(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 671 448**

(51) Int. CI.:

G21B 3/00 (2006.01)
H01J 35/00 (2006.01)
H05G 2/00 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.02.2007 PCT/US2007/005389**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **08.05.2008 WO08054463**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.02.2007 E 07867003 (1)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.04.2018 EP 1989714**

(54) Título: **Procedimiento y aparato para producir rayos X, haces de iones y energía de fusión nuclear**

(30) Prioridad:

28.02.2006 US 365105

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
06.06.2018

(73) Titular/es:

LAWRENCEVILLE PLASMA PHYSICS, INC. (100.0%)
128 Lincoln Blvd.
Middlesex, NJ 08846, US

(72) Inventor/es:

BLAKE, AARON y
LERNER, ERIC J.

(74) Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

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

Procedimiento y aparato para producir rayos X, haces de iones y energía de fusión nuclear

Campo técnico de la invención

La presente invención se refiere, en general, al campo de la física de plasma y al dispositivo de enfoque de plasma, y más específicamente, a procedimientos y aparatos para confinar el plasma usando un campo magnético alto y la inyección de un momento angular para producir haces de iones y/o rayos X y para permitir la fusión nuclear y la generación de electricidad a partir de la energía de fusión.

Antecedentes de la invención

Sin limitar el ámbito de la invención, sus antecedentes se describen principalmente junto con la energía de fusión. El aumento en el consumo de energía y las desventajas de los combustibles de hidrocarburos ha llevado a la búsqueda de fuentes alternativas de energía. Una de esas fuentes es la energía de fusión a partir de un reactor de fusión termonuclear, que ofrece una fuente de energía casi ilimitada. Sin embargo, hay muchos desafíos científicos y de ingeniería.

En general, un reactor de fusión incluye un combustible de fusión, a menudo una mezcla de deuterio y tritio, que se calienta a temperaturas muy altas y se confina por algún tiempo en un estado de plasma. El estado de plasma se genera usando energía eléctrica. El estado de plasma contiene los iones que tienen suficiente energía para fusionarse. Para fusionar, los iones deben mantenerse juntos el tiempo suficiente para que ocurra la fusión, por ejemplo, un confinamiento magnético. En general, los productos de la reacción de fusión pueden incluir elementos tales como helio, un neutrón y energía. La energía liberada en la mayoría de las reacciones nucleares es mucho más grande que la de las reacciones químicas, debido a que la energía de enlace que mantiene un núcleo unido es mucho mayor que la energía que mantiene los electrones en un núcleo. En la mayoría de los diseños de reactores, la energía de la reacción se recoge finalmente como energía térmica que posteriormente se convierte en electricidad.

Ha habido muchos dispositivos de fusión incluyendo el tokamak (es decir, una palabra rusa para una cámara magnética en forma de toro) stellarator, z-pinch, estricción esférica, fusión de objetivo magnetizado, láser, haz de iones o de electrones y spheromak; sin embargo, estos dispositivos aún no han tenido éxito. Una dificultad con el enfoque de calentamiento por plasma ha sido la inestabilidad en el plasma durante la fase de calentamiento que ha evitado que los campos magnéticos puedan contener el gas ionizado calentado durante el tiempo suficiente para alcanzar incluso el punto de equilibrio en la producción de energía.

Uno de tales procedimientos y aparato para generar y usar una configuración de plasma compuesto se enseña en la patente de Estados Unidos número 4.023.065, concedida a Koloc, que enseña una configuración de plasma que incluye un plasma toroidal central con corrientes eléctricas rodeado por un manto, en general, elipsoidal de partículas ionizadas o materia eléctricamente conductora. Los procedimientos para formar esta configuración de plasma compuesto incluyen las etapas de formar una trayectoria ionizada helicoidal en un medio gaseoso y descargar simultáneamente un alto potencial a través de la trayectoria ionizada para producir una corriente helicoidal o heliforme que se colapsa sobre sí misma para producir una corriente toroidal o generar un plasmoide toroidal, que suministra energía magnética al plasmoide y aplica presión de fluido externa al plasmoide.

Otro enfoque es el reactor de fusión nuclear pulsada enseñado en la patente de Estados Unidos número 4.182.650, concedida a Fischer, que se refiere a una planta de energía de fusión nuclear para producir energía eléctrica útil mediante la combustión nuclear del deuterio y litio a helio. Un gran condensador de placa concéntrica se descarga rápidamente a través de una masa de LiD fundido que está localizada en su centro. Antes de esta descarga, se preforma térmicamente una trayectoria de conducción entre los electrodos mediante un pulso de corriente alterna y el plasma de alta temperatura y alta presión se confina por el líquido de LiD en un canal estrecho. Los neutrones se generan, en parte por fusión termonuclear, en parte por colisiones supratérmicas que resultan de la bien conocida inestabilidad de la salchicha. Los neutrones que escapan se absorben por el líquido circundante donde producen calor. El calor, la radiación y el choque mecánico se absorben en el líquido que fluye a través de un intercambiador de calor con el fin de activar la planta de energía de turbogeneradores asociada.

Otro enfoque más es una configuración de plasma compuesto y un procedimiento y aparato para generar una configuración de plasma compuesto que se enseña en la patente de Estados Unidos número de publicación 20010046273 de Paul M. Koloc, que se refiere a una configuración de plasma compuesto formado a partir de un dispositivo que tiene pasadores y un electrodo anular que rodea los pasadores. Un conductor cilíndrico está conectado eléctricamente a, y es coaxial con, el electrodo anular, y un conductor helicoidal es coaxial con el conductor cilíndrico. El conductor helicoidal se compone de cables, estando cada cable conectado eléctricamente a cada pasador. El electrodo anular y los pasadores están dispuestos en la misma dirección lejos del interior del cilindro conductor.

El enfoque de plasma denso (DPF) se ha estudiado como una posible solución al problema de las inestabilidades. En este dispositivo, las inestabilidades de plasma naturales se usan para crear un confinamiento en un plasmoide

denso, en lugar de minimizarse como en otros dispositivos de fusión. Un procedimiento y aparato de este tipo para una fuente de radiación de enfoque de plasma denso para generar una radiación EUV que incluye un ánodo y cátodo dispuestos coaxialmente se enseña en la patente de los Estados Unidos Número 7.002.168 concedida a Jacob, y col. Los procedimientos y aparatos para mejorar la eficacia de la producción de radiación EUV, para proteger, refrigerar y extender la vida del ánodo y el cátodo, para proteger y blindar la óptica de recogida de desechos y perturbaciones de presión en la cámara de descarga, y para alimentar el Litio en la cámara de descarga.

Otra fuente de radiación de enfoque de plasma para generar una radiación a una longitud de onda seleccionada se enseña en la patente de Estados Unidos Número 6.172.324, concedida a Birx, que enseña la producción de un revestimiento de plasma de alta energía que mueve hacia abajo una columna de electrodos a alta velocidad y se oprime en el final de la columna para formar un punto de temperatura muy alta. Un gas ionizable introducido en la estricción puede producir radiación a la longitud de onda deseada. Con el fin de evitar la separación del revestimiento de plasma de la estricción y, por lo tanto, para prolongar la estricción y evitar un rebrote potencialmente dañino, se localiza un blindaje de un material no conductor de alta temperatura a una distancia seleccionada del electrodo central y se forma para redirigir el revestimiento de plasma al electrodo central, evitando la separación del mismo. Se proporciona una abertura en el blindaje para permitir que la radiación deseada pase sustancialmente sin obstáculos.

Sin embargo, el DPF tampoco ha logrado aún las condiciones de punto de equilibrio y nunca ha logrado simultáneamente una alta eficacia de la transferencia de energía en el plasmoide, una energía alta de iones y una alta densidad. Además, el DPF sufre de un alto grado de variación en la producción de disparo a disparo, incluso con condiciones iniciales idénticas.

Además de su aplicación como un reactor de fusión, el DPF tiene otras aplicaciones potenciales importantes como una fuente de rayos X, haces de iones y neutrones. Tales aplicaciones incluyen la litografía de rayos X, inspección de rayos X y neutrones y la producción de isótopos médicos. Sin embargo, su aplicación en estas áreas también se ha visto obstaculizada por su alto grado de variabilidad.

Los intentos de superar esta variabilidad no han sido del todo exitosos. Un aparato de enfoque de plasma se enseña en las patentes de Estados Unidos números 5.075.522 y 4.912.731 concedidas a Nardi, que enseña unos aparatos de enfoque de plasma con un elemento de distorsión de campo en el espacio interrelectrodos en el extremo de la recámara desplazado del manguito de material aislante entre los electrodos. Como resultado, la producción de neutrones del acelerador es al menos 5 veces la producción en ausencia del elemento de distorsión de campo, por ejemplo, en la forma de una hoja de cuchillo.

Una dificultad adicional de la mayoría de los enfoques de la fusión es que se basan en el combustible de deuterio y tritio, que produce neutrones de alta energía. Los neutrones generan radiactividad inducida en la estructura del reactor. Además, la energía de neutrones debe capturarse como calor y convertirse en electricidad mediante un ciclo de vapor convencional, que es muy costoso y evita cualquier reducción sustancial en el coste de la electricidad.

Unos combustibles avanzados y alternativos, que solo producen partículas cargadas podrían superar este problema. Desde hace tiempo se sabe que la reacción pB11, que produce 3 iones de He4 y 8,7 MeV de energía, tiene grandes ventajas como combustible de fusión. Produce solo partículas cargadas y, por lo tanto, la energía de la reacción puede convertirse directamente en electricidad, evitando la etapa muy costosa de convertir la energía térmica en electricidad a través de una turbina y un generador mecánico. Esto puede conducir a una reducción radical en el coste de la electricidad. Además, la reacción evita la producción de neutrones, que pueden inducir radiactividad. Una reacción secundaria, B11 + He4 □ n + N14 produce aproximadamente un 0,2 % de la energía total en la forma de neutrones de baja energía, pero tienen muy poca energía para activar los materiales de reactor. Se han realizado intentos para usar la reacción de pB11 en diseños de reactores de fusión.

Uno de tales procedimientos y aparato para la fusión controlada en una configuración de campo invertido y en una conversión directa de energía se enseña en las patentes de Estados Unidos 7.002.148, 6.894.446 y 6.850.011, concedidas a Monkhorst, y col., que enseña unos iones de plasma confinados magnéticamente en el FRC mientras que los electrones de plasma están confinados electrostáticamente en un pozo de energía profunda, creado afinando un campo magnético aplicado externamente. Los iones y los electrones pueden tener una densidad y una temperatura adecuadas, de tal manera que tras las colisiones se fusionen entre sí por la fuerza nuclear, formando de este modo unos productos de fusión que emergen en la forma de un haz anular. La energía se elimina de los iones de producto de fusión a medida que pasan espiralmente por los electrodos de un conversor de ciclotrón inverso.

Otro procedimiento y aparato para la formación de una configuración de campo invertido para el confinamiento magnético y electrostático del plasma se enseña en la patente de Estados Unidos Número 6.891.911, concedida a Rostoker, y col., que enseña una topología magnética de configuración de campo invertido (FRC) en la que los iones de plasma están contenidos magnéticamente en órbitas estables no adiabáticas en el FRC. Además, los electrones están contenidos electrostáticamente en un pozo de energía profunda, creado afinando un campo magnético aplicado externamente. El confinamiento electrostático simultáneo de electrones y el confinamiento magnético de iones evitan el transporte anómalo y facilita la contención clásica de tanto los electrones como los iones. En esta configuración, los iones y los electrones pueden tener la densidad y la temperatura adecuadas de tal manera que, al

producirse las colisiones, se fusionen por la fuerza nuclear, liberando de este modo la energía de fusión. Además, los plasmas de combustible de fusión que pueden usarse con el presente sistema y procedimiento de confinamiento no están limitados solamente a los combustibles neutrónicos, sino que también incluyen ventajosamente combustibles avanzados. Sin embargo, estos intentos no han tenido éxito en la medida en que existen desafíos técnicos sustanciales para el uso del pB11. Para usar el combustible pB11, las energías iónicas deben superar los 100 KeV, simultáneamente con los productos de tiempo de confinamiento-densidad de más de $3x10^{15}$ partícula-s/cc. El mayor cambio atómico, Z, del B11 aumenta en gran medida la velocidad de emisión de rayos X, que es proporcional a Z2, lo que dificulta lograr la ignición, por ejemplo, el punto en el que la potencia termonuclear supera la emisión de rayos X. Finalmente, la conversión de energía a electricidad tanto de los haces de iones como de los rayos X debe realizarse con altas eficacias. Para los rayos X de alta energía, este problema aún no se ha resuelto de manera práctica. Los problemas anteriores se han reconocido durante muchos años y, aunque se han propuesto numerosas soluciones, ninguna de las mismas hace frente adecuadamente a todos los problemas en un único dispositivo.

El documento US 5.076.223 desvela un sistema de dispositivo de encendido de plasma capaz de generar un chorro de plasma de alta energía enfocado estrechamente.

Otro generador de plasma capaz de acelerar electromagnéticamente el plasma se desvela en el documento US 3.209.189.

Por último, el solicitante ha descrito anteriormente un acuerdo para lograr un enfoque de plasma denso en el artículo “Prospects for P11B Fusion with the Dense Plasma Focus: New Results”, Estados Unidos, 2004.

Sumario de la invención

El presente inventor reconoce una necesidad de un dispositivo compacto y de bajo coste que produzca rayos X, y haces de iones, mientras que no se genera radiactividad y no, o casi no, neutrones. Se ha reconocido la necesidad de eliminar la necesidad de la mezcla habitual de deuterio y tritio. El presente inventor reconoció que un dispositivo de enfoque de plasma, por ejemplo, usando una reacción de hidrógeno-boro puede proporcionar una fuente de energía ilimitada ambiental y eficazmente segura y barata. El dispositivo desvelado en el presente documento también produce rayos X y haces de iones con poca o ninguna producción de radioactividad y sin neutrones o casi ningún neutrón. El dispositivo desvelado en este caso también puede permitir la fusión nuclear y la conversión de la energía de fusión en electricidad.

Por ejemplo, la presente invención proporciona un dispositivo para producir rayos X y haces de partículas que tienen un ánodo y un cátodo localizados coaxialmente y al menos parcialmente dentro de una cámara de reacción para aplicar un momento angular en un plasmoide. En algunas realizaciones, el cátodo tiene una inclinación helicoidal de entre 0,05 y 10 grados que aplica un momento angular. En otras, un serpentín helicoidal se localiza alrededor del cátodo y se activa por separado para crear un campo magnético axial de entre 5 y 1000 Gauss para aplicar un momento angular. Como alternativa, puede usarse un cátodo con una inclinación helicoidal y un serpentín helicoidal que se localiza alrededor del cátodo para aplicar un momento angular. En algunas realizaciones, el ánodo tiene un radio de ánodo y el cátodo tiene un radio de cátodo que aplica un campo magnético alto. En estas realizaciones, el radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y aproximadamente 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo. Un gas está contenido dentro de la cámara de reacción para hacer que contacte el ánodo y el cátodo y una fuente del gas está conectada a la cámara de reacción. Una fuente de descarga electrónica está en comunicación eléctrica con el ánodo y el cátodo para proporcionar una descarga electrónica. La descarga electrónica da como resultado un plasmoide denso, confinado magnéticamente, que se crea alrededor del ánodo capaz de emitir uno o más iones.

La presente invención también proporciona un generador de plasma para permitir la fusión nuclear que incluye un ánodo y un cátodo localizados coaxialmente y al menos parcialmente dentro de una cámara de reacción. El ánodo tiene un radio de ánodo y el cátodo tiene un radio de cátodo que aplica un campo magnético alto. En general, el radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y aproximadamente 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo. Un combustible de borano está contenido dentro de la cámara de reacción. En algunas realizaciones, el cátodo tiene una inclinación helicoidal de entre 0,05 y 10 grados que aplica un momento angular. En otras, un serpentín helicoidal se localiza alrededor del cátodo y se activa por separado para crear un campo magnético axial entre 5.10^{-4} T y 10^{-1} T (5 y 1000 Gauss) para aplicar un momento angular. Como alternativa, puede usarse un cátodo con una inclinación helicoidal y un serpentín helicoidal que se localiza alrededor del cátodo para aplicar un momento angular. Una fuente de descarga electrónica está en comunicación eléctrica con el ánodo y el cátodo, para crear un plasmoide alrededor del ánodo. El plasmoide da como resultado la emisión de uno o más rayos X y un haz de iones a partir del combustible borano.

Además, se proporciona un procedimiento para producir rayos X y haces de partículas mediante la presente invención. El procedimiento incluye interconectar un gas con un ánodo y un cátodo en comunicación eléctrica con

una descarga electrónica. En algunas realizaciones, el ánodo tiene un radio de ánodo y el cátodo tiene un radio de cátodo que aplica un campo magnético alto. En general, el radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo. En algunas realizaciones, el cátodo tiene una inclinación helicoidal que aplica un momento angular. En otras, un serpentín helicoidal se localiza alrededor del cátodo para aplicar un momento angular. Como alternativa, puede usarse un cátodo con una inclinación helicoidal y un serpentín helicoidal que se localiza alrededor del cátodo para aplicar un momento angular. Se usa una corriente eléctrica para formar un revestimiento de plasma a través de la descarga de un pulso de corriente eléctrica a través del ánodo y del cátodo y se forma un plasmoide alrededor del ánodo como resultado del campo magnético generado por el revestimiento de corriente. Una o más partículas cargadas y uno o más rayos X se emiten desde el plasmoide como resultado del deterioro del campo magnético del plasmoide.

La presente invención proporciona un generador que produce rayos X y haces de partículas que incluye una cámara de reacción y un sistema de descarga electrónica. La cámara de reacción incluye un gas, un cátodo localizado coaxialmente alrededor de un ánodo al menos parcialmente dentro de la cámara de reacción. El sistema de descarga electrónica incluye una fuente de alimentación en comunicación eléctrica con el ánodo y el cátodo. En algunas realizaciones, el ánodo tiene un radio de ánodo y el cátodo tiene un radio de cátodo que aplica un campo magnético alto. En general, el radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo. En algunas realizaciones, el cátodo tiene una inclinación helicoidal que aplica un momento angular. En otras, un serpentín helicoidal se localiza alrededor del cátodo para aplicar un momento angular. Como alternativa, puede usarse un cátodo con una inclinación helicoidal y un serpentín helicoidal que se localiza alrededor del cátodo para aplicar un momento angular. La fuente de alimentación proporciona una descarga electrónica alrededor del ánodo para producir un plasmoide que emite uno o más iones y uno o más rayos X a partir del gas.

Además, algunas realizaciones incluyen un conversor de energía de rayos X para convertir directamente la emisión de rayos X en energía eléctrica. El conversor de energía de rayos X para convertir directamente la emisión de una o más ráfagas de rayos X en energía eléctrica está en comunicación con una fuente de ráfagas de rayos X y con la unidad de almacenamiento de energía. El conversor de energía de rayos X convierte directamente las emisiones de rayos X en energía eléctrica. El colector incluye una o más capas de emisor de electrones en comunicación eléctrica con múltiples capas de colector de electrones. La una o más capas de emisor de electrones absorben el uno o más rayos X y emiten electrones que se adsorben por las múltiples capas de colector de electrones.

Además, se proporciona un procedimiento para convertir la energía de fusión en energía eléctrica mediante la presente invención. El procedimiento incluye el uso de un conversor de energía de rayos X y un conversor de haz de iones para capturar la energía de los rayos X y del haz de iones, convertirlos en energía eléctrica y almacenar la energía eléctrica en los dispositivos de almacenamiento.

Breve descripción de los dibujos

Para una comprensión más completa de las características y ventajas de la presente invención, se hace referencia a continuación a la descripción detallada de la invención junto con las figuras adjuntas y en las que:

la figura 1 es una vista lateral del dispositivo de enfoque de plasma de la presente invención;

la figura 2 es una vista lateral de otra realización de la presente invención que ilustra múltiples electrodos del dispositivo de enfoque de plasma que incluye un serpentín helicoidal;

la figura 3 es una vista desde arriba de una realización de la presente invención que ilustra múltiples electrodos del dispositivo de enfoque de plasma;

la figura 4 es una imagen de la corriente formada en el revestimiento delgado de filamentos de plasma bajo la influencia del campo magnético;

la figura 5 es una ilustración de la corriente formada en el plasmoide;

la figura 6 es una vista en perspectiva de otra realización de la presente invención que ilustra múltiples cátodos helicoidales;

la figura 7 es una vista en perspectiva de otra realización de la presente invención que ilustra múltiples electrodos helicoidales del dispositivo de enfoque de plasma que incluye un serpentín helicoidal;

la figura 8 es un esquema del sistema de recuperación de energía;

la figura 9 es un esquema de la conversión de energía de los rayos X;

la figura 10 es un esquema del colector de rayos X general;

la figura 11 es un esquema del colector de haz de iones;

la figura 12 es un esquema del circuito general del dispositivo de enfoque de plasma; y

la figura 13 es un diagrama del sistema de refrigeración del colector de rayos X.

Descripción detallada de la invención

Mientras que la realización y el uso de diversas realizaciones de la presente invención se tratan en detalle a continuación, debería apreciarse que la presente invención proporciona muchos conceptos inventivos aplicables que pueden incorporarse en una amplia variedad de contextos específicos. La terminología usada y las realizaciones específicas tratadas en el presente documento son simplemente ilustrativas de formas específicas de realizar y usar la invención y no delimitan el ámbito de la invención.

Para facilitar la comprensión de esta invención, se definen a continuación un número de términos. Los términos definidos en el presente documento tienen los significados comúnmente entendidos por los expertos en las materias relevantes de la presente invención. Los términos como “un”, “una”, “el” y “la” no están destinados a referirse solo a una entidad singular, sino que incluyen la clase general de la que puede usarse un ejemplo específico para una ilustración. La terminología en el presente documento se usa para describir las realizaciones específicas de la invención, pero su uso no delimita la invención, excepto como se describe en las reivindicaciones.

El dispositivo de enfoque de plasma de la presente invención incluye un diseño de electrodo anidado que tiene un ánodo de cilindro hueco localizado centralmente entre uno o más cátodos localizados para aplicar un momento angular. En una realización, el uno o más cátodos se localizan en un ángulo helicoidal con el ángulo que depende de la aplicación específica, pero estando, en general, en el intervalo de aproximadamente 0,3 grados, pero puede oscilar entre aproximadamente 0,05 y aproximadamente 10 grados. Otra realización usa un serpentín helicoidal localizado alrededor del cátodo para aplicar un momento angular. Como alternativa, puede usarse un cátodo con una torsión helicoidal y un serpentín helicoidal que se localiza alrededor del cátodo para aplicar un momento angular.

En general, la presente invención proporciona un dispositivo para producir rayos X y haces de iones y para permitir la fusión nuclear y la generación de electricidad a partir de la energía de fusión que incluye un mecanismo para aplicar un momento angular para generar un plasmoide denso, magnéticamente confinado, dentro de una cámara de reacción llena de gas que genera una o más partículas y rayos X. En algunas realizaciones, el ánodo tiene un radio de ánodo y el cátodo tiene un radio de cátodo que aplica un campo magnético alto. En estas realizaciones, el radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo. En algunas realizaciones de la presente invención, el cátodo tiene una torsión helicoidal que aplica un momento angular o un serpentín helicoidal está colocado alrededor del cátodo para aplicar un momento angular. Como alternativa, puede usarse un cátodo con una torsión helicoidal y un serpentín helicoidal que se localiza alrededor del cátodo para aplicar un momento angular.

Por ejemplo, la presente invención también proporciona un dispositivo para producir rayos X y haces de partículas que tiene un ánodo y un cátodo localizados coaxialmente y conformados para aplicar un momento angular en un plasmoide y un gas contenido dentro de la cámara de reacción. El dispositivo incluye una fuente de descarga electrónica en comunicación eléctrica con el ánodo, el cátodo y un plasmoide denso, confinado magnéticamente, que se crea alrededor del ánodo como resultado de una descarga electrónica y que emite una o más partículas y rayos X.

La cámara de reacción aloja un ánodo, un cátodo y un gas. En general, la cámara de reacción es una cámara de vacío que tiene conexiones con el ánodo y un cátodo y otros componentes de la fuente de descarga electrónica. Además, la cámara de reacción puede tener una o más conexiones para permitir la inducción y/o la eliminación del uno o más gases en la cámara de reacción. Los expertos en la materia reconocerán que la forma y las dimensiones de la cámara de reacción específica dependerán del tamaño de los electrodos, la posición de los electrodos, el volumen de la cámara, etc.

El ánodo y el cátodo están separados por un aislante y localizados coaxialmente y al menos parcialmente dentro de una cámara de reacción. La presente invención proporciona el cátodo localizado para aplicar un momento angular sobre un plasmoide. El cátodo puede localizarse en un ángulo relativo a la base o al ánodo para inducir un momento angular. El ángulo relativo del cátodo depende del diseño específico de la realización específica teniendo en cuenta la cantidad del momento angular que se agregará o eliminará. Por ejemplo, el cátodo de la presente invención proporciona una configuración helicoidal alrededor del ánodo que aplica un momento angular al plasmoide. Una realización de la presente invención proporciona unos electrodos que tienen una longitud de aproximadamente 4 cm, una inclinación helicoidal de aproximadamente 0,3 grados o un campo magnético axial inicial de aproximadamente 200 G. Para otros electrodos, la inclinación puede variar de 0,05 a 10 grados y el campo de 5 a 1000 G.

En las realizaciones para generar la energía de fusión, el ánodo tiene un radio de ánodo y el cátodo tiene un radio

de cátodo que aplica un campo magnético alto. En estas realizaciones, el radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo. Estos electrodos de campo alto pueden o no usarse en las realizaciones para aplicaciones que no sean de fusión.

El ánodo y el cátodo pueden construirse individualmente a partir de una variedad de materiales. Por ejemplo, un material es el berilio, que permite que la alta emisión de rayos X pase principalmente a través del berilio. Otro material que puede usarse para construir el ánodo y/o el cátodo es cobre; sin embargo, la alta emisión de rayos X erosionará el ánodo de cobre rápidamente. Además, el cátodo y/o el ánodo pueden fabricarse parcialmente de metales (por ejemplo, aluminio, cobre, aluminio, berilio, cromo, cobre, oro, níquel, molibdeno, paladio, platino, plata, tántalo, titanio, tungsteno y zinc) y aleaciones (por ejemplo, aleaciones de cobre, aleaciones de berilio, aleaciones de cobre y berilio, aleaciones de aluminio y otras aleaciones de metales). El cátodo y/o el ánodo también pueden incluir una variedad de dopantes, por ejemplo, berilio, tungsteno, molibdeno, renio, etc.

Otra realización de la presente invención aplica un momento angular usando un campo magnético inducido usando un serpentín helicoidal localizado alrededor del cátodo. El serpentín helicoidal, que aplica un momento angular, genera a su vez un campo magnético axial inicial. Además, el serpentín helicoidal puede conectarse a una fuente de alimentación separada que se activa independientemente de la fuente de alimentación principal. Todavía otra realización del dispositivo de enfoque de plasma de la presente invención, introduce un momento angular usando tanto un diseño de electrodo anidado que tiene un ánodo de cilindro hueco centralmente localizado entre uno o más cátodos helicoidales localizados para aplicar un momento angular como un serpentín helicoidal localizado alrededor del uno o más electrodos helicoidales que generan un campo magnético para aplicar un momento angular y un serpentín helicoidal localizado alrededor del uno o más electrodos helicoidales que genera un campo magnético para aplicar un momento angular.

El aislante que separa el ánodo y el cátodo puede fabricarse a partir de una variedad de materiales en función de la aplicación específica. Por ejemplo, el material aislante puede fabricarse al menos parcialmente de cuarzo, vidrio pyrex, roca de lava, cerámica, óxidos cerámicos y nitruros de aluminio, berilio, boro, calcio, silicio, sodio y zirconio, carburo de boro y combinaciones de los mismos. Además, los aisladores pueden mecanizarse, formarse o conformarse mediante procedimientos convencionales al tamaño, forma, espesor y perfil deseados. También pueden usarse otros materiales aislantes tales como cerámica, óxidos y nitruros cerámicos fabricados de aluminio, berilio, boro, calcio, silicio y zirconio, por ejemplo, la alúmina (A12 03), el nitruro de silicio (Si3 N4), el nitruro de aluminio, el óxido de berilio (BeO), carburo de boro (B4 C), zirconia (ZrO2) y combinaciones de los mismos. La selección del material aislante dependerá del tamaño y del intervalo actual del dispositivo.

En general, un plasma puede formarse a partir de una variedad de moléculas en fase de gas que sirven como una fuente de iones. Por ejemplo, los gases usados en la presente invención para la generación de energía de fusión incluyen decaborano (B10H14) y pentaborano. El decaborano es un compuesto, que es un excelente material fuente debido a que cada molécula de decaborano cuando se vaporiza e ioniza puede proporcionar un ion molecular a partir de diez átomos de boro. Sin embargo, pueden usarse otros compuestos que contienen boro como los borohidruros y los boranos, por ejemplo, borano, diborano, hexaborano, heptaborano, nonaborano, octaborano, triborano y tetraborano. Cuando el dispositivo se usa para aplicaciones que no son de fusión, pueden usarse muchos otros gases, incluidos hidrógeno, helio, metano, nitrógeno, argón, neón y xenón.

La presente invención genera una o más partículas, que incluyen uno o más haces de iones, uno o más rayos X o combinaciones de los mismos. Para aplicaciones de generación de fusión, puede usarse un dispositivo de conversión de energía para convertir la energía del haz de iones y la energía de los rayos X en energía eléctrica. El dispositivo de conversión de energía incluye un conversor de haz de iones y un conversor de rayos X. El conversor de haz de iones y un conversor de rayos X pueden incorporarse en un dispositivo o en dispositivos separados, en función de las necesidades de la aplicación específica. En algunas realizaciones para las aplicaciones de fusión, solo se usa uno de los conversores o ninguno. Para aplicaciones no de fusión, no es necesario usar dispositivos de conversión de energía.

El conversor de energía de rayos X puede separarse de la cámara de reactor mediante una pared delgada de un material adecuado, tal como berilio; sin embargo, un experto en la materia reconocerá que pueden usarse otros materiales. El conversor de energía de rayos X incluye uno o más condensadores en comunicación eléctrica con una o más capas de emisor de electrones y una o más capas de colector de electrones. La una o más capas de emisor de electrones absorben los rayos X y emiten electrones que a continuación se adsorben por una o más capas de colector de electrones. El conversor de energía de rayos X puede ser una serie de uno o más conversores de energía de rayos X localizados para recoger rayos X de diferentes niveles de energía. Por ejemplo, el uno o más conversores de energía de rayos X pueden anidarse concéntricamente con cada conversor de energía de rayos X que tiene una o más capas de emisor de electrones y una o más capas de colector de electrones. Además, el conversor de energía de rayos X puede tener una o más capas de emisor de electrones o una o más capas de colector de electrones en el que algunas capas pueden anidarse concéntricamente para recoger los rayos X de diferentes niveles de energía. La una o más capas de emisor de electrones absorben los rayos X y emiten electrones que a continuación se absorben por la una o más capas de colector de electrones. De manera similar, la

una o más capas de colector de electrones pueden localizarse para absorber las emisiones de energía diferente. En general, cada una de la una o más capas de colector de electrones están separadas por una tensión de entre aproximadamente el 15 y aproximadamente el 25 % con respecto a la siguiente capa de colector de electrones; sin embargo, las capas de colector de electrones pueden estar separadas por una tensión de entre aproximadamente el 10 y aproximadamente el 30 % con respecto a la siguiente capa de colector de electrones en función de la aplicación específica.

Otra realización de la presente invención incluye un generador de plasma para producir energía eléctrica a partir de la energía de fusión. El generador incluye un ánodo y un cátodo localizados coaxialmente y al menos parcialmente dentro de una cámara de reacción, en el que el cátodo aplica un momento angular. El ánodo tiene un radio de ánodo y el cátodo tiene un radio de cátodo que aplica un campo magnético alto. El radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo. Dentro de la cámara de reacción se encuentra una fuente de combustible de borano en forma gaseosa. Una fuente de descarga electrónica está en comunicación eléctrica con el ánodo y el cátodo helicoidalmente retorcido para crear un plasmoide alrededor del ánodo para la emisión de uno o más rayos X y un haz de iones a partir de la fuente de combustible de borano.

La presente invención incluye un procedimiento para producir rayos X y haces de partículas a partir de un gas con un ánodo y un cátodo al menos parcialmente helicoidal en comunicación eléctrica con una fuente de descarga electrónica. Se forma un revestimiento de plasma con un campo magnético a través de la descarga de un pulso de corriente eléctrica a través del ánodo y el cátodo al menos parcialmente helicoidal para formar un plasmoide alrededor del ánodo. Una o más partículas cargadas y rayos X se emiten desde el plasmoide como resultado del deterioro del campo magnético del plasmoide y las colisiones del plasmoide, los electrones y los iones.

La cámara de reacción que alberga el ánodo, el cátodo y el gas, es una cámara de vacío que tiene conexiones con el ánodo y un cátodo y otros componentes de la fuente de descarga electrónica. El gas puede ser un borano u otro gas, incluidos el hidrógeno, el helio, el nitrógeno, el metano, el neón, el argón o el xenón. Además, la cámara de reacción puede tener una o más conexiones para permitir la inducción y/o la eliminación de uno o más gases en la cámara de reacción. En algunas realizaciones, la cámara de reacción se localiza de tal manera que haya una comunicación entre la cámara de reacción y un dispositivo de captura de partículas. Un experto en la materia reconocerá que la forma y las dimensiones de la cámara de reacción específica dependerán del tamaño de los electrodos, la posición de los electrodos, el volumen de la cámara, etc.

El ánodo y el cátodo se localizan coaxialmente al menos parcialmente dentro de la cámara de reacción y están separados por un aislante. La presente invención proporciona el cátodo con una forma que aplica un momento angular sobre un plasmoide localizando el cátodo en un ángulo para inducir un momento angular. El ángulo relativo depende del diseño específico de la realización específica teniendo en cuenta la cantidad de momento angular que se agregará o eliminará.

El ánodo y el cátodo pueden construirse individualmente a partir de una variedad de materiales, por ejemplo, berilio, cobre, etc., lo que permite una emisión de rayos X alta para pasar principalmente a través del berilio. Otro material que puede usarse para construir el ánodo y/o el cátodo es el cobre; sin embargo, la alta emisión de rayos X erosionará el ánodo de cobre rápidamente. Además, el cátodo y/o el ánodo pueden fabricarse parcialmente a partir de metales (por ejemplo, aluminio, cobre, aluminio, berilio, cromo, cobre, oro, níquel, molibdeno, paladio, platino, plata, tántalo, titanio, tungsteno y zinc) y aleaciones (por ejemplo, aleaciones de cobre, aleaciones de berilio, aleaciones de cobre y berilio, aleaciones de aluminio y otras aleaciones de metales). El cátodo y/o el ánodo también pueden incluir una variedad de dopantes, por ejemplo, berilio, tungsteno, molibdeno, renio, etc.

El procedimiento para producir rayos X, haces de iones y/o haces de partículas incluye un diseño de electrodo anidado que tiene un ánodo de cilindro hueco localizado centralmente entre uno o más cátodos localizados para aplicar un momento angular. El uno o más cátodos helicoidales se localizan en un ángulo helicoidal con el ángulo dependiendo de la aplicación específica, pero en general de aproximadamente 0,3 grados, pero puede oscilar entre aproximadamente 0,05 y aproximadamente 10 grados.

Otra realización de la presente invención usada para producir una o más partículas incluye un campo magnético generado por un serpentín helicoidal localizado alrededor del ánodo y el cátodo. Se genera un campo magnético axial inicial por medio de un serpentín helicoidal, que a su vez aplica un momento angular. Además, el serpentín helicoidal puede conectarse a una fuente de alimentación separada que se activa por separado de la fuente de alimentación principal.

En otra realización, el ánodo tiene un radio de ánodo y el cátodo tiene un radio de cátodo que aplica un campo magnético alto. En estas realizaciones, el radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo.

El aislante que separa el ánodo y el cátodo puede fabricarse a partir de una variedad de materiales en función de la aplicación específica. Por ejemplo, el material aislante puede fabricarse al menos parcialmente de cuarzo, vidrio pyrex, roca de lava, cerámica, óxidos cerámicos y nitruros de aluminio, berilio, boro, calcio, silicio, sodio y zirconio, carburo de boro y combinaciones de los mismos. Además, los aisladores pueden mecanizarse, formarse o conformarse mediante procedimientos convencionales al tamaño, forma, espesor y perfil deseados. También pueden usarse otros materiales aislantes tales como cerámica, óxidos y nitruros cerámicos fabricados de aluminio, berilio, boro, calcio, silicio y zirconio, por ejemplo, la alúmina (A12 03), el nitruro de silicio (Si3 N4), el nitruro de aluminio, el óxido de berilio (BeO), carburo de boro (B4 C), zirconia (ZrO2) y combinaciones de los mismos. La selección del material aislante dependerá del tamaño y del intervalo actual del dispositivo.

La presente invención incluye un procedimiento para producir la energía de fusión a partir de un combustible con un ánodo y un cátodo al menos parcialmente helicoidal en comunicación eléctrica con una fuente de descarga electrónica y para convertir la energía de fusión en energía eléctrica. Se forma un revestimiento de plasma con un campo magnético a través de la descarga de un pulso de corriente eléctrica a través del ánodo y el cátodo al menos parcialmente helicoidal para formar un plasmoide alrededor del ánodo. Una o más partículas cargadas y rayos X se emiten desde el plasmoide como resultado del deterioro del campo magnético de plasmoide. Las partículas cargadas calientan el plasmoide, provocando que tengan lugar reacciones de fusión y se libera energía de fusión en forma de rayos X y haces de partículas cargadas.

El gas puede ser decaborano (B10H14) o pentaborano. El decaborano es un compuesto, que es un excelente material fuente debido a que cada molécula de decaborano cuando se vaporiza e ioniza puede proporcionar tanto iones de boro como de hidrógeno en la proporción correcta. Sin embargo, pueden usarse otros compuestos que contienen boro como borohidruros y boranos, por ejemplo, borano, diborano, hexaborano, heptaborano, nonaborano, octaborano, triborano y tetraborano.

La cámara de reacción que alberga el ánodo, el cátodo y el gas, es una cámara de vacío que tiene conexiones con el ánodo y un cátodo y otros componentes de la fuente de descarga electrónica. Además, la cámara de reacción puede tener una o más conexiones para permitir la inducción y/o la eliminación del uno o más gases en la cámara de reacción. En algunas realizaciones, la cámara de reacción se localiza de tal manera que haya comunicación entre la cámara de reacción y un dispositivo de captura de partículas. Un experto en la materia reconocerá que la forma y las dimensiones de la cámara de reacción específica dependerán del tamaño de los electrodos, la posición de los electrodos, el volumen de la cámara, etc.

El ánodo y cátodo están separados por un aislante y localizados coaxialmente al menos parcialmente dentro de la cámara de reacción. La presente invención proporciona al cátodo una forma que aplica un momento angular sobre un plasmoide localizando el cátodo en un ángulo para inducir un momento angular. El ángulo relativo depende del diseño específico de la realización específica teniendo en cuenta la cantidad de momento angular que se agregará o eliminará.

El ánodo y el cátodo pueden construirse individualmente a partir de una variedad de materiales, por ejemplo, berilio, cobre, etc., lo que permite que la emisión alta de rayos X pase principalmente a través de berilio. Otro material que puede usarse para construir el ánodo y/o el cátodo es el cobre; sin embargo, la alta emisión de rayos X erosionará el ánodo de cobre rápidamente. Además, el cátodo y/o el ánodo pueden fabricarse parcialmente a partir de metales (por ejemplo, aluminio, cobre, aluminio, berilio, cromo, cobre, oro, níquel, molibdeno, paladio, platino, plata, tántalo, titanio, tungsteno y zinc) y aleaciones (por ejemplo, aleaciones de cobre, aleaciones de berilio, aleaciones de cobre y berilio, aleaciones de aluminio y otras aleaciones de metales). El cátodo y/o el ánodo también pueden incluir una variedad de dopantes, por ejemplo, berilio, tungsteno, molibdeno, renio, etc.

El procedimiento para convertir la energía de fusión en energía eléctrica incluye la generación de una o más partículas fabricadas de uno o más haces de iones, uno o más rayos X o combinaciones de los mismos. El dispositivo de captura de partículas se usa para recuperar la una o más partículas e incluye un circuito de recuperación de energía de haz de iones y un conversor de energía de rayos X que pueden incorporarse en un dispositivo o dispositivos separados en función de las necesidades de la aplicación específica.

El conversor de energía de rayos X incluye uno o más condensadores en comunicación eléctrica con una o más capas de emisor de electrones y una o más capas de colector de electrones. La una o más capas de emisor de electrones absorben los rayos X y emiten electrones que a continuación se absorben por la una o más capas de colectores de electrones. El conversor de energía de rayos X puede ser una serie de uno o más conversores de energía de rayos X localizados para recoger los rayos X de diferentes niveles de energía. Por ejemplo, el uno o más conversores de energía de rayos X pueden ser una o más capas de emisor de electrones y una o más capas de colector de electrones anidadas concéntricamente para recoger rayos X de diferentes niveles de energía. De manera similar, una o más capas de colector de electrones pueden ser una serie de una o más capas de colector de electrones localizadas para absorber emisiones de energía diferente y una o más capas de emisor de electrones pueden ser una serie de una o más capas de emisor de electrones. En general, cada una de la una o más capas de colector de electrones están separadas por una tensión de entre aproximadamente el 15 y aproximadamente el 25 % con respecto a la siguiente capa de colector de electrones; sin embargo, las capas de colector de electrones pueden estar separadas por una tensión de entre aproximadamente el 10 y aproximadamente el 30 % con respecto

a la siguiente capa de colector de electrones en función de la aplicación específica.

El procedimiento de conversión de la energía de fusión en energía eléctrica incluye un diseño de electrodo anidado que tiene un ánodo de cilindro hueco localizado centralmente entre uno o más cátodos localizados para aplicar un momento angular. El uno o más cátodos helicoidales se localizan en un ángulo helicoidal con el ángulo que depende de la aplicación específica, pero en general de aproximadamente 0,3 grados, pero puede oscilar entre aproximadamente 0,05 y aproximadamente 10 grados.

Otra realización de la presente invención usada para producir una o más partículas incluye un campo magnético generado por un serpentín helicoidal localizado alrededor del ánodo y el cátodo. Se genera un campo magnético axial inicial por medio de un serpentín helicoidal, que a su vez aplica un momento angular. Además, el serpentín helicoidal puede conectarse a una fuente de alimentación separada que se activa por separado a partir de la fuente de alimentación principal.

El ánodo tiene un radio de ánodo y el cátodo tiene un radio de cátodo que aplica un campo magnético alto. El radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo.

El aislante que separa el ánodo y el cátodo puede fabricarse a partir de una variedad de materiales en función de la aplicación específica. Por ejemplo, el material aislante puede fabricarse al menos parcialmente de cuarzo, vidrio pyrex, roca de lava, cerámica, óxidos cerámicos y nitruros de aluminio, berilio, boro, calcio, silicio, sodio y zirconio, carburo de boro y combinaciones de los mismos. Además, los aisladores pueden mecanizarse, formarse o conformarse mediante procedimientos convencionales al tamaño, forma, espesor y perfil deseados. También pueden usarse otros materiales aislantes tales como cerámica, óxidos y nitruros cerámicos fabricados de aluminio, berilio, boro, calcio, silicio y zirconio, por ejemplo, la alúmina (A12 03), el nitruro de silicio (Si3 N4), el nitruro de aluminio, el óxido de berilio (BeO), carburo de boro (B4 C), zirconia (ZrO2) y combinaciones de los mismos. La selección del material aislante dependerá del tamaño y del intervalo actual del dispositivo.

La presente invención también incluye un generador para producir la energía de fusión y convertir esa energía en energía eléctrica que incluye una cámara de reacción, un sistema de descarga electrónica, dispositivos de conversión de energía, conmutadores y dispositivos de almacenamiento de energía, y un sistema de refrigeración. La cámara de reacción incluye un gas, un ánodo, un cátodo helicoidal localizado coaxialmente alrededor del ánodo y puede incluir un serpentín helicoidal localizado alrededor del cátodo. El radio de ánodo está entre aproximadamente 0,25 cm y 1,5 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo y el radio de cátodo está entre aproximadamente 0,5 cm y aproximadamente 3 cm proporcional a la corriente máxima medida en mega amperios en el dispositivo. El sistema de descarga electrónica está en comunicación eléctrica con el serpentín helicoidal, el ánodo y el cátodo y una fuente de alimentación. El serpentín helicoidal genera un campo magnético axial inicial para aplicar un momento angular y se crea un plasmoide alrededor del ánodo como resultado de una descarga electrónica para emitir una o más partículas a partir del gas. El combustible en el plasmoide genera energía de fusión y la libera en forma de rayos X y haces de iones. Esta energía se convierte en electricidad mediante un conversor de haz de iones y un conversor de rayos X y se almacena en dispositivos de almacenamiento eléctrico.

La presente invención también incluye un conversor de energía de rayos X para convertir directamente las emisiones de rayos X en energía eléctrica teniendo uno o más condensadores en comunicación eléctrica con una o más capas de emisor de electrones y una o más capas de colector de electrones. La una o más capas de emisor de electrones absorben los rayos X y emiten electrones que a continuación se absorben por la una o más capas de colectores de electrones. El conversor de energía de rayos X puede ser una serie de uno o más conversores de energía de rayos X localizados para recoger rayos X de diferentes niveles de energía. Por ejemplo, el uno o más conversores de energía de rayos X pueden ser una o más capas de emisor de electrones y una o más capas de colectores de electrones anidadas concéntricamente para recoger rayos X de diferentes niveles de energía. De manera similar, la una o más capas de colector de electrones pueden ser una serie de una o más capas de colector de electrones localizadas para absorber emisiones de energía diferente y una o más capas de emisor de electrones pueden ser una serie de una o más capas de emisor de electrones. En general, cada una de la una o más capas de colector de electrones están separadas por una tensión de entre aproximadamente el 15 y aproximadamente el 25 % con respecto a la siguiente capa de colector de electrones; sin embargo, las capas de colector de electrones pueden estar separadas por una tensión de entre aproximadamente el 10 y aproximadamente el 30 % con respecto a la siguiente capa de colector de electrones en función de la aplicación específica.

La figura 1 es una vista lateral del dispositivo 10 de enfoque de plasma de la presente invención. El dispositivo 10 de enfoque de plasma incluye un diseño de electrodo anidado que tiene dos electrodos anidados uno en el interior de otro. El electrodo exterior, el cátodo 12, consiste en un número de barras separadas uniformemente, mientras que el electrodo interior, el ánodo 14, es un cilindro hueco. Un aislador 16 rodea la base del ánodo 14. El cátodo 12 y el ánodo 14 están encerrados en una cámara de vacío (no mostrada) con un gas a baja presión que llena el espacio entre los mismos. El ánodo 14 está conectado al cátodo 12 a través de uno o más bancos 18 de condensadores y uno o más conmutadores 20. Por ejemplo, una realización del dispositivo 10 de enfoque de plasma de la presente

invención incluye dos electrodos de berilio cilíndricos anidados uno en el interior de otro. El cátodo 12 y el ánodo 14 están encerrados en una cámara de vacío (no mostrada) con un gas a baja presión (por ejemplo, decaborano) para suministrar el combustible a la reacción que llena el espacio entre los mismos.

La figura 2 es una vista lateral de otra realización de la presente invención que ilustra múltiples electrodos del dispositivo 10 de enfoque de plasma que incluye un serpentín helicoidal. El dispositivo 10 de enfoque de plasma incluye un diseño de electrodo anidado que tiene dos electrodos anidados uno en el interior de otro. Los electrodos exteriores, los cátodos 12, consisten en un número de barras separadas uniformemente, mientras que el electrodo interior, el ánodo 14, es un cilindro hueco. El número de cátodos dependerá de la aplicación específica, por ejemplo, entre aproximadamente 2 y aproximadamente 50. Un aislante 16 rodea la base del ánodo 14. Los cátodos 12 y el ánodo 14 están encerrados en una cámara de vacío (no mostrada) con un gas a baja presión que llena el espacio entre los mismos. El ánodo 14 está conectado a los cátodos 12 a través de uno o más bancos 18 de condensadores y uno o más conmutadores 20. Un serpentín 22 helicoidal está localizado alrededor de los cátodos 12 y el ánodo 14 por lo que la energía eléctrica produce un campo magnético que a su vez aplica un momento angular. El serpentín 22 helicoidal está conectado a un conmutador 26 y a una fuente 24 de alimentación. La fuente 24 de alimentación puede separarse de la alimentación suministrada al dispositivo 10 de enfoque de plasma permitiendo que el serpentín 22 helicoidal se active por separado a partir de la fuente de alimentación principal, como alternativa la misma fuente de alimentación puede usarse para ambos. La posición del serpentín 22 helicoidal y el número de revoluciones alrededor de los cátodos 12 y el ánodo 14 variarán en función de la aplicación específica.

La figura 3 es una vista desde arriba de una realización de la presente invención que ilustra múltiples electrodos del dispositivo 10 de enfoque de plasma. El dispositivo 10 de enfoque de plasma incluye un diseño de electrodo anidado que tiene dos electrodos anidados uno en el interior de otro. Los electrodos exteriores, los cátodos 12, consisten en un número de barras separadas uniformemente, mientras que el electrodo interior, el ánodo 14, es un cilindro hueco. El número de cátodos dependerá de la aplicación específica, por ejemplo, entre aproximadamente 2 y aproximadamente 50. Un aislante 16 rodea la base del ánodo 14. Los cátodos 12 y el ánodo 14 están encerrados en una cámara de vacío (no mostrada) con un gas a baja presión que llena el espacio entre los mismos. El ánodo 14 está conectado a los cátodos 12 a través de uno o más bancos de condensadores (no mostrados) y uno o más conmutadores (no mostrados).

La figura 4 es una imagen de la corriente formada en el delgado revestimiento del filamento de plasma bajo la influencia del campo magnético. A medida que la corriente se mueve se forma el delgado revestimiento de los filamentos de plasma y pueden verse en la figura 1. En funcionamiento, un pulso de electricidad procedente de un banco de condensadores se descarga a través de los electrodos. Durante unas pocas millonésimas de segundo, una intensa corriente fluye desde el electrodo exterior al interior a través del gas y la corriente comienza a calentar el gas y crea un campo magnético intenso. Guiada por su propio campo magnético, la corriente se forma en un delgado revestimiento de filamentos de plasma.

La figura 5 es una ilustración del plasmoide formado usando la presente invención. El delgado revestimiento de filamentos de plasma se desplaza hasta el extremo del ánodo, donde los campos magnéticos producidos por las corrientes oprimen y retuercen el plasma en una bola pequeña y densa de solo unos pocos micrómetros llamada plasmoide. A medida que la energía de campo magnético en el plasmoide comienza a disminuir, los campos magnéticos cambiantes inducen un campo eléctrico, que hace que un haz de electrones fluya en una dirección y un haz de iones en la otra. El haz de electrones calienta los electrones en el plasmoide y los electrones a su vez calientan los iones del combustible de reactor, por ejemplo, hidrógeno y boro, que producen reacciones de fusión. La energía se emite desde el plasmoide en forma de un haz de iones intenso y enfocado y una ráfaga de rayos X. El plasmoide existe durante unas pocas a decenas de nanosegundos.

La figura 6 es una vista en perspectiva de otra realización de la presente invención que ilustra múltiples electrodos del dispositivo 110 de enfoque de plasma en el que están inclinados los cátodos helicoidales. El dispositivo 110 de enfoque de plasma incluye un diseño de electrodo anidado que tiene dos electrodos anidados uno en el interior de otro. Los electrodos helicoidales exteriores, los cátodos 112 helicoidales, consisten en una serie de barras separadas uniformemente, mientras que el electrodo interior, el ánodo 114, es un cilindro hueco. Un aislador 116 rodea la base del ánodo 114. Los cátodos 112 helicoidales están inclinados para aplicar un momento angular. El grado de inclinación dependerá de la aplicación específica. Por ejemplo, una realización tiene una inclinación de 0,3 grados; sin embargo, el intervalo de inclinación puede ser de aproximadamente 0,05 grados a aproximadamente 10 grados. Los cátodos 112 helicoidales y el ánodo 114 están encerrados en una cámara de vacío (no mostrada) con un gas a baja presión que llena el espacio entre los mismos. El ánodo 114 está conectado a los cátodos 112 helicoidales a través de uno o más bancos 118 de condensadores y uno o más conmutadores 120. Por ejemplo, una realización del dispositivo 110 de enfoque de plasma de la presente invención incluye dos electrodos de berilio cilíndricos anidados uno en el interior de otro. Los cátodos 112 helicoidales y el ánodo 114 están encerrados en una cámara de vacío (no mostrada) con un gas a baja presión (por ejemplo, decaborano) para suministrar el combustible a la reacción que llena el espacio entre los mismos.

La figura 7 es una vista en perspectiva de otra realización de la presente invención que ilustra múltiples electrodos del dispositivo 110 de enfoque de plasma que incluye un serpentín helicoidal. El dispositivo 110 de enfoque de plasma incluye un diseño de electrodo anidado que tiene dos electrodos anidados uno en el interior de otro. Los

electrodos exteriores, uno o más cátodos 112 helicoidales, consisten en un número de barras separadas uniformemente, mientras que el electrodo interior, el ánodo 114, es un cilindro hueco. El uno o más cátodos 112 helicoidales están localizados en un ángulo helicoidal o están inclinados para aplicar un momento angular. El grado de inclinación dependerá de la aplicación específica. Por ejemplo, una realización tiene una inclinación de 0,3 grados; sin embargo, el intervalo de inclinación puede ser de aproximadamente 0,05 grados a aproximadamente 10 grados. El número de uno o más cátodos 112 helicoidales dependerá de la aplicación específica, por ejemplo, entre aproximadamente 2 y aproximadamente 50. Un aislante 116 rodea la base del ánodo 114. El uno o más cátodos 112 helicoidales y el ánodo 114 están encerrados en una cámara de vacío (no mostrada) con un gas a baja presión que llena el espacio entre los mismos. El ánodo 114 está conectado al uno o más cátodos 112 helicoidales a través de uno o más bancos 118 de condensadores y uno o más conmutadores 120. Un serpentín 122 helicoidal está localizado alrededor de los electrodos por lo que la energía eléctrica produce un campo magnético que a su vez aplica un momento angular. El serpentín 122 helicoidal está conectado a un conmutador 126 y a una fuente 124 de alimentación. La fuente 124 de alimentación puede separarse de la alimentación suministrada al dispositivo 110 de enfoque de plasma permitiendo que el serpentín 122 helicoidal se active por separado de la fuente de alimentación principal, como alternativa puede usarse la misma fuente de alimentación para ambos.

La figura 8 es un esquema del sistema de recuperación de energía. El dispositivo 10 de enfoque de plasma de la presente invención está conectado a un primer conmutador 30 y a un segundo conmutador 32. Tanto el primer conmutador 30 como el segundo conmutador 32 están conectados a un banco 34 de condensadores principal. El banco 34 de condensadores principal puede contener uno o más condensadores dispuestos en bancos o puede contener uno o más condensadores dispuestos en múltiples bancos, que a su vez están dispuestos en bancos de condensadores. El primer conmutador 30 también está conectado a un segundo banco de condensadores 36.

La figura 9 es un esquema de la conversión de energía de los rayos X. El pulso 38 de rayos X puede convertirse con una alta eficacia en electricidad a través del efecto fotoeléctrico. El conversor es esencialmente un condensador con múltiples capas de películas metálicas delgadas. Un tipo de película, la película 40 de tipo A, sirve como el emisor de uno o más electrones 42 que convierte la energía de los rayos X 38 en la de los electrones 42 de multi-keV. La película 40 de tipo A también sirve como los electrodos de tierra del condensador. Un segundo tipo de película, la película 44 de tipo B, sirve para recoger los electrones 42 emitidos y actuar como los electrodos de cátodo 46 del condensador. En una sola capa, los rayos X 38 chocan contra una película 40 de tipo A de metal, provocando la emisión de electrones 42 con un intervalo de energías. Estos electrones 42 se desplazan a través de una serie de películas 44 de tipo B muy delgadas, que se cargan inicialmente con una serie ascendente de tensiones mediante un circuito externo. Cuando los electrones 42 se aproximan a un electrodo 46 cargado con una tensión V mayor que su energía en electrones voltios, estos se vuelven y se absorben por el siguiente electrodo 46 inferior.

Para obtener una alta eficacia en la conversión de la energía de los rayos X 38 en la energía de los electrones 42, el diseño de conversor debe garantizar que casi todos los rayos X 38 se absorben en la película 40 de tipo A y que muy poca de la energía de electrón se absorbe antes de dejar la película 40 de tipo A. Además, la absorbancia de rayos X en la película 44 de tipo B delgada debe minimizarse mediante una elección adecuada del material.

La figura 10 es un esquema del colector de rayos X general. El colector 46 de rayos X incluye una o más capas 48a-48i de metal separadas por unas capas 50a-50h intersticiales. La composición de la una o más capas 48a-48i de metal puede variar en función de la realización específica. Por ejemplo, las capas 48a, 48b y 48c de metal contienen aluminio, las capas 48d y 48e de metal contienen cobre, mientras que las capas 48e, 48f y 48g de metal contienen tungsteno. De manera similar, la composición de las capas 50a-50h intersticiales puede variar en función de la realización específica. Por ejemplo, las capas 50a, 50b y 50c intersticiales pueden ser de aluminio o berilio, mientras que la capa 50g intersticial es de tungsteno. Aunque un experto en la materia reconocerá que los ejemplos anteriores están destinados a fines ilustrativos y que pueden usarse otros metales y en diferentes órdenes y composiciones.

La figura 11 es un esquema del colector de haz de iones. El colector 52 de haz de iones está en comunicación con un girotrón 54 para acoplar el haz de iones de manera eficaz a un pulso de RF. En otra realización, el colector 52 de haz de iones está en comunicación con un conversor peniotrón (no mostrado). Una serie de conmutadores 56 rápidos activados por luz ultravioleta, pueden usarse para acoplar el pulso de RF en los condensadores de almacenamiento rápido, abriéndose el conmutador 56 cuando los condensadores 58 están cargados, evitando que la energía fluya de vuelta al resonador. El haz de iones se propaga en vuelo, pero aún tiene una longitud de pulso corta cuando llega al girotrón 54 creando un campo magnético que varía rápidamente, lo que hace que sea más fácil optimizar un diseño eficaz para acoplar la energía en un circuito. La alta potencia del colector 52 de haz de iones requiere un diseño cuidadoso del circuito para vincular la transferencia de la potencia con los condensadores 58 a potenciales razonables. Las consideraciones básicas son claras para un experto en la materia.

La figura 12 es un esquema del circuito general del dispositivo de enfoque de plasma. El circuito 60 general incluye un dispositivo 10 de enfoque de plasma en comunicación con el colector 46 de rayos X y con el colector 52 de haz de iones. El dispositivo 10 de enfoque de plasma está conectado a un primer conmutador 62 y a un segundo conmutador 64. El primer conmutador 62 está conectado a un banco 66 de condensadores principal y a una red 68. El segundo conmutador 64 está conectado al banco 66 de condensadores principal y a un banco 70 de condensadores secundario. El banco 66 de condensadores principal y el banco 70 de condensadores secundario

están conectados por el conmutador 72 de condensador. El colector 46 de rayos X está conectado a un conmutador 74 de colector de rayos X que está conectado a un condensador 76 de colector de rayos X secundario. El condensador 76 de colector de rayos X secundario está conectado al colector 46 de rayos X y a un conmutador 78 de colector de rayos X que está a su vez conectado al banco 66 de condensadores principal. El colector 52 de haces de iones está conectado a un conmutador 80 de colector de haces de iones y a un banco 82 de condensadores de haces de iones. El conmutador 80 de colector de haces de iones también está conectado al banco 82 de condensadores de haces de iones. El banco 82 de condensadores de haces de iones está conectado a un segundo conmutador 84 de colector de haces de iones que está conectado entonces al banco 66 de condensadores principal. Un experto en la materia reconocerá que hay muchas configuraciones diferentes de la presente invención y la presente figura es solo una de las muchas contempladas por los inventores.

La figura 13 es un diagrama del sistema de refrigerante del colector de rayos X. Ya que el sistema de conversión de energía de haz de iones tiene una gran área de superficie y el calor residual se distribuye dentro de la misma, la refrigeración es relativamente simple. Sin embargo, en el caso del sistema 86 de conversión de rayos X, se debe tener cuidado para evitar el bloqueo de los rayos X o los electrones con el propio refrigerante pasando un refrigerante eléctricamente no conductor, por ejemplo, silicona, a través de varias docenas de pares muy estrechos de conductos 86, todos orientados radialmente hacia el plasmoide. El colector 46 de rayos X está compuesto por una o más capas de metal (no mostradas) y unas capas intersticiales (no mostradas) están separadas por los conductos 86. Si las placas de refrigerante tienen una separación típica de unas pocas decenas de micrómetros, absorben menos que aproximadamente el 1 % de la radiación, pero todavía pueden transportar un flujo de refrigerante adecuado para eliminar aproximadamente 2 MW de calor residual del dispositivo de conversión de rayos X. Las placas de refrigerante, que corren radialmente a través del dispositivo cada varios grados, también pueden servir para dar soporte mecánico a los electrodos de película delgada.

El combustible de reactor puede ser una fuente de hidrógeno-boro. Algunos ejemplos de combustibles de hidrógeno-boro (pB11) son compuestos de borano, por ejemplo, el decaborano. La fusión hidrógeno-boro (p+11B) es un combustible deseable para la fusión, ya que libera 8,7 MeV como la energía cinética de las partículas alfa (4He). La fusión hidrógeno-boro usa solo isótopos estables y produce solo partículas cargadas. Un reactor de fusión puede convertir fácilmente los productos finales de energía de partículas cargadas en electricidad, con aproximadamente un 80 % de eficacia.

Descripción de alto efecto de campo magnético. El mayor cambio atómico, Z, de B11 aumenta en gran medida la velocidad de emisión de rayos X, que es proporcional a Z^2, lo que dificulta la ignición, por ejemplo, el punto en el que la potencia termonuclear supera la emisión de rayos X. La presente invención supera estas dificultades usando una teoría cuantitativa detallada del enfoque de plasma, descrito a continuación, y el alto efecto de campo magnético (HMFE). Este efecto, señalado por primera vez por McNally, implica la reducción de la transferencia de energía de los iones a los electrones en presencia de un campo magnético fuerte. Esto a su vez reduce la temperatura del electrón y, por lo tanto, la emisión bremsstrahlung.

Para los iones que colisionan con los electrones con una frecuencia de giro ω_g, la transferencia de energía cae rápidamente para parámetros de impacto $b > \frac{v_i}{\omega_g}$, donde v_i es la velocidad del ion, ya que en ese caso el electrón se acelera en algunas ocasiones durante la colisión y se desacelera en otras, por lo que la transferencia de energía promedio es pequeña. Esto significa que el $b_{máx}$ es menor que la longitud de Debye, λ_D por un factor de $\frac{v_i \omega_p}{v_{et} \omega_g}$, donde ω_p es la frecuencia del plasma y v_{et} es la velocidad térmica del electrón. Así, el logaritmo de Coulomb en la fórmula convencional de pérdida de energía se reduce a $\mathrm{Ln}(\frac{m v_i^2}{\hbar \omega_g})$.

La fórmula es aproximadamente válida para las colisiones en las que los iones colisionan con los electrones de movimiento más lento, que son las únicas colisiones en las que los iones pierden energía. Pero para colisiones de electrones que se mueven más rápido con los iones, donde los electrones pierden energía para los iones, el logaritmo de Coulomb, por la misma lógica, es $\mathrm{Ln}(\frac{m v_{et}^2}{\hbar \omega_g})$. Si $v_{et} >> v_i$ entonces Ln $\mathrm{Ln}(\frac{m v_e^2}{\hbar \omega_g})$ puede ser mucho más grande que $\mathrm{Ln}(\frac{m v_i^2}{\hbar \omega_g})$ para valores suficientemente grandes de $\hbar \omega_g$, en otras palabras, para B suficientemente grande. Ignorando la transferencia de momento paralela al campo, el estado estable se produce

cuando $\frac{Ti}{Te} = Ln(\frac{mv_e^2}{\hbar\omega_g})/Ln(\frac{mv_i^2}{\hbar\omega_g})$[2].

Este efecto se ha estudiado en unos pocos casos para los plasmas de fusión con campos relativamente débiles, donde se muestra que tiene un efecto relativamente pequeño, por ejemplo, véase J. Galambos y G.H. Miley. Se ha estudiado mucho más exhaustivamente en el caso de las estrellas de neutrones, por ejemplo, G.S. Miller, E.E. Salpeter e I. Wasserman. Sin embargo, hasta la presente investigación, no se ha aplicado a los plasmoides de enfoque de plasma denso (DPF), cuya configuración libre de fuerza y de campos magnéticos muy fuertes hacen que el efecto sea mucho más importante, por ejemplo, Lerner, “Prospects for P11B Fusion with the Dense Plasma Focus: New Results”.

El dispositivo de enfoque de plasma denso produce puntos calientes o plasmoides, que tienen unas configuraciones magnéticamente auto contenidas de tamaño micrométrico con tiempos de vida de nanosegundos a decenas de nanosegundos. El plasma se calienta a alta energía en el interior de estos plasmoides y donde se producen las reacciones de fusión. Se ha observado que tales plasmoides tienen un campo magnético de hasta 400 MG y una densidad superior a 10^{21}/cc.

Para aplicar el efecto magnético de los plasmoides DPF, que son configuraciones libres de fuerzas, la transferencia de momento de ángulo pequeño paralela al campo puede despreciarse en estos plasmoides, ya que la velocidad de iones se encuentra muy cerca de la dirección del campo magnético local y $\frac{\Delta\rho_{par}}{\Delta\rho_{perp}} \sim \text{sen}^2\theta$, donde θ, es el ángulo entre la velocidad de ion y la dirección de campo B.

En una configuración libre de fuerzas, tal como los vórtices toroidales que componen los plasmoides, los iones perturbados por las colisiones regresan a las líneas de campo locales en tiempos de orden $\frac{1}{\omega_{gi}}$, así $\theta \sim \frac{\omega_{ci}}{\omega_{gi}}$. Donde ω_{ci} es la frecuencia de colisión iónica. Para un plasma de decaborano, $\theta \sim \frac{2x10^{-8}n}{Ti^{3/2}B}$. El ejemplo de las condiciones del plasmoide obtenido en $n_i = 3 \times 10^{21}$, B = 400 MG, θ = 0,01 para Ti = 60 keV. Para un ejemplo cerca de las condiciones de punto de equilibrio, $n_i = 1{,}4 \times 10^{24}$, B = 16 GG, θ = 0,004 para Ti = 600 keV. La transferencia de momento paralelo de ángulo pequeño es significativa solo para combinaciones de muy alto n_i y Ti < 60 keV, que, en general, no se producen excepto durante las primeras fases muy breves del calentamiento y la compresión de los plasmoides densos. El alto B en los plasmoides genera un régimen donde $\frac{mv_i^2}{\hbar\omega_g} < 1$. En este caso, el efecto magnético es muy grande, las fórmulas anteriores se descomponen y deben tenerse en cuenta los efectos cuánticos. Una situación de este tipo no se ha estudiado antes para las aplicaciones de fusión, pero se ha analizado ampliamente en el caso de protones que caen sobre estrellas de neutrones.

En un campo magnético fuerte, ya que el momento angular se cuantifica en unidades de h, los electrones pueden tener solo niveles de energía discretos, denominados niveles de Landau (por ejemplo, ignorando el movimiento paralelo al campo magnético):

$$E_b = \frac{(n + \frac{1}{2})\, e\hbar B}{mc} = (n + \tfrac{1}{2})\ 11{,}6\text{eVB(GG)}.$$

Visto de otra manera, los electrones no pueden tener un radio de giro más pequeño que su longitud de onda de DeBroglie.

Ya que la transferencia de momento máximo es mv, donde v es la velocidad relativa, para $\frac{mv^2}{2} < E_b$ casi no puede producirse excitación de electrones hasta el siguiente nivel de Landau, por lo que puede transferirse muy poca energía a los electrones en tales colisiones. De nuevo ignorando el movimiento propio del electrón a lo largo de las líneas de campo, la condición se produce cuando

$$E_i < (\frac{M}{m})\, E_b$$

Para E_i = 300 keV, esto implica B > 14 GG para p, B > 3,5 GG para α, y B > 1,3 GG para ^{11}B. Como se mostrará a continuación, tales intensidades de campo son alcanzables con el DPF.

Si T_{eth} >> Eb, entonces se tiene que tener en cuenta el movimiento de los electrones a lo largo de las líneas de campo, lo que puede aumentar la velocidad relativa de colisión, v. En el caso clásico, los iones perderán energía solo a partir de los electrones para los que vepar < v_i. Ya que para estas colisiones v < 2v_i, la pérdida de energía seguirá siendo muy pequeña si E_i < 1/2 (M/m) E_b, lo que puede producirse para los núcleos de boro.

Sin embargo, hay un fenómeno, que evita que la pérdida de energía de los electrones caiga a niveles despreciables. En el caso clásico, considerando solo el movimiento a lo largo de la línea de fuerza, un ion que colisiona con un electrón que se mueve más rápido perderá energía si la velocidad de los electrones es opuesta a la del ion, pero ganará energía si están en la misma dirección, por ejemplo, el electrón sobrepasando al ion. En el último caso, la velocidad relativa es menor que en el primer caso, y ya que la transferencia de energía aumenta con la velocidad relativa decreciente, hay una ganancia neta de energía para el ion. Para un ion que se mueve más rápido que el electrón, el ion sobrepasa a los electrones y por lo tanto pierde energía independientemente de la dirección en la que se mueve el electrón. Por lo tanto, los iones solo pierden energía cuando los electrones se mueven más lentamente que los propios iones.

Sin embargo, los iones en algunos casos pueden perder energía cuando los electrones se mueven más rápido que los iones. Considérese el caso de los iones que se mueven a lo largo de las líneas de campo colisionando con los electrones en el nivel Landau de tierra. Si V_{epar} es de tal manera que m (vi + v_{epar})^2 > 2 E_b, mientras m (v_i - v_{epar}) ^{2} < 2 E_b, la energía perdida por el ion en colisión con los electrones dirigidos en sentido opuesto excederá mucho a la obtenida en las colisiones dirigidas en el mismo sentido, ya que en el primer caso el electrón puede excitarse a un nivel de Landau más alto, pero no en el segundo caso. En ninguno de los casos el electrón puede ceder a la energía iónica del movimiento perpendicular, ya que está en el estado de tierra. Por lo tanto, esta consideración no se aplica a los electrones de estado de tierra anterior, que perderán energía para los iones de movimiento más lento.

Si T_{eth} >> Eb, y se supone una distribución de Maxwell, el número de electrones en el estado de tierra será proporcional al volumen en velocidad-espacio. El número de tales electrones en el estado de tierra será ~ $\pi v_i E_b$, mientras que el número de electrones que se mueven más lento que vi en una distribución no magnética de Maxwell será ~ (8/3) $\pi v_i E_b$ (m/M), por lo que habrá un factor de (3/8) E_i/E_i (m/M) que aumenta la velocidad de colisión efectiva, comparando el caso magnético con el no magnético, para E_i < E_b.

Al mismo tiempo, la velocidad de la pérdida de energía para cada electrón será mucho menor que las velocidades relativas de orden $vb=(\frac{2E_b}{m})^{1/2}$, en comparación con las velocidades relativas de orden vi en el caso no magnético. Este m reduce la pérdida de energía para el caso magnético mediante un factor de $E_i(\frac{m}{M})/E_b$. Combinando estos dos factores, está claro que el término de logaritmo de Coulomb en el caso magnético tiende a un valor constante, independientemente de E_i para E_i < E_b.

El cálculo del valor exacto de lnΛ' para una distribución de Maxwell dada de iones con la temperatura adimensional T = Ti/ E_b (M/m), comienza con un cálculo mecánico cuántico de lnΛ' para un ion en movimiento a lo largo del campo línea que colisiona con un electrón que se supone que está en reposo. Este resultado fue calculado por Nelson, Saltpeter y Wasserman.

$$\ln\Lambda'(v) = (\frac{1}{2})v(\frac{1}{2v^2}) - \exp(2v^2)\Gamma(0,2v^2)$$

Donde ν es la velocidad adimensional del ion v_i/v_b, y ν < 1. Para ν > 1, la misma fuente da como una buena aproximación:

$$\ln\Lambda'(v) = \ln(2v^2)$$

Para determinar el lnΛ'(ν) eficaz para un ion de velocidad ν que colisiona con los electrones en el estado de tierra con la temperatura T_{eth} >> Eb, se pueden usar estas fórmulas, sustituyendo ν' como la velocidad relativa. En primer lugar debe tenerse en cuenta el caso donde ν < 1 y ν' > 1. Hay un número igual de electrones moviéndose con velocidad positiva o negativa en relación con ν, de este modo se integra asumiendo tanto ν' = ν + ν_e como ν' = ν - ν_e, donde ν_e es v_e/v_b. Para ν > ν_e, ambos casos contribuyen a la pérdida de energía iónica, mientras que para ν < ν_e, el

caso $\nu + \nu_e$ se suma a la pérdida de energía iónica, mientras que el caso $\nu - \nu_e$ resta. Teniendo en cuenta la dependencia $1/\nu^2$ de las velocidades de pérdida de energía, la contribución a $\ln\Lambda''(\nu)$ a partir de las colisiones $\nu' < 1$ es:

$$\frac{3}{8}v^{-1}(\int_0^v v^{-2})\ln\Lambda'(v-v_e)dv_e + \int_0^{1-v} v^{-2}\ln\Lambda'(v+v_e)dv_e$$

La integración numérica muestra que esta integral es 0 para todo $\nu' < 1$. Mientras que las colisiones individuales pueden sumar o restar energía, colectivamente no hay transferencia de energía neta cuando la velocidad relativa es demasiado baja para excitar al electrón fuera del estado de tierra, como se esperaría ingenuamente. Esto deja los casos donde $\nu' > 1$. Si $\nu + \nu_e > 1 + 2\nu$, entonces $\nu - \nu_e > 1$ también, y en estos casos ya que $\nu_e > \nu$ (aun considerando $\nu < 1$) los iones ganan energía neta. A continuación, la pérdida de energía adicional solo puede venir cuando $1 < \nu + \nu_e < 1 + 2\nu$. A continuación el término adicional (que contribuye a la totalidad de $\ln\Lambda'(\nu)$) es

$$\ln\Lambda''(v) = \frac{3}{8}v^{-1}\int_0^{+2v}\ln(2v'^2)v'^2\,dv' = \frac{3}{8}v^{-1}((2+\ln 2/2)(1-1/1+2v) - \ln(1+2v)/(1+2v))$$

Esta expresión está cerca de 3/8 de $0,2 < v < 0,5$ y disminuye a 3/8ln2 cuando v se aproxima a 0 y para ~ (3/8) x 0,83 para $\nu = 1$. Para $v > 1$, se necesita otro término para dar cuenta del caso donde $\nu > \nu_e$ y $\nu - \nu_e > 1$, donde la energía se pierde de nuevo para los electrones. Además, para $\nu > (3/2)$ 1/2, la energía también puede perderse para los electrones de estado no a tierra, y $\ln\Lambda'(\nu)$ converge rápidamente en $((\nu - 1)/\nu)$ ln $(2\nu 2)$. Puede usarse este valor para $\nu > 1,35$.

Finalmente, la integración a través de una distribución de Maxwell de ν produce el logaritmo de Coulomb efectivo como una función de T, la temperatura iónica adimensional. Como primera aproximación, el uso de las distribuciones de Maxwell se justifica por el hecho de que las velocidades de transferencia de energía de ion-ion y de electrón-electrón exceden considerablemente las velocidades de ion-electrón. Sin embargo, la distribución de velocidad del ion se verá distorsionada por el calentamiento de la partícula alfa.

$$\ln\Lambda(T) = \frac{3}{8}\int_0^{1,35}(\exp(-(\frac{v^2}{T}))/v^2)((2+\ln 2/2)(1-1/1+2v) - \ln(1+2v)/1+2v)dv$$

$$+\frac{3}{8}\int_0^{1,35}(\exp(-(\frac{v^2}{T}))v^3)((2+\ln 2/2)(v-1) - 2\ln v)dv$$

$$+\int_{1,35}^{\infty}(\exp(-(\frac{v^2}{T}))v\ )((v\ -1)/v\ )\ln(2v^2)dv$$

Este resultado se presenta en la Tabla 1.

T	lnΛ
0,05	0,346
0,1	0,353
0,2	0,354
0,3	0,350
0,4	0,349
0,5	0,350
0,6	0,353
0,8	0,368
1,0	0,392
2,0	0,567
3,0	0,755
4,0	0,926
6,0	1,218

Para el calentamiento de los iones mediante los electrones térmicos mucho más rápidos, con Te >> 1, los efectos cuánticos pueden ignorarse y el logaritmo de coulomb es simplemente Ln (2Te).

Parámetros de funcionamiento del enfoque de plasma denso (DPF) con efecto de campo magnético alto (HMFE). Con el fin de aplicar los fenómenos científicos del HMFE al DPF como una invención en funcionamiento, deben determinarse los parámetros de plasma correctos del plasmoide con el fin de garantizar la producción de energía termonuclear suficiente para generar energía práctica. Esto puede hacerse mediante un modelo del plasmoide que describe correctamente la evolución física a lo largo de su vida.

Como se describe en Lerner, E.J. Laser y Particle Beams, Lerner, E.J., Peratt, A.L., el procedimiento de DPF puede describirse cuantitativamente usando solo algunas suposiciones básicas. En primer lugar, la energía magnética del campo se conserva durante la formación del plasmoide y, porque en una estricción bien formada, toda la energía presente en el campo en el momento de la estricción queda atrapada en el plasmoide. Ya que se ha determinado experimentalmente que la longitud del canal central en el plasmoide está cercana a 8 veces su radio:

$$I_c^2 r_c = I^2 r / 8$$

donde I_c es la corriente (A) en el plasmoide, r_c es el radio (cm) del canal de plasmoide central, I es la corriente en el momento de la estricción y r es el radio de cátodo.

En segundo lugar, a continuación, la teoría de la inestabilidad del plasma muestra que para la formación óptima del filamento, en la cámara de plasma,

$$\omega_{ce}=\omega_{pi}$$

donde ω_{ce} es la frecuencia de giro de electrón y ω_{pi} es la frecuencia de plasma de ion. Esto nos permite predecir inmediatamente las presiones óptimas proporcionadas r e I, la velocidad del plasma y, por lo tanto, la longitud del electrodo para una longitud de pulso proporcionada.

$$n_i = (\mu M/m)I^2/100\pi mc^2r^2$$

$$V = c(m/\mu M)(r/R),$$

donde n_i es la densidad de ion inicial, μ es la masa atómica, V es la velocidad de revestimiento máxima en el ánodo, R es el radio de ánodo, m es la masa del electrón y M es la masa del protón.

En tercer lugar, la teoría de la inestabilidad también puede usarse para mostrar que en los filamentos

$$\omega_{cef} = \omega_{pep}$$

Donde ω_{cef} es la frecuencia de giro de electrón en el filamento y ω_{pep} es la frecuencia de plasma de electrón en el plasma de fondo. El sistema de filamentos entrantes y, por lo tanto, el DPF como un conjunto tiene una resistencia efectiva de:

$$15/(\mu M/m)^{3/4}\ \text{ohms}$$

De tal manera que puede determinarse la I máxima para una V dada. Debería observarse que este es un valor máximo, y que solo puede obtenerse si la inductancia de la fuente de alimentación pulsada más el DPF es suficientemente baja.

En cuarto lugar, se conoce que en el momento en que el plasmoide comienza a deteriorarse:

$$\omega_{ce}=2\omega_{pe}.$$

Esto se debe a la condición de que cuando la frecuencia del sincrotrón supera dos veces la frecuencia del plasma, puede irradiarse la energía. En este punto, la corriente comienza a disminuir, y el cambio en el campo magnético establece grandes potenciales de aceleración para mantener la corriente. Esto a su vez genera los haces de iones y electrones que liberan la energía atrapada en el plasmoide e inician su deterioro, así como el comienzo de las reacciones nucleares.

Finalmente, se supone que durante la compresión, la relación B/n es una constante. A partir de estas relaciones físicas básicas, pueden obtenerse los parámetros de plasma en el plasmoide, no solo para el hidrógeno, sino también para cualquier gas o mezcla de gases. Los resultados se resumen a continuación:

$$r_c = 2^{-7/3}\mu^{-2/3}z^{-2/3}M/m^{-2/3}r = 1{,}32x10^{-3}\mu^{-2/3}z^{-2/3}r$$

$$B_c=4z(\mu M/m)B$$

$$n_c=3{,}7x10^{10}\mu^2 zI^2/r^2$$

Donde B_c es el campo máximo en el cátodo. El modelo también nos permite describir la producción de los haces de electrones y de iones y la duración del plasmoide. Esto es posible simplemente igualando la energía perdida a través de los haces con el deterioro del campo de plasmoide B, permitiendo un cálculo del potencial de aceleración, la corriente del haz y el tiempo de deterioro.

$$\tau = 6{,}2x10^{-6}r_c/R_B = 8{,}2x10^{-9}\mu^{-2/3}z^{-2/3}r/R_B$$

$$n\tau= 304\mu^{4/3}z^{1/3}I^2/rR_B$$

$$E_b=I_cR_Be/4\pi^2=,24\mu^{1/3}z^{1/3}IR_B$$

$$I_b = ,24\mu^{1/3}z^{1/3}I$$

En este caso, τ es el tiempo de deterioro del plasmoide, R_B es la resistencia efectiva del haz, n_c es la densidad del plasmoide, E_b es la energía promedio del haz por carga electrónica e I_b es la corriente del haz. Sin embargo, debe imponerse una modificación en este caso. Para una I baja y, por lo tanto, bajos potenciales de aceleración, todas las partículas en el plasmoide se evacuan a través del haz sin transportar toda la energía. En este caso, el modelo simple se descompondrá cerca del final del deterioro del plasmoide. Sin embargo, para los fines de la presente invención, una aproximación adecuada simplemente reduce la vida útil del plasma mediante la relación entre el potencial de aceleración y el necesario para transportar toda la energía del plasmoide. Para una buena aproximación, este factor resulta ser I/1,4 MA. Para I > 1,4 MA, este factor es la unidad.

La densidad de partículas aumenta con μ y z, así como con I, y disminuye con el aumento de r. Físicamente, este es un resultado directo de la mayor relación de compresión que se produce con los gases más pesados, como se desprende de las relaciones anteriores. Por lo tanto, se ve que el parámetro de plasma crucial $n\tau$ mejora con los gases más pesados. De hecho, esta es una mejora más rápida de lo que parece al principio, ya que puede demostrarse que RB también disminuye cuando $\mu^{-3/4}$. Suponiendo que z y μ sean proporcionales, $n\tau$, aumenta de este modo cuando $\mu^{2,4}$.

Estas predicciones teóricas están en buen acuerdo con los resultados obtenidos experimentalmente. Se obtiene un valor de 0,43 GG cuando estas ecuaciones se usan para predecir, de acuerdo con el valor observado de 0,4 GG. De manera similar, las fórmulas producen 4,6 x 10^{13} s/cm^3 en comparación con el valor mejor observado de 9 x 10^{13} y el promedio de 0,9 x 10^{13}.

Usando estas fórmulas y las ecuaciones HMFE es posible producir simulaciones del plasmoide que dan la producción termonuclear, la energía liberada en rayos X y en el haz para cualquier radio y el campo magnético dados del plasmoide. Esta invención desvela las condiciones óptimas para el plasmoide basándose en estas simulaciones. Las fórmulas también determinan, para una mezcla dada de hidrógeno y boro, la densidad de los electrones y los iones del plasmoide. Se muestran ejemplos en la Tabla 2, que se aplican al decaborano, $B_{10}H_{14}$, y que indican las condiciones preferidas de r = 8,6 micrómetros, B = 13 GG. Para estas condiciones, la densidad de electrones será aproximadamente de 3,7 x 10^{24}/cc.

Tabla 2

Radio (microns)	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
B (GG)	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0
Entrada en bruto (kJ)	7,0	8,7	10,5	12,5	14,6	17,0
Entrada/Rayos X	0,39	0,45	0,52	0,60	0,75	0,78
Entrada/Haz	0,84	0,91	0,94	0,94	0,92	0,87
Entrada/Rayos X + Haz	1,23	1,36	1,46	1,54	1,67	1,65

Para otras condiciones, la energía de salida total puede ser algo mayor, pero la energía del haz es algo menor. Las condiciones más óptimas dependerán del diseño exacto del sistema de conversión de energía y de las eficacias

relativas de los dispositivos de conversión de rayos X y de haces de iones. Para las condiciones de ejemplo anteriores, pueden usarse las fórmulas para determinar que el radio de cátodo será de aproximadamente 3,7 cm, la corriente máxima de aproximadamente 2,8 MA y la presión de llenado de aproximadamente 31 torr.

El decaborano es un sólido a temperatura ambiente y una presión de vapor de este tipo requiere temperaturas de 107 °C, lo que significa que en funcionamiento el sistema de refrigeración del reactor tendrá, en este ejemplo, que mantener esta temperatura para los electrodos, la cámara de vacío y la cámara de combustible. Para presiones más altas o más bajas, esta temperatura también sería mayor o menor, basándose en las tablas de presión de vapor publicadas. El intervalo de parámetros para un sistema optimizado que usa el decaborano es un radio de cátodo de aproximadamente 2 a 7 cm, una corriente de aproximadamente 2 a 3,5 MA y una presión de llenado (por ejemplo, proporcional a I^2/r^2, donde I es la corriente máxima y r es el radio de cátodo) de aproximadamente 2 KPa a 8 KPa (15 a 60 torr). También pueden usarse otros compuestos de boro, tal como el pentaborano. En el caso del pentaborano, un gas a temperatura ambiente, el control de la temperatura de los electrodos ya no es tan crítico y puede ajustarse para optimizar la eficacia del sistema de refrigeración.

Transferencia de momento angular y formación de plasmoides. La elección adecuada del radio de cátodo, la corriente máxima y la presión de llenado no es suficiente para garantizar la formación eficaz de un plasmoide que contiene toda la entrada de energía magnética del dispositivo. El procedimiento de formación de plasmoides implica el desarrollo de inestabilidad de angulación en el flujo de corriente en la estricción y, como tal, requiere una cierta cantidad de momento angular. Durante la fase de compresión, se conserva el momento angular por unidad de masa, por lo que este momento angular puede obtenerse del momento angular presente en la matriz de filamentos en el momento en que comienza la compresión. Para el ejemplo citado anteriormente, puede obtenerse una medida aproximada del momento angular por unidad de masa necesaria mediante la fórmula 0,5 VAr, en este caso VA es la velocidad de Alfven (en este caso 1,05 x 10^9 cm/s) y r es el radio (por ejemplo, aproximadamente de 8,6 micrones). Esto produce un valor de aproximadamente 4,5 x 10^5 cm^2/s.

El momento angular puede aplicarse al revestimiento de plasma durante la transferencia mediante la interacción de los flujos de electrones que fluyen hacia dentro y cualquier pequeño campo magnético axial inicial (por ejemplo, el pequeño componente axial del campo magnético de la tierra). La fuerza JXB acelera los electrones ligeramente en la dirección acimutal, creando un componente acimutal en la corriente. Esto a su vez aumenta el campo magnético axial y, por lo tanto, la aceleración acimutal de los electrones. De esta forma, un campo magnético inicial muy pequeño (o componente azimutal inicial pequeño y aleatorio en la corriente creado por las irregularidades en los electrodos) puede magnificarse rápidamente. Por ejemplo, dada una relación entre el campo magnético axial y el total $B_\theta/B_T] = \text{sen}\theta$, entonces cualquier campo axial inicial se amplificará de tal manera que al final de la transferencia $\theta = \theta_i e^{VA\tau/r}$, donde τ es el tiempo de transferencia. Por lo tanto, el momento angular final por unidad de masa es $VAr\theta_i e^{VA\tau/r}$.

Ya que $V_A\tau/r$ es proporcional a L/R, el momento angular depende sensiblemente de esta relación. Si no hay suficiente momento angular, el radio del plasmoide se reducirá en proporción al momento angular y la energía de plasmoide total y la masa se reducirán como el cubo del momento angular. Esta sensibilidad a un momento angular inicial muy pequeño puede explicar en parte la bien conocida variabilidad de disparo a disparo de los dispositivos de enfoque de plasma. Los cálculos muestran que si se confía en este mecanismo de amplificación natural para proporcionar un momento angular y los campos magnéticos iniciales son campos ambientales, L/R debe ser más que aproximadamente 7 para una alta eficacia de la transferencia de energía en el plasmoide. De hecho, en la mayoría de los dispositivos DPF optimizados, esta relación supera el 7 y puede ser tan alta como 17, lo que implica que son deseables V_A altas y τ más largas.

Ya que la V_A en el cátodo se fija para una función óptima a aproximadamente 3,2 cm/microsegundo y la VA en el ánodo es 3,2 R_a/R_c cm/microsegundo. El radio de ánodo está a su vez limitado por la tensión térmica inducida por la corriente que pasa a través del ánodo. Los estudios termomecánicos indican que para el cobre existe una relación mínima de aproximadamente 1 cm/MA de corriente máxima, mientras que para el berilio, que es más fuerte, el límite es de 1 cm/2MA. Esta comparación conduce al uso de los electrodos de berilio en la presente invención. Los electrodos de berilio permiten que la alta emisión de rayos X pase principalmente a través del berilio. Por el contrario, también pueden usarse los electrodos de cobre; sin embargo, la alta emisión de rayos X erosionará el ánodo de cobre rápidamente.

Para los ejemplos de 2,8 MA, un radio de ánodo de aproximadamente 1,4 cm sería el mínimo, lo que llevaría a una VA máxima de aproximadamente 8,35 cm/microsegundo. Para una relación L/r de 7, se requeriría una longitud de pulso de aproximadamente 1,8 microsegundos. Un extremo de ánodo cónico con un radio de 0,7 cm implicaría una longitud de pulso algo más corta de aproximadamente 1,35 microsegundos. Un experto en la materia reconocerá que puede usarse un radio de ánodo diferente en función de la aplicación específica, por ejemplo, electrodos de 0,5 cm a 4,0 cm. Además, la forma, el contorno y el perfil del electrodo pueden adaptarse a la aplicación específica. Por ejemplo, el electrodo puede tener un diámetro constante a lo largo de la longitud del electrodo, sin embargo otros electrodos pueden tener un diámetro que difiera de región a región, por ejemplo, cónico en uno o ambos extremos, y así sucesivamente.

La desventaja de tales electrodos largos es su alta inductancia, de aproximadamente 20 nH. Ya que la inductancia

externa debe superar la inductancia de carga, la inductancia total en el sistema debe ser de aproximadamente 45 nH, lo que conduce a una energía total de al menos aproximadamente 176 kJ, muy por encima de los aproximadamente 15 kJ alimentados en el plasmoide, lo que significa que la recuperación de energía tiene que ser extremadamente eficaz. Incluso aproximadamente de un 1 % de pérdida en la recuperación total de energía representará aproximadamente el 16 % de la ganancia de energía de fusión. En este caso, la capacitancia será de aproximadamente 29 microfaradios y la tensión de carga de aproximadamente 100 kV.

Un electrodo más corto tendría la ventaja de requerir menos energía total, produciendo de este modo menores pérdidas en la energía de recuperación almacenada inductivamente en el circuito. Por ejemplo, una longitud de aproximadamente 4 cm permitiría una inductancia de circuito total de aproximadamente 18 nH y una energía total de solo 62 kJ. Una pérdida del 1 % de la energía recuperada significará solo una pérdida del 4 % de la ganancia total de energía de fusión. En este ejemplo, hay una longitud de pulso de aproximadamente 0,54 microsegundos, una capacitancia de aproximadamente 6,6 microfaradios y una tensión de carga de aproximadamente 137 kV. Sin embargo, tales electrodos cortos no producirán la cantidad necesaria de momento angular, comenzando desde los campos magnéticos ambientales.

Inyección del momento angular. En lugar de confiar en la amplificación del momento angular generado por la interacción de la corriente con el campo magnético ambiental, esta invención inyecta un momento angular inicial más grande. La presente invención logra esto proporcionando a los electrodos de cátodo una ligera torsión helicoidal alrededor del eje del dispositivo o generando un pequeño campo magnético axial inicial por medio de un serpentín helicoidal, que se activa por separado de la fuente de alimentación principal.

La inclinación del electrodo o la fuerza del campo magnético inicial pueden calcularse a partir de la fórmula anterior o a partir de una simulación de la transferencia. En el ejemplo anterior del dispositivo de decaborano de 2,8 MA con electrodos que tienen una longitud de aproximadamente 4 cm, será óptima una inclinación helicoidal de aproximadamente 0,3 grados o un campo magnético axial inicial de aproximadamente 200 G. Para otros electrodos, la inclinación puede variar desde 0,05 a 10 grados y el campo desde 5 a 1000 G. En cada caso, el momento angular inicial es de tal manera que, una vez amplificado durante la transferencia, el momento angular por unidad de masa es igual al del plasmoide.

Mediante la inyección del momento angular inicial, la presente invención permite la formación de plasmoides de tamaño óptimo que contienen casi toda la energía presente en el campo magnético del dispositivo, incluso para electrodos relativamente cortos. Como se ha tratado anteriormente, a su vez estos electrodos relativamente cortos reducen la inductancia general del dispositivo y la cantidad total de la energía que debe introducirse en los condensadores, y por lo tanto la cantidad total que debe recuperarse.

Visto de otra manera, para un radio y una longitud de electrodo dados, la inyección del momento angular aumentará en gran medida el momento angular y, por lo tanto, el tamaño del plasmoide y, por lo tanto, la producción energética de las reacciones de fusión en el plasmoide. Aproximadamente, la producción de fusión aumentará como la cuarta potencia de la cantidad del momento angular inyectado.

Esta inyección del momento angular beneficiará a todas las aplicaciones del enfoque de plasma, no solo a la aplicación actual de generación de energía de fusión. En particular, inyectando de manera fiable la misma cantidad de momento angular para cada disparo, la presente invención reducirá la variabilidad o la producción de neutrones o rayos X de disparo a disparo, lo que se provoca en parte por las pequeñas inyecciones aleatorias del momento angular ambiental.

Incluso con el uso del momento angular inyectado, hay un límite inferior en la longitud óptima del ánodo debido a que el ánodo tiene que ser sustancialmente más largo que el aislador. La experiencia de muchos experimentos de DPF muestra que la longitud óptima del aislador nunca es más pequeña que aproximadamente 0,7 veces el radio de ánodo y para radios pequeños tiende a ser mayor que el radio. Por lo tanto, la longitud del aislante tenderá a ser más de aproximadamente 2 cm y la longitud del ánodo no mucho menor que aproximadamente 4 cm.

Recuperación de energía. En el momento en que el plasmoide termina de emitir su energía y deja de existir, una gran cantidad de energía todavía está atada en los elementos inductivos del circuito, aunque la corriente ha caído significativamente desde su máximo. Por ejemplo, para el circuito de 18nH descrito anteriormente, aproximadamente 47 KJ seguirán estando atados de esta manera. La energía en el circuito puede recuperarse con alta eficacia usando un diseño de circuito convencional. En una realización preferida, puede colocarse un conmutador rápido en el circuito entre el DPF y el lado de tierra del condensador principal. Una vez finalizado el procedimiento de plasmoide, el conmutador puede desviar la corriente a un segundo banco de condensadores, que puede cargarse a medida que la corriente se descarga de los inductores. Cuando la corriente llega a cero, el conmutador puede volver a abrirse, capturando la energía en el segundo condensador. Un experto en la materia puede diseñar otros circuitos de recuperación de energía.

Conversión de energía de los rayos X. El pulso de rayos X puede convertirse con una alta eficacia en electricidad a través del efecto fotoeléctrico. El conversor es esencialmente un condensador con múltiples capas de películas de metal delgadas. Un tipo de película, el tipo A, sirve como el emisor de electrones, convirtiendo la energía de rayos X

a la de los electrones multi-keV. Estas capas también sirven como los electrodos de tierra del condensador. Un segundo tipo de película, el tipo B, sirve para recoger los electrones emitidos y actuar como los electrodos de cátodo del condensador. En una sola capa, los rayos X inciden en la película A de metal, provocando la emisión de electrones con un intervalo de energías. Estos electrones se desplazan a través de una serie de películas B muy delgadas que inicialmente se cargan a una serie ascendente de tensiones mediante un circuito exterior. Cuando los electrones se acercan a un electrodo cargado a una tensión V mayor que su energía en voltios de electrones, se vuelven y se absorben por el siguiente electrodo inferior.

Para una alta eficacia en la conversión de la energía de los rayos X en energía de los electrones, el diseño de conversor debe garantizar que casi todos los rayos X se absorban en las películas A y que muy poca energía de electrón se absorba antes de dejar la película A. Esto significa que para los electrones (y por lo tanto los rayos X) de una energía E dada, el espesor de cada película A debe ser pequeño (por ejemplo, de aproximadamente 1 a aproximadamente el 10 % e idealmente menos de aproximadamente el 5 %) de la distancia de frenado en el material A de los electrones de esa energía. Al mismo tiempo, el espesor total de todas las capas A debe ser al menos 3 veces la distancia de atenuación de los rayos X de la energía E en el material A. Además, la absorbancia de rayos X en las películas B debe minimizarse mediante la elección adecuada del material B.

En la práctica, la eficacia de conversión solo puede optimizarse para un intervalo de energía de rayos X considerablemente más estrecho que el intervalo realmente emitido desde el plasmoide, por lo que una serie de colectores, anidados concéntricamente, deben diseñarse, con los colectores para la energía más baja de rayos X más cercana al enfoque de plasma y para las energías más altas más lejanas. Además, la capacitancia total de todas las capas para cada intervalo de energía de rayos X debe ser suficiente para capturar la energía total emitida dentro de este intervalo.

La eficacia de la conversión de la energía de electrón en energía eléctrica almacenada está determinada por el número de películas tipo B por capa. Si las tensiones de las películas tipo B se establecen para que cada una sea un 20 % más alta que su próxima vecina inferior, estando la tensión mínima ligeramente por encima de la energía mínima de rayos X y la máxima ligeramente por encima de la excitación de rayos X máxima para un determinado intervalo, la eficacia de conversión promedio será de aproximadamente un 90 %. Por otro lado, las películas B no pueden establecerse tan juntas que el campo entre las misma supere la descomposición dieléctrica de los aisladores que separan y soportan físicamente cada película. En general, los colectores optimizados para energías más bajas tendrán un material de tipo A relativamente ligero, por ejemplo aluminio, con el fin de no necesitar películas excesivamente delgadas, mientras que el cobre se usará para energías intermedias y los metales más pesados tal como el tungsteno para las energías más altas. En la mayoría de los casos, los materiales de tipo B serán metales ligeros para minimizar la absorción de rayos X, por ejemplo, aluminio y berilio.

Por ejemplo, un colector optimizado para un pulso largo de 10 kJ y 3 ns de rayos X, con una distribución de energías de aproximadamente 10 keV a 80 keV, con aproximadamente la mitad de la energía por debajo de 20 keV. Hay 7 películas tipo B para cada película de tipo A con el conversor de rayos X que tiene tres conversores optimizados con los parámetros descritos en la Tabla 2. En este ejemplo, aproximadamente el 95 % de la energía de rayos X se convierte en energía de electrón, aproximadamente el 95 % de la energía de electrón escapa a las películas de tipo A y alrededor del 90 % de la energía de electrón escapada se almacena como energía eléctrica, para una eficacia de conversión general de alrededor del 81 % de la energía de rayos X en energía eléctrica almacenada.

Tabla 3

Intervalo de energía (kev)	*Energía Total (k_j)*	*Capacitancia (mf)*	*# de capas*	*Material*	*Espesor tipo A (m)*	*Espesor de capa (m)*
10-20	*2,6*	*52*	*3000*	*Aluminio*	*0,1*	*33*
20-40	*3,9*	*22*	*1400*	*Cobre*	*0,09*	*70*
40-80	*3,5*	*15*	*1000*	*Tungsteno*	*0,17*	*110*

Los electrodos tipo B a un potencial dado están conectados entre sí a través de conductores adecuadamente separados y aislados que son paralelos al sistema de refrigeración, descritos a continuación, mientras que los electrodos tipo A están igualmente conectados entre sí a tierra.

Conversión de energía del haz de iones. La técnica existente puede usarse para recoger eficazmente la energía del haz de iones. Puede usarse cualquiera de los conversores peniotrón (por ejemplo, Yoshikawa y col.) o girotrones para acoplar los haces de iones de manera eficaz a un pulso de RF. Una serie de conmutadores rápidos (por ejemplo, conmutadores de diamante) activados por luz ultravioleta, pueden usarse para acoplar el pulso de RF en los condensadores de almacenamiento rápido, abriendo el conmutador cuando los condensadores están cargados, evitando que la energía fluya de nuevo al resonador. El haz de iones se propaga en vuelo, pero aún tiene una longitud de pulso corta de unos 30 ns cuando llega al conversor que crea un campo magnético que varía rápidamente, facilitando la optimización de un diseño eficaz para acoplar la energía en un circuito. Sin embargo, la

alta potencia (por ejemplo, aproximadamente 500 GW) requiere un diseño cuidadoso del circuito para vincular la transferencia de la potencia con los capacitores a potenciales razonables. Las consideraciones básicas son claras para un experto en la materia.

Operación general y circuitos del reactor. El reactor funciona en tres fases para cada pulso. En la primera fase, la energía se transfiere de los condensadores de almacenamiento principales al DPF y a continuación al plasmoide. En la segunda fase, se genera la energía termonuclear en el plasmoide y su energía, por ejemplo, en forma de rayos X y un haz de iones, se convierte en electricidad y se almacena en condensadores secundarios. Posteriormente, la energía restante almacenada en el circuito de potencia se transfiere a otro condensador secundario. A continuación, al final de la segunda fase, la energía inicial del pulso más la ganancia neta de energía de fusión se almacena en tres bancos de condensadores. En la tercera fase, los tres bancos secundarios se usan para recargar más que el banco de condensadores principal, mientras que la ganancia de energía neta puede emitirse como una corriente CC constante a la red o convertirse en corriente CA. El circuito se indica esquemáticamente en este caso y los detalles de los sistemas de conmutación son claros para un experto en la materia.

En general, la frecuencia de pulso está por encima de un mínimo determinado por la recombinación del gas de llenado. Es muy deseable mantener el gas de llenado en un estado de plasma para que el boro no se deposite sobre los electrodos. Además, la reionización del gas es costosa en términos de energía. Ya que los tiempos de radiación de recombinación típicos son del orden de varias decenas de milisegundos, para los plasmas ópticamente gruesos se requiere una frecuencia de pulso de al menos 1 kHz. El sistema de refrigeración limita las frecuencias de pulso máximas, como se describe a continuación.

Sistema de refrigeración. En general, el sistema de refrigeración elimina el calor del ánodo, del sistema de conversión de rayos X y del sistema de conversión del haz de iones. El ánodo es el más exigente, ya que es el más pequeño. Por ejemplo, un ánodo con un radio de aproximadamente 1,4 cm y una longitud de aproximadamente 4 cm tiene un área superficial de aproximadamente 35 cm^2. Un ánodo de berilio absorberá a través de una resistencia interna aproximadamente 100 J por cada pulso de aproximadamente 2,8 MA y aproximadamente 0,5 microsegundos. Ya que la velocidad máxima de eliminación de calor, en general, se considera que es aproximadamente 2,5 kW/cm^2, una frecuencia de pulso de aproximadamente 1 kHz es aproximadamente el máximo que puede usarse para un solo electrodo. Ya que esto es mucho menor que el tiempo de ciclo de 500 kHz de los condensadores principales, podrían hacerse funcionar varios conjuntos de electrodos a partir de un único banco de condensadores. Por ejemplo, se podrían esperar aproximadamente 5 MW de salida neta para cada conjunto de electrodos.

Ya que el sistema de conversión de energía del haz de iones tiene una gran área superficial y el calor residual se distribuye dentro del mismo, refrigerarlo es relativamente rutinario para un experto en la materia. Sin embargo, en el caso del sistema de conversión de rayos X, debe tenerse cuidado para evitar el bloqueo de los rayos X o electrones con el propio refrigerante pasando un refrigerante eléctricamente no conductor, como la silicona, a través de varias docenas de pares muy estrechos de placas, todas orientadas radialmente hacia el plasmoide. Si las placas de refrigerante tienen una separación típica de unas pocas decenas de micrómetros, absorben menos de aproximadamente el 1 % de la radiación, pero aún pueden transportar un flujo de refrigerante adecuado para eliminar aproximadamente 2 MW de calor residual del dispositivo de conversión de rayos X. Las placas de refrigerante, que transcurren radialmente a través del dispositivo cada diversos grados, también pueden servir para dar soporte mecánico a los electrodos de película delgada.

Se entenderá que las realizaciones específicas descritas en el presente documento se muestran a modo de ilustración y no como limitaciones de la invención. Las principales características de esta invención pueden emplearse en diversas realizaciones sin alejarse del ámbito de la invención. Los expertos en la materia reconocerán, o serán capaces de determinar usando no más que la experimentación de rutina, numerosos equivalentes a los procedimientos específicos descritos en el presente documento. Tales equivalentes se consideran que están dentro del ámbito de esta invención y están cubiertos por las reivindicaciones.

Todas las composiciones y/o procedimientos desvelados y reivindicados en el presente documento pueden realizarse y ejecutarse sin experimentación indebida a la luz de la presente divulgación. Aunque las composiciones, dispositivos y procedimientos de esta invención se han descrito en términos de las realizaciones preferidas, será evidente para los expertos en la materia que esas variaciones pueden aplicarse a las composiciones, dispositivos y/o procedimientos y en las etapas o en la secuencia de etapas del procedimiento descrito en el presente documento sin alejarse del ámbito de la invención. Se considera que todos los sustitutos y modificaciones similares evidentes para los expertos en la materia están dentro del ámbito de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

Referencias

McNally, J.Rand, Nucl. Fusion, 15, 344 (1975).
J. Galambos y G.H. Miley, Nucl. Tech./Fusion, 4, 241 (1983).
G.S. Miller, E.E. Salpeter, e I. Wasserman, ApJ, 314, 215 (1987).
Eric J. Lerner, “Prospects for P11B Fusion with the Dense Plasma Focus: New Results” Actas del quinto simposio

"Current Trends in International Fusion Research: A Review" 24-28 de marzo de 2003, Washington, D.C, también http://arxiv.org/abs/physics/ 0401126.
Lerner, E.J. Laser y Particle Beams, 4, Pt. 2, 193 (1986).
Lerner, E.J., Peratt, AL, Informe final, contrato de Jet Propulsion Laboratory 959962 (1995).
K. Yoshikawa y col., Fusion Technology, 19, 870 (1991).

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo (110) para producir rayos X y haces de partículas que comprende:

un ánodo (114) y un cátodo (112) separados por un aislador (116) y localizados coaxialmente y al menos parcialmente dentro de una cámara de reacción;
un gas contenido dentro de la cámara de reacción; y
una fuente (118) de descarga electrónica en comunicación eléctrica con el ánodo (114) y el cátodo (112),
caracterizado porque el cátodo (112) tiene una inclinación helicoidal entre 0,05 y 10 grados que aplica un momento angular a un plasmoide denso, confinado magnéticamente, que se crea alrededor del ánodo (114) como resultado de una descarga electrónica y que emite uno o más haces de iones, uno o más rayos X o una combinación de los mismos.

2. El dispositivo (110) de la reivindicación 1, en el que el gas comprende un borano, o hidrógeno, helio, nitrógeno, metano, neón, argón, xenón o una combinación de los mismos.

3. Un dispositivo (110) para producir rayos X y haces de partículas que comprende:

un ánodo (114) y un cátodo (112) separados por un aislador (116) y localizados coaxialmente y al menos parcialmente dentro de una cámara de reacción;
un gas contenido dentro de la cámara de reacción; y
una fuente (118) de descarga electrónica en comunicación eléctrica con el ánodo (114) y el cátodo (112),

caracterizado porque un serpentín helicoidal está localizado alrededor del cátodo (112) para aplicar un momento angular a un plasmoide denso, confinado magnéticamente, que se crea alrededor del ánodo (114) como resultado de una descarga electrónica y que emite uno o más haces de iones, uno o más rayos X o una combinación de los mismos, en el que el serpentín helicoidal se activa por separado para crear un campo magnético axial entre 5 10^{-4} T y 10^{-1} T (5 y 1000 Gauss).

4. El dispositivo (110) de la reivindicación 1 o 3, en el que el radio de ánodo es menor que aproximadamente 1,5 cm, específicamente entre aproximadamente 0,25 y 1,5 cm, proporcional a la corriente máxima en el dispositivo (110) medida en mega amperios y el radio de cátodo es menor que aproximadamente 3 cm, específicamente entre aproximadamente 0,5 y 3 cm, veces la corriente máxima en el dispositivo (110) medida en mega amperios.

5. El dispositivo (110) de la reivindicación 1 o 3, en el que el cátodo (112) comprende uno o más electrodos individuales localizados alrededor del ánodo (114).

6. El dispositivo (110) de la reivindicación 1 o 3, en el que el ánodo (114) o el cátodo (112) comprenden berilio, cobre o una combinación de los mismos.

7. El dispositivo (110) de la reivindicación 5, en el que los electrodos individuales están inclinados para aplicar un momento angular.

8. Un generador (110) de energía de fusión para liberar energía de fusión y convertir la energía de fusión en energía eléctrica que comprende:

un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 4; y
una fuente de combustible de borano contenida dentro de la cámara de reacción.

9. El generador (110) de la reivindicación 8, en el que la fuente de combustible de borano comprende decaborano.

10. El generador (110) de la reivindicación 8, en el que el cátodo (112) comprende dos o más electrodos individuales localizados alrededor del ánodo (114) en el que los electrodos individuales están inclinados para aplicar un momento angular.

11. El generador (110) de una de las reivindicaciones 8 a 10, que comprende además un conversor de energía de rayos X (40, 46) para convertir directamente las emisiones de rayos X en energía eléctrica que comprende:

una o más capas (40) de emisor de electrones en comunicación eléctrica con múltiples capas (46) de colector de electrones, en el que la una o más capas (40) de emisor de electrones absorben el uno o más rayos X y emiten electrones que se adsorben por las múltiples capas de colector de electrones.

12. El generador (110) de la reivindicación 11, en el que las múltiples capas (46) de colector de electrones están anidadas concéntricamente y las múltiples capas (46) de colector de electrones absorben uno o más electrones de energía diferente.

13. El generador (110) de la reivindicación 11, que comprende además uno o más conversores de energía de rayos

X (40, 46) anidados concéntricamente para recoger rayos X de diferentes niveles de energía.

14. El generador (110) de la reivindicación 11, en el que cada una de las múltiples capas (46) de colector de electrones está separada por una tensión de entre aproximadamente un 15 % y aproximadamente un 25 % en relación con la siguiente capa (46) de colector de electrones.

15. Un procedimiento para producir rayos X y uno o más haces de partículas que comprende las etapas de:

interconectar un ánodo (114) y un cátodo (112) separados por un aislador (116) y localizados coaxialmente con una fuente (118) de descarga electrónica, en el que el cátodo (112) tiene una inclinación helicoidal de entre 0,05 y 10 grados que aplica un momento angular;
formar un revestimiento de plasma a partir de un gas con un campo magnético a través de la descarga de un pulso de corriente eléctrica a través del ánodo (114) y el cátodo (112);
formar un plasmoide alrededor del ánodo (114) como resultado del campo magnético; y
emitir desde el plasmoide uno o más haces de iones, uno o más rayos X o una combinación de los mismos, en el que la emisión es un resultado del deterioro del campo magnético de plasmoide y las colisiones de los electrones y los iones en el plasmoide.

16. El procedimiento de la reivindicación 15, en el que se usa un borano, o hidrógeno, helio, nitrógeno, metano, neón, argón, xenón o una combinación de los mismos para el gas.

17. Un procedimiento para la liberación de la energía de fusión y para convertir la energía de fusión en energía eléctrica que comprende las etapas del procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones 15 o 16, en el que el ánodo (114) tiene un radio de ánodo y el cátodo (112) tiene un radio de cátodo configurados para aplicar un campo magnético alto; y que comprende además las etapas de:

generar energía de fusión en el plasmoide a través del calentamiento del plasmoide; y
emitir energía de fusión a partir del plasmoide como resultado del deterioro del campo magnético del plasmoide y las colisiones de los electrones y los iones en el plasmoide, en el que la energía de fusión se transporta por una o más partículas cargadas y los rayos X.

18. El procedimiento de la reivindicación 17, en el que se usa decaborano para el gas.

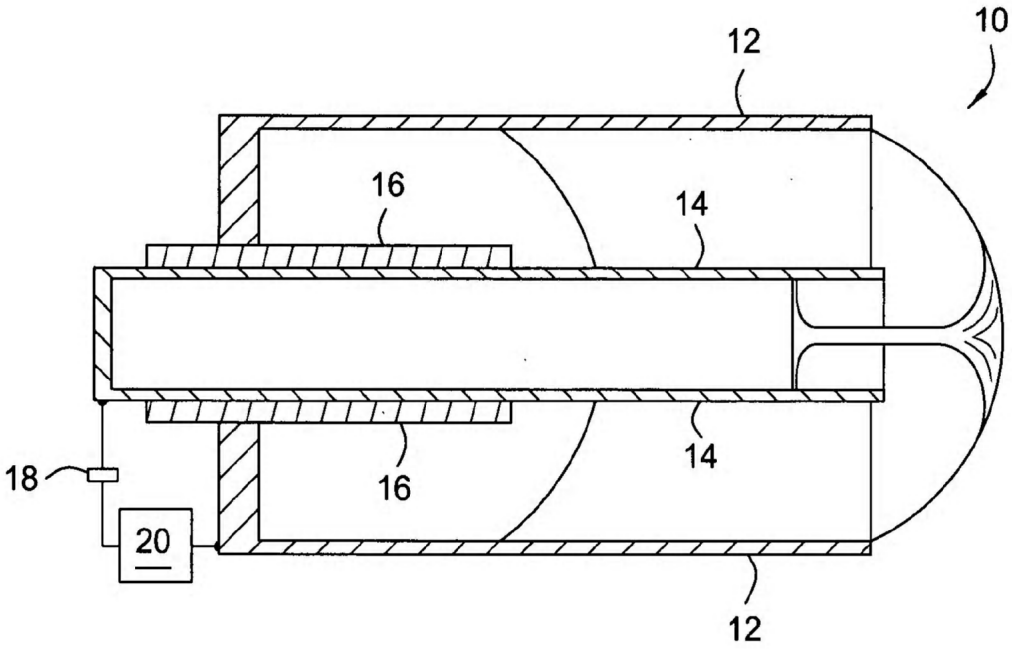


FIG. 1

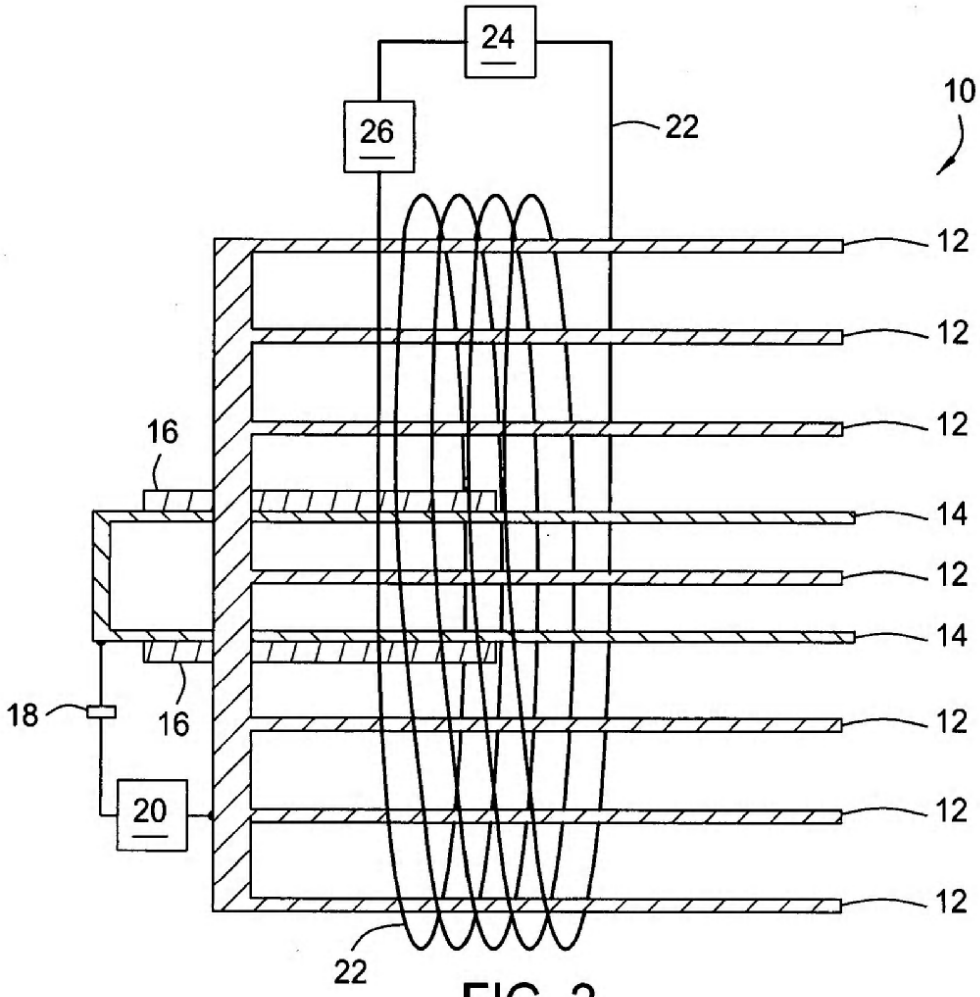

24
26
22
10
12
12
12
16
14
12
14
18
16
12
20
12
12
22

FIG. 2

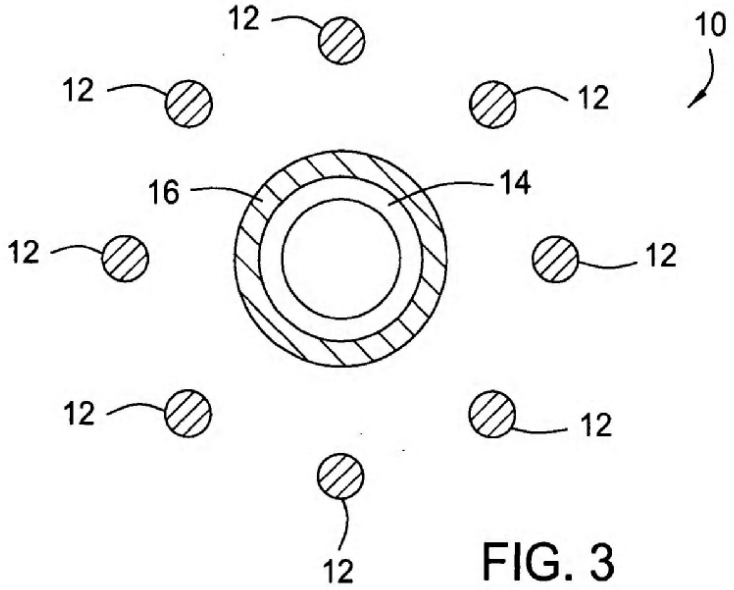

12
10
12
12
16
14
12
12
12
12
12

FIG. 3

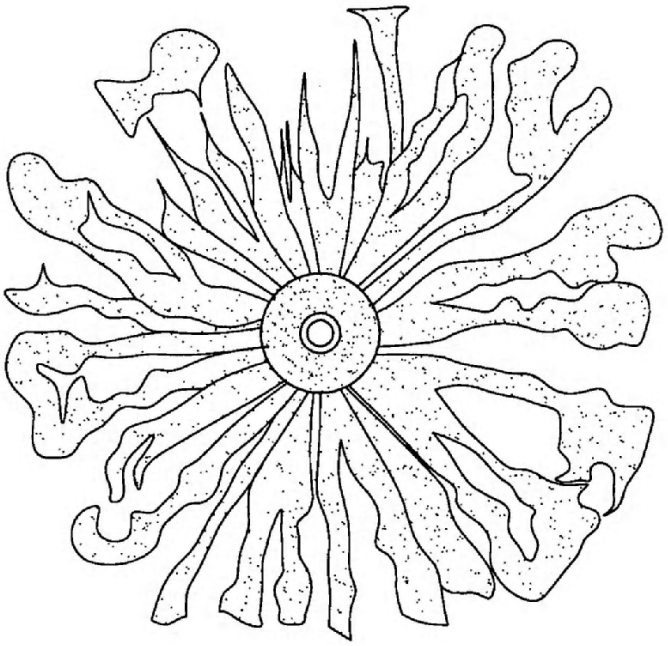


FIG. 4

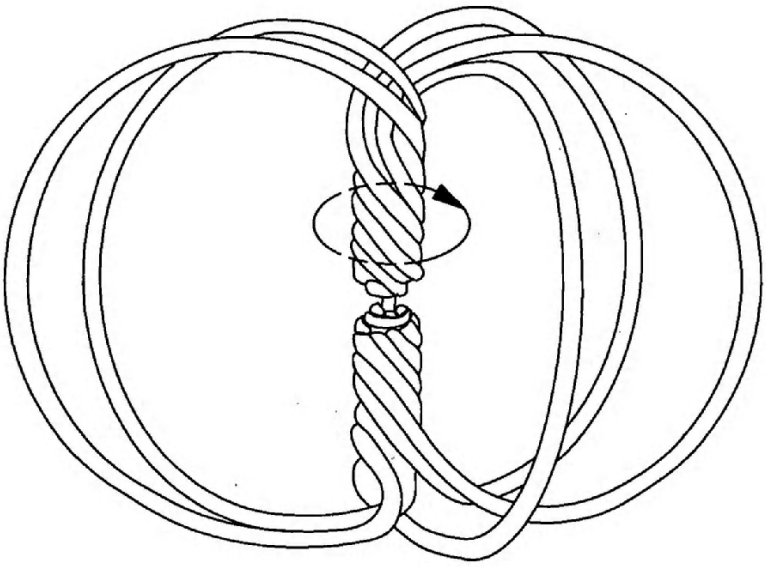
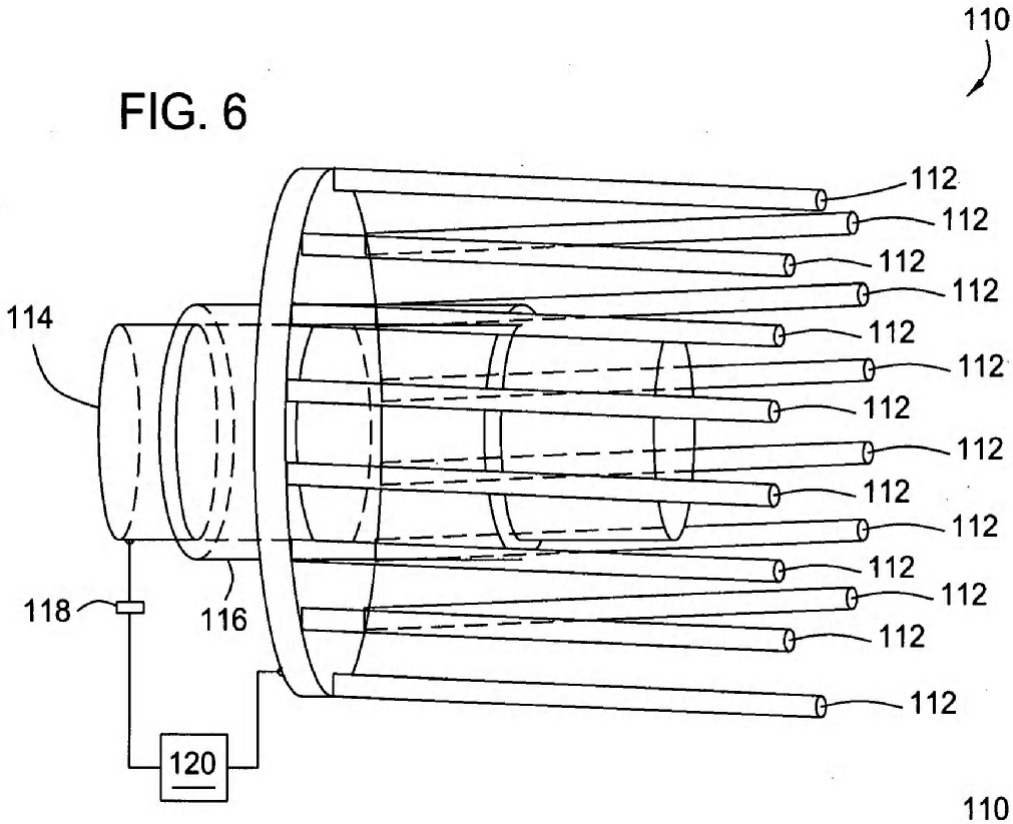


FIG. 5

FIG. 6


110
112
112
112
112
112
112
112
112
112
112
112
112
112
114
118
116
120

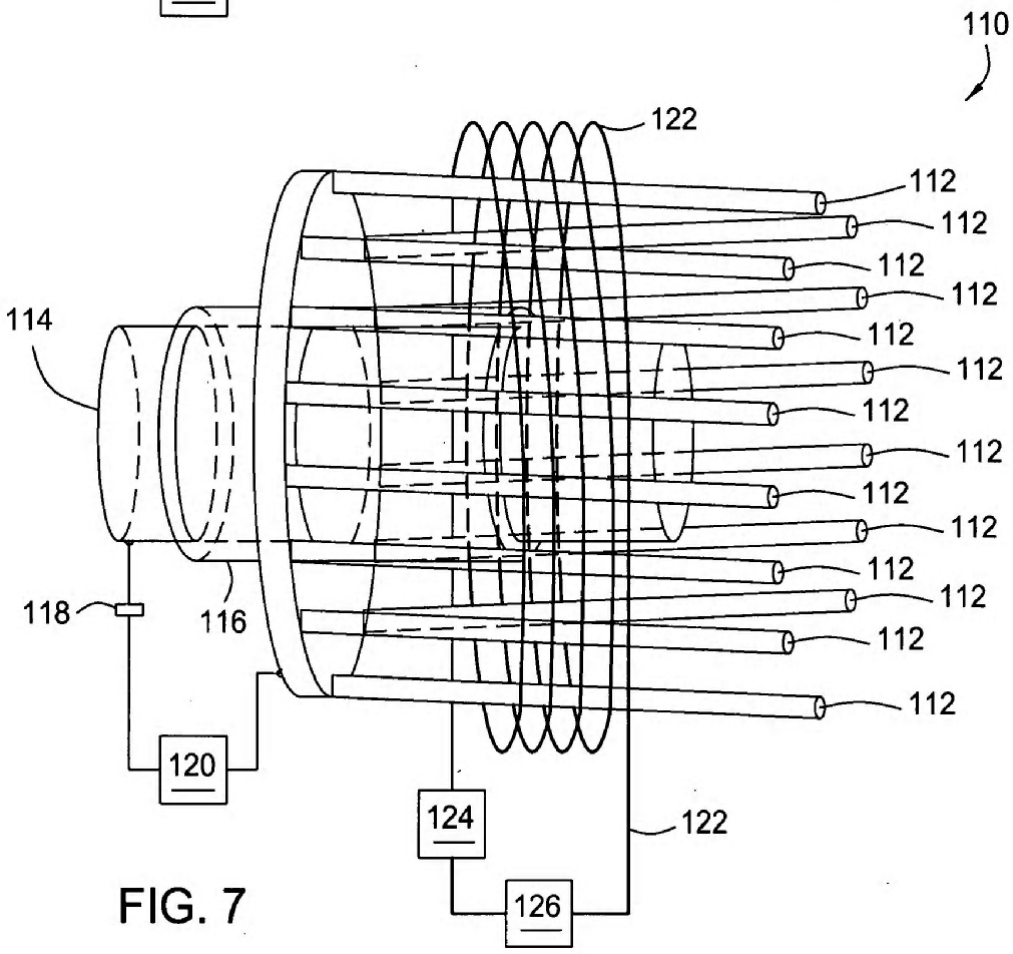

110
122
112
112
112
112
112
112
112
112
112
112
112
112
114
118
116
120
124
126
122

FIG. 7

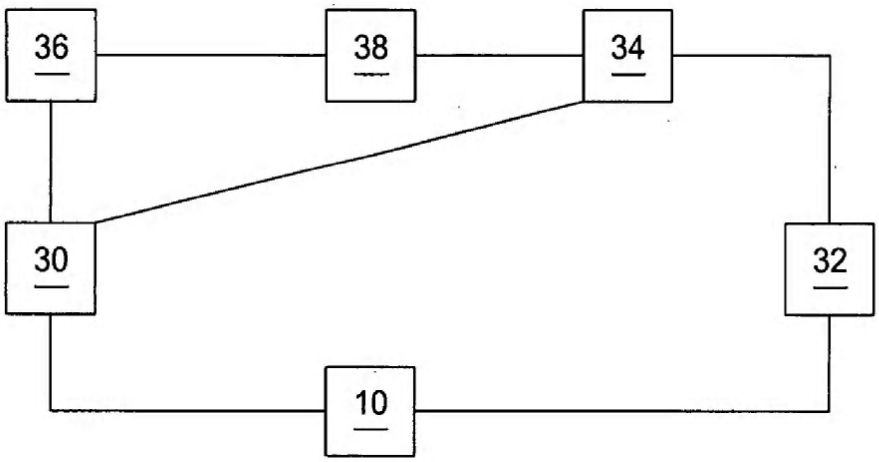


FIG. 8

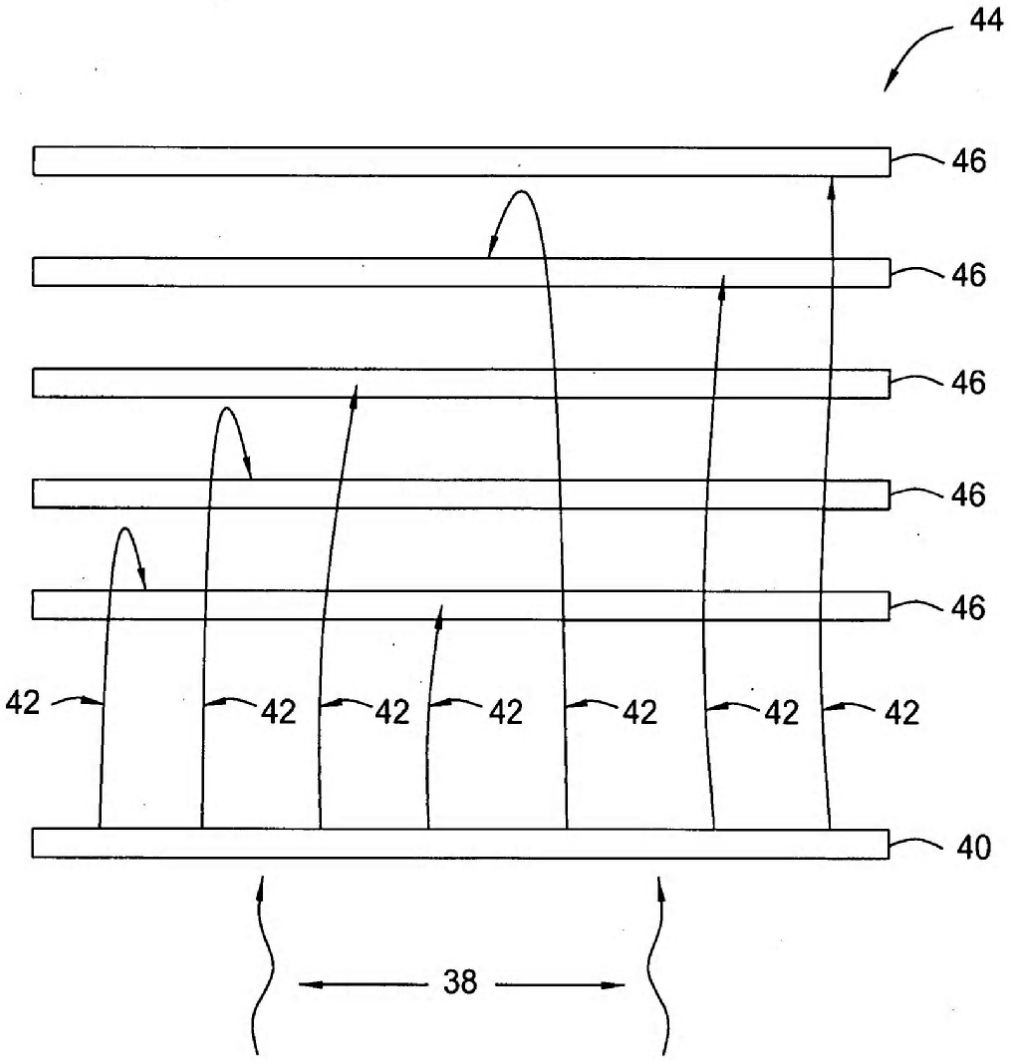


FIG. 9

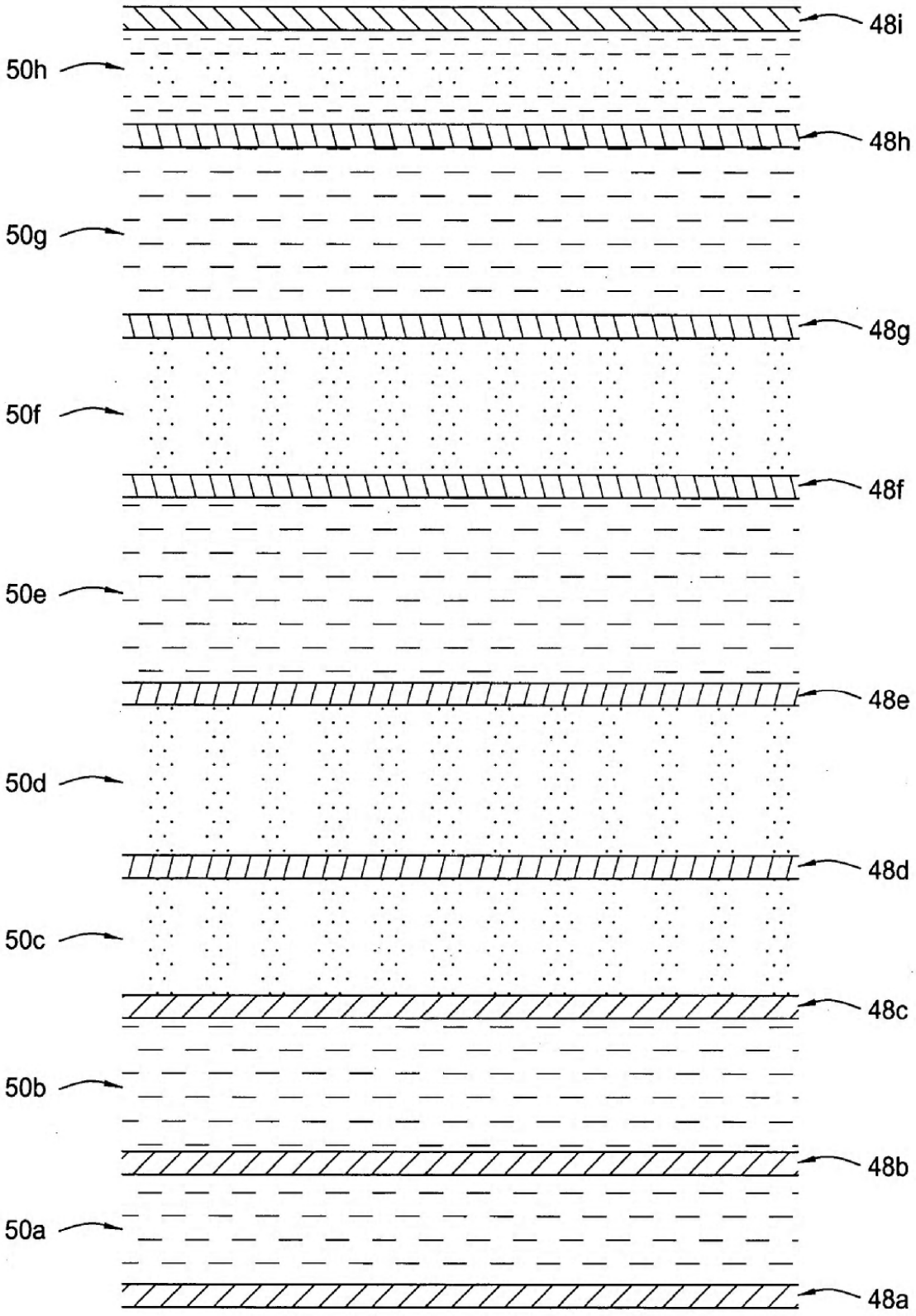

48i
50h
48h
50g
48g
50f
48f
50e
48e
50d
48d
50c
48c
50b
48b
50a
48a

FIG. 10

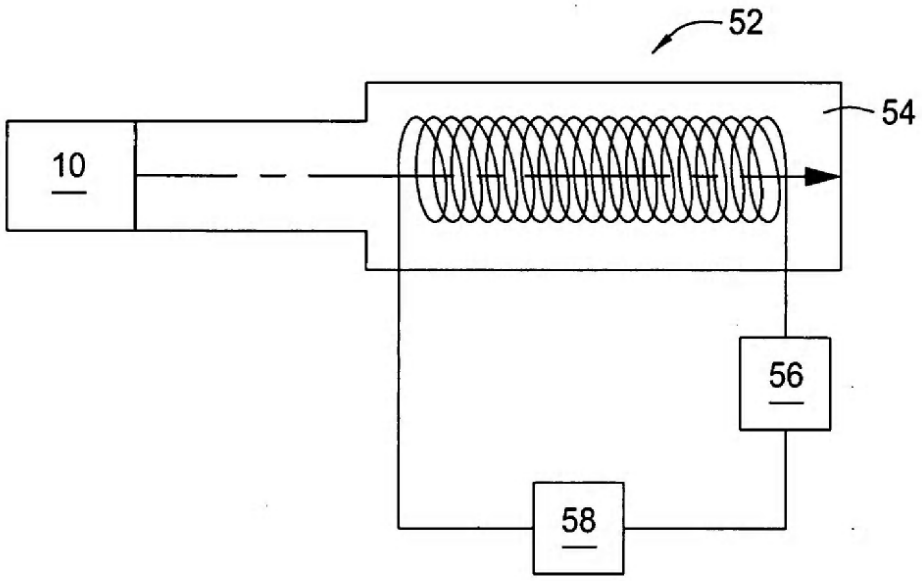


FIG. 11

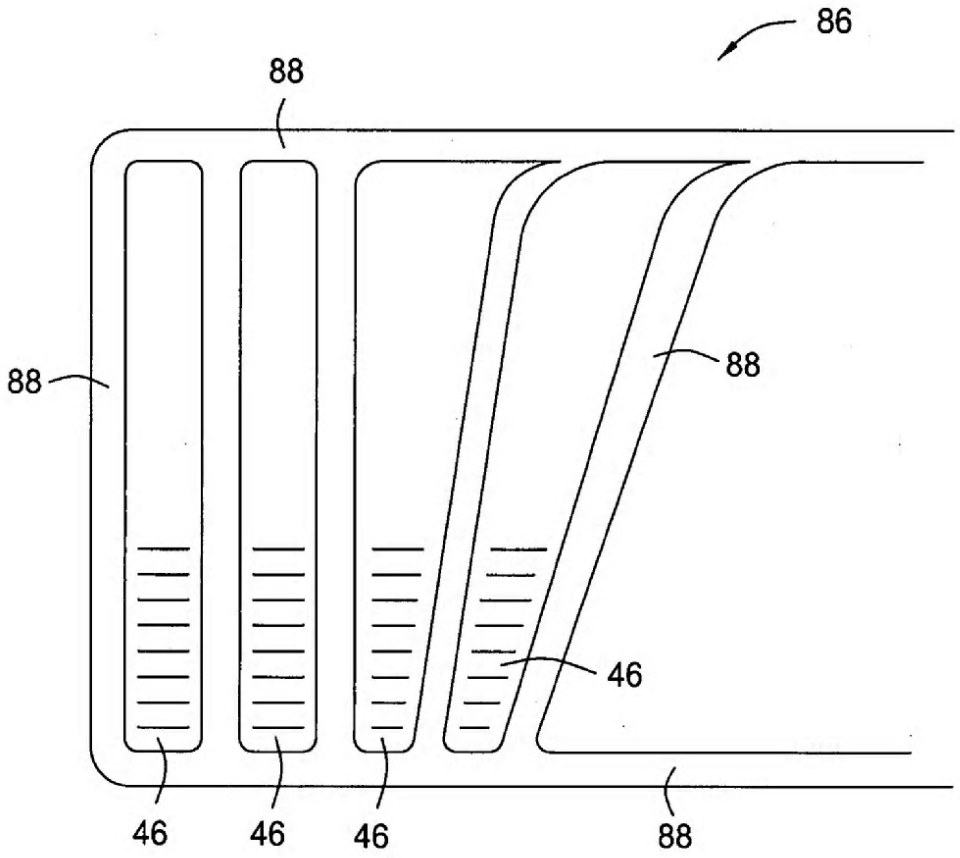


FIG. 13

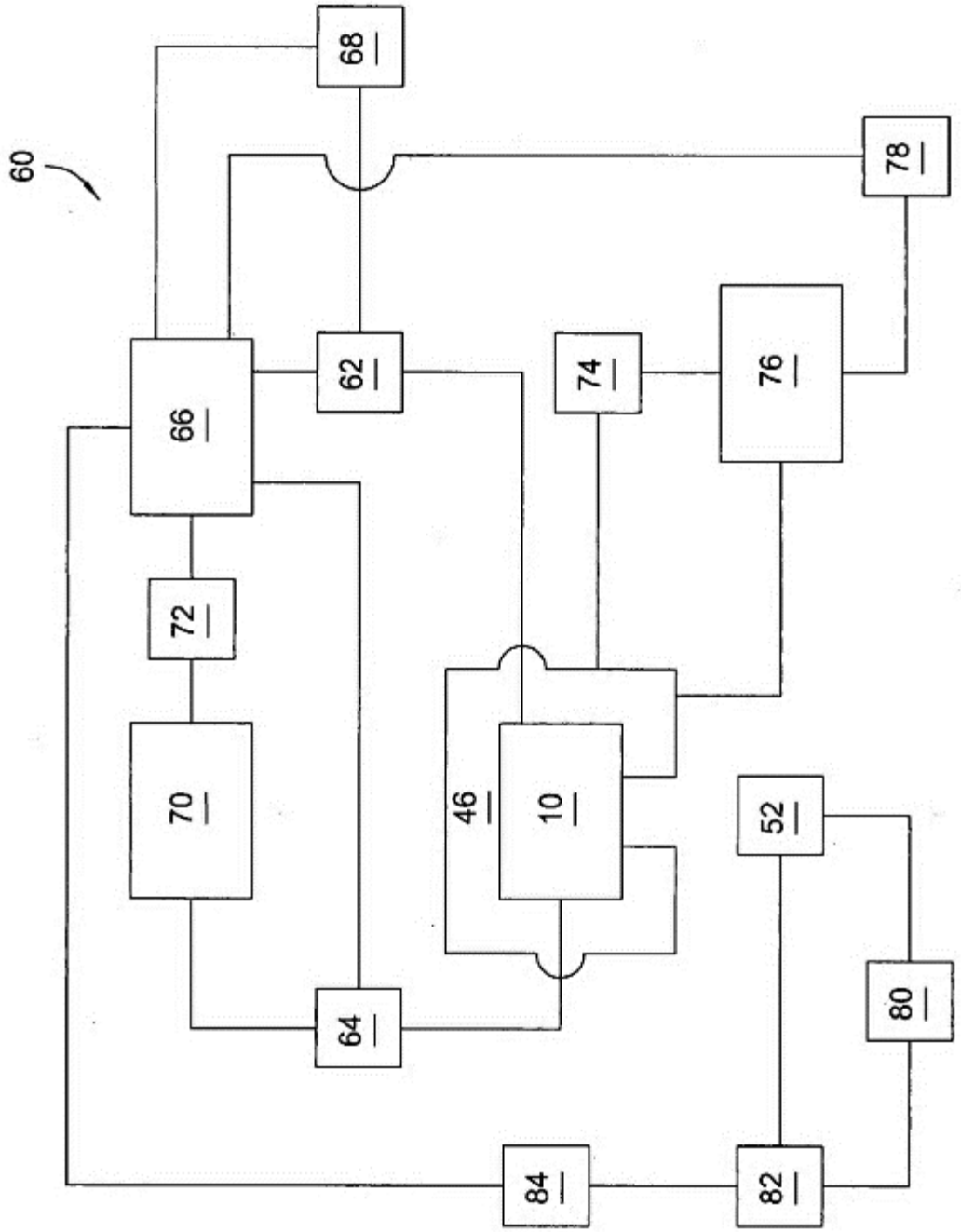


FIG. 12