejilla catódica 14. Además, solo los iones con energías por encima de un umbral pueden moverse hacia afuera más allá de la rejilla de control

Para potenciales de baja V_{CT} , la corriente de iones pasa a través de la rejilla de control 18 y luego es neutralizada por los electrones del cátodo activo 19, y este chorro de plasma se mueve en la dirección indicada por la flecha de la Fig. 1. Esta corriente de plasma es acelerada por potencial V_{AC} y modulada por el voltaje de control V_{CT} como se indica en las Figs. 1 y 4 impartiendo cantidad de movimiento a la nave en la dirección de la flecha en la Fig. 1.

Además, varios aceleradores de plasma podrían agruparse usando el mismo voltaje de aceleración V_{AC} pero voltajes de control individuales V_{CT} como en la Fig. 1. Este grupo podría proporcionar un empuje no axial usando V_{CT} para controlar la aceleración de cada diferente acelerador de plasma permitiendo maniobras complejas en el espacio.

Las características de esta configuración del acelerador de plasma se muestran en la Fig. 4, donde la corriente I_B indicada en la Fig. 1 se midió en una realización de la presente invención. Esta corriente es proporcional al contraflujo de iones y electrones que cruzan las rejillas 14 y 18 en la Fig. 1. La presión del gas de operación $p = 8 \cdot 10^{-5}$ mB de argón era lo suficientemente baja como para desprestigiar las colisiones entre los átomos neutros y las partículas cargadas. La corriente I_B se midió para diferentes voltajes de aceleración V_{AC} en función del voltaje V_{CT} impartido a la rejilla de control 18.

El control o la modulación de la corriente de plasma mediante este acelerador de plasma se muestra en la Fig. 4 mediante de la disminución observada en la corriente del chorro I_B a medida que aumenta la tensión de control V_{CT} , manteniendo el potencial de aceleración V_{AC} fijo. Para bajos voltajes de control, I_B permanece independiente del potencial de aceleración y depende esencialmente de los flujos de gas neutro y de electrones ionizantes dentro de la cámara de descarga. La disminución abrupta en la corriente del chorro I_B cuando $V_{CT} \approx V_{AC}$ es causada por la formación de un pozo potencial entre la rejilla catódica 14 y el cátodo activo 19. El voltaje V_{CT} impartido a la rejilla de control 18

ES 2 745 473 T3

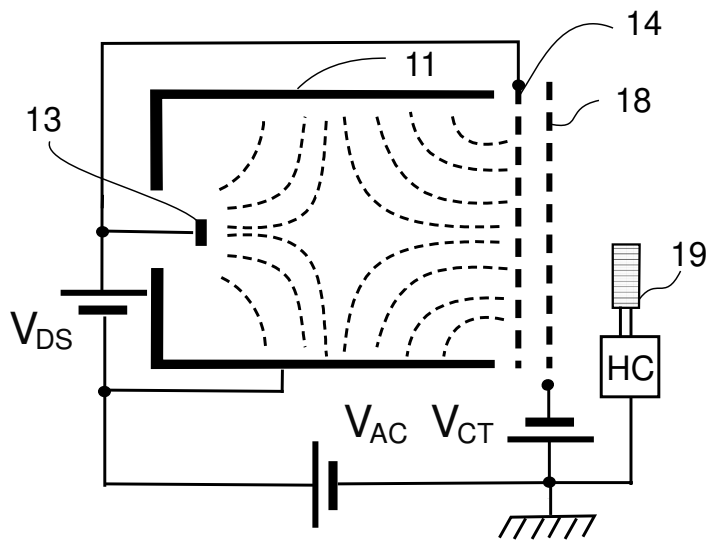
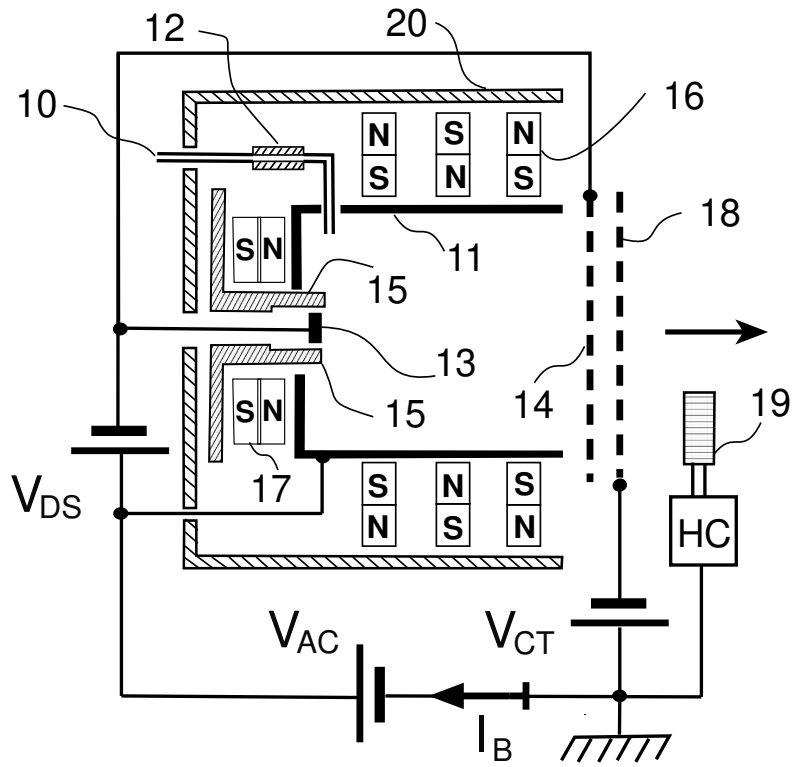
determina la profundidad de dicho pozo potencial que impide la entrada de electrones ionizantes del cátodo activo 19, así como la salida de los iones de la cámara de descarga.

5 Además, es ventajoso que los voltajes V_{AC} (300, 400 y 500 voltios) y V_{CT} (0-300 voltios) en la Fig. 4 para la aceleración y el control del plasma se encuentren muy por debajo de los necesarios en los motores iónicos por rejillas mencionados anteriormente, del orden de unos kilovoltios. Estos bajos voltajes reducen la complejidad del sistema eléctrico, el desgaste de las rejillas por el bombardeo de iones y evitan las chispas provocadas por los altos voltajes. El consumo total de energía eléctrica también disminuye típicamente por debajo del rango de 100 vatios.

10 Aunque la invención se ha explicado en relación con su(s) realización(es) preferida(s) como se mencionó anteriormente, se puede entender que pueden hacerse muchas otras modificaciones y variaciones sin apartarse del alcance de la presente invención.

REIVINDICACIONES

1. Un acelerador de plasma que comprende:
 - una cámara de descarga eléctricamente conductora (11) con un extremo abierto,
 - medios para introducir propergol ionizable dentro de la cámara de descarga (11),
- 5
 - un cátodo activo (19) configurado para emitir electrones para ionizar el propergol y neutralizar los iones salientes, el cátodo activo (19) colocado fuera de la cámara de descarga (11),
 - una rejilla catódica (14) que es un cátodo pasivo colocado después del extremo abierto de la cámara de descarga (11),
 - una rejilla de control eléctricamente conductora (18) colocada después de la rejilla catódica (14),
- 10
 - medios de suministro de energía eléctrica configurados para aplicar:
un potencial (V_{CT}) entre la rejilla de control (18) y el cátodo activo (19) para controlar el empuje de la corriente de plasma que sale por el extremo abierto de la cámara de descarga (11);
caracterizado porque
dichos medios de suministro de energía están configurados además para aplicar:
- 15
 - un potencial (V_{AC}) entre el cátodo activo (19) y la cámara de descarga (11) para acelerar los electrones hacia el extremo abierto de la cámara y los iones hacia el extremo abierto de la cámara de descarga (11) y,
 - un potencial (V_{DS}) entre la cámara de descarga (11) y la rejilla catódica (14) para impartir un campo eléctrico entre la cámara de descarga (11) y la rejilla catódica (14); y porque
- 20
 - el cátodo activo (19), la rejilla catódica (14) y la rejilla de control (18) están dispuestas para introducir los electrones emitidos desde el cátodo activo (19) en la cámara de descarga (11) a través de la rejilla de control (18) y la rejilla catódica (14).
- 25
 - 2. El acelerador de plasma según la reivindicación 1, que además comprende un cátodo interno (13) que es un cátodo pasivo conectado eléctricamente a la rejilla catódica (14), el cátodo interno (13) colocado dentro de la cámara de descarga (11).
- 30
 - 3. El acelerador de plasma según la reivindicación 1 ó 2, en el que la cámara de descarga (11) se extiende a lo largo de un eje de simetría.
 - 4. El acelerador de plasma según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la rejilla catódica (14) y la rejilla de control (18) tienen sus espacios abiertos alineados.
 - 5. El acelerador de plasma según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende además una pluralidad de imanes (16) configurados para confinar electrones en la cámara de descarga (11).
 - 6. El acelerador de plasma según la reivindicación 5, en el que la pluralidad de imanes (16) está dispuesta concéntricamente alrededor de la cámara de descarga (11) con polos magnéticos alternados.
 - 7. El acelerador de plasma según la reivindicación 5 ó 6, que comprende además una carcasa (20) para proteger magnéticamente la pluralidad de imanes (16).
- 35
 - 8. El acelerador de plasma según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el cátodo activo (19) es sólo uno.
 - 9. El acelerador de plasma según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el propergol ionizable es un gas monoatómico o molecular.
 - 10. Vehículo espacial que comprende al menos un acelerador de plasma según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.



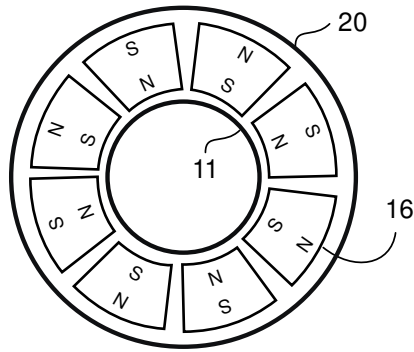


FIG. 3

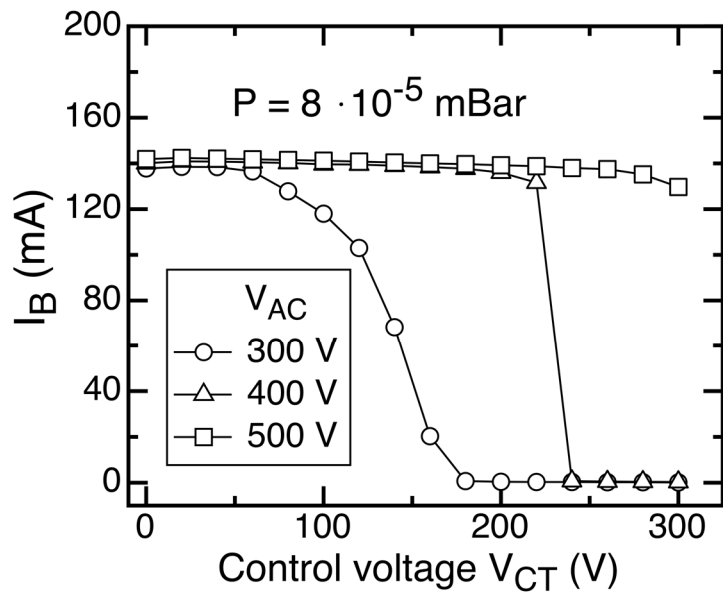


Fig. 4