

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 637 019**

51 Int. Cl.:

**G21B 1/23** (2006.01)

**G21B 3/00** (2006.01)

**G21B 1/03** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.05.2007 PCT/US2007/069972**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.03.2008 WO08033587**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.05.2007 E 07853488 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.05.2017 EP 2033197**

54 Título: **Procedimiento y sistema para reacciones de fusión por confinamiento inercial**

30 Prioridad:

**30.05.2006 US 809453 P**  
**29.05.2007 US 754928**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**10.10.2017**

73 Titular/es:

**ADVANCED FUSION SYSTEMS LLC (100.0%)**  
**11 Edmond Road**  
**Newtown, CT 06470, US**

72 Inventor/es:

**BIRNBACH, CURTIS A.**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 637 019 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Procedimiento y sistema para reacciones de fusión por confinamiento inercial

Esta solicitud reivindica la prioridad de la Solicitud de Patente Provisional de Estados Unidos 60/809.453 titulada "Method & Apparatus for Controlled Fusion Reactions" presentada el 30 de mayo de 2006.

**5 Campo de la invención**

La presente invención se refiere a procedimientos y sistemas para extraer energía a partir de reacciones de fusión.

**Antecedentes de la invención**

Es ampliamente reconocido que la fusión controlada ofrece una fuente de energía limpia y abundante.

10 Sin embargo, a pesar de los miles de millones de dólares invertidos, se ha logrado solamente un éxito limitado en la creación de una reacción de fusión eficiente y autosostenible. Todos los enfoques previos han estado limitados por tres factores principales:

(a) Se usa solamente un único medio de extracción de energía.

15 (b) En lugar de centrarse en las reacciones accionadas por rayos X de accionamiento directo, la mayor parte del trabajo se ha centrado en las reacciones de accionamiento indirecto, particularmente usando láseres grandes como accionadores.

(c) La inestabilidad hidrodinámica es un problema grave. Esto se produce cuando la compresión del gránulo objetivo no es suficientemente uniforme. Da lugar a una falta de uniformidad térmica local que, a su vez, ocasiona el enfriamiento local. Esto da como resultado una combustión asimétrica del combustible.

20 Puede extraerse energía a partir de una reacción de fusión por dos medios principales: Térmico y eléctrico. La extracción térmica es una aplicación directa del ciclo térmico Rankine, que se usa en casi todas las centrales eléctricas. En este proceso, se calienta un refrigerante, el refrigerante calentado usado para hacer girar una turbina, y la turbina usada para hacer girar un generador. Este proceso tiene una eficiencia nominal del 55%.

25 Es posible y práctico extraer electricidad directamente del plasma de fusión. Esto se ha demostrado muchas veces y es un proceso con una eficiencia de aproximadamente el 85%. La desventaja de esta técnica para los sistemas de energía por fusión de la técnica anterior es que produce CC de alta tensión. Es difícil trabajar con la CC de alta tensión y, lo que es más importante, no es adecuada para la transmisión y distribución de energía a larga distancia. No puede conmutarse fácil o eficientemente en la tensión como puede la energía de CA.

30 La inestabilidad hidrodinámica es un problema importante al que se enfrenta el diseñador de cada sistema de energía por fusión. Formalmente conocido como inestabilidad de Rayleigh-Taylor, es un problema que surge de la compresión no uniforme del gránulo de combustible. Las faltas de uniformidad excesivas del 1% en compresión dan como resultado la formación de "chorros" de energía que salen hacia afuera y enfrían localmente el gránulo objetivo. La generación actual de sistemas de fusión accionados por láser usa múltiples haces (hasta 192 en un sistema) para intentar proporcionar una compresión suficientemente uniforme del gránulo de combustible.

35 Sería deseable proporcionar un sistema para extraer energía a partir de reacciones de fusión controladas en las cuales se extraigan energía térmica y energía de CC de alta tensión.

Sería deseable que se extrajera energía de CC de alta tensión como fuente de energía para sostener reacciones de fusión controladas.

40 Sería además deseable diseñar un sistema para extraer energía a partir de reacciones de fusión controladas por la forma, con una alta estabilidad hidrodinámica para conseguir una compresión altamente uniforme de gránulos de combustible.

En el documento de patente US3489645 A, que describe un sistema para aplicar impulsos de radiación óptica a un material objetivo de fusión por confinamiento inercial, se divulgó un intento en la técnica anterior para conseguir una reacción de fusión por transferencia inercial.

**Sumario de la invención**

45 Un modo de realización de la invención proporciona un sistema para extraer energía a partir de reacciones de fusión controladas. El sistema incluye una cámara objetivo central para recibir material objetivo de fusión. Una pluralidad de accionadores de energía están dispuestos alrededor de la cámara objetivo para suministrar energía al material objetivo de fusión en la cámara para iniciar una reacción de fusión controlada del material, liberando energía en las formas de plasma de fusión y calor. Se proporciona una pluralidad de medios para extraer energía de la reacción de

fusión y comprenden medios para extraer energía de CC de alta tensión del plasma de fusión; y medios para extraer energía térmica de la cámara objetivo central.

El modo de realización anterior aumenta la eficiencia de un sistema de energía de fusión extrayendo tanto la energía de CC de alta tensión como la energía térmica.

5 Otro modo de realización de la invención proporciona un sistema para extraer energía a partir de reacciones de fusión controladas en el que la pluralidad de accionadores de energía se alimentan por un medio de almacenamiento de energía. Los medios de almacenamiento de energía reciben energía desde una primera fuente de alimentación y proporcionan energía de arranque y supletoria y una segunda fuente de alimentación obtiene energía a partir de la energía de CC de alta tensión extraída del plasma de fusión. La "energía de arranque" es la energía total requerida para iniciar la reacción de fusión y la "energía supletoria" es la energía que se añade a la energía de la segunda fuente de alimentación para mantener el funcionamiento de la reacción de fusión.

10 El modo de realización anterior consigue una alta eficiencia usando la energía de CC de alta tensión extraída a partir de la reacción de fusión como fuente de energía para los accionadores de energía que accionan las reacciones de fusión. Esto significa que la mayor parte de la energía requerida para accionar la reacción de fusión se obtiene a partir de la propia reacción (previa) de fusión.

15 Un modo de realización adicional de la invención proporciona un sistema para extraer energía de reacciones de fusión controladas en las cuales cada uno de la pluralidad de accionadores de energía comprende un aparato unitario. El aparato unitario produce tanto (a) un impulso de rayos X para hacer que el material objetivo de fusión experimente una reacción de fusión controlada a fin de ocasionar la liberación de energía en las formas de plasma de fusión y calor y (b) energía RF para calentar de forma simultánea el material objetivo de fusión.

20 El modo de realización anterior de la invención tiene la capacidad de producir un impulso de calentamiento RF de forma simultánea con el impulso de accionamiento de rayos X sin reducir la eficiencia. Esto permite el uso del calentamiento RF para aumentar la eficiencia del sistema de energía de fusión con poco coste adicional y sin ninguna penalización de energía.

25 Un modo de realización adicional de la invención proporciona un sistema de energía de fusión en el cual una estructura de apodización está asociada con cada accionador de energía para reconformar el frente de onda del impulso de rayos X para que sea cóncavo desde la perspectiva del material objetivo de fusión.

30 El modo de realización anterior de la invención corrige los errores de frente de onda que dan lugar a la inestabilidad hidrodinámica de Rayleigh-Taylor por medio del filtro de apodización mencionado. Como el gránulo objetivo es una esfera, el filtro de apodización se usa para cambiar la forma del frente de onda de compresión a una superficie altamente cóncava cuyo radio coincide con el radio del objetivo. Por este medio, el frente de onda "envuelve" una cara del objetivo y proporciona una compresión totalmente uniforme del objetivo.

35 Un beneficio directo del uso de filtros de apodización para corregir la onda de compresión es que se reduce el número de haces usados para iluminar el objetivo. En lugar de los 192 haces que usa el reactor de fusión del National Ignition Facility en el laboratorio Lawrence Livermore en California, el modo de realización actual de la invención puede permitir el uso de menos haces, tales como 6. Esto reduce directamente el coste y el tamaño del reactor, mientras aumenta su fiabilidad.

### Descripción de los dibujos

40 La FIG. 1 es una vista en perspectiva simplificada de un reactor para la generación de energía por fusión nuclear controlada.

Las FIGS. 2A y 2B muestran vistas en sección transversal del reactor de la FIG. 1, con la FIG. 2A mostrando la sección indicada como "FIG. 2A – FIG. 2A" en la FIG. 1 y la FIG. 2B mostrando la sección indicada como "FIG. 2B – FIG. 2B" en la FIG. 1.

45 La FIG. 3 es un diagrama de bloques del flujo de energía del sistema reactor de la FIG. 1, que muestra el reactor aún más simplificado que en la FIG. 1

Las FIGS. 4A y 4B son secciones transversales de extremo y laterales simplificadas, respectivamente, de un accionador básico de energía de emisor de rayos X estimulado (SXE).

La FIG. 5A es una vista en perspectiva de la red de coincidencia de rejilla y de fases usada con el SXE de las FIGS. 4A y 4B.

50 La FIG. 5B es una vista de la red de coincidencia de rejilla y de fases de la FIG. 5A que muestra la sección transversal indicada como " FIG. 5A – FIG. 5A "en esa figura.

La FIG. 5C es un diagrama esquemático de la red de coincidencia de fases de la FIG. 5A.

La **FIG. 6** es una vista en sección de un frente de onda plano que incide en un filtro de apodización y del frente de onda corregido producido por el paso a través del filtro.

La **FIG. 7** es una vista en perspectiva lateral de una versión mejorada de condensador del SXE de la **FIG. 4**.

La **FIG. 8** es una vista en sección a lo largo de la longitud de un transformador acoplado por electrones.

5 La **FIG. 9** muestra las formas de onda típicas del transformador acoplado por electrones de la **FIG. 8**.

La **FIG. 10** es una vista en sección a lo largo de la longitud de un accionador SXE-Vircator combinado.

La **FIG. 11** es una vista parcialmente en sección a lo largo de la longitud del cabezal RF Vircator de la **FIG. 10**.

La **FIG. 12** es una vista en sección a lo largo de la longitud de un accionador SXE-MILO combinado.

La **FIG. 13** es una vista parcialmente en sección a lo largo de la longitud del cabezal MILO RF de la **FIG. 12**.

10 La **FIG. 14** es una vista en sección a lo largo de la longitud de un tubo de deriva usado en el cabezal MILO RF de la **FIG. 12** y la **FIG. 14B** es una vista ampliada de la región rodeada en la **FIG. 14A** titulada "**FIG. 14B**".

### Descripción detallada de la invención

15 Una lista de números de referencia de dibujo, de sus partes asociadas y de materiales preferidos para las partes puede encontrarse casi al final de esta descripción de los modos de realización preferidos. Las referencias bibliográficas se citan en su totalidad después de la lista de números de referencia de dibujo. En esta descripción, las referencias breves de literatura para el autor " Nakai ", por ejemplo, se dan de la forma siguiente: (Referencia Nakai.)

Principios principales de los modos de realización preferidos

20 Los principios principales de los modos de realización preferidos de la invención se describen en conexión con las **FIGs. 1 - 3**.

La **FIG. 1** muestra un reactor para la generación de energía por fusión nuclear controlada. El sistema incluye una cámara o región central objetivo 10. Una serie de seis o más accionadores de energía 12 están dispuestos en pares simétricos alrededor de la región central objetivo. Los accionadores de energía simétricos 12 están dispuestos de manera simétrica alrededor de una ubicación de gránulo objetivo 22, a fin de crear de forma colectiva un frente de onda preferentemente altamente esférico que incida en el gránulo de fusión objetivo en la ubicación 22. Los accionadores de energía producen haces de rayos X de alta fluidez que comprimen de forma simétrica el destino para iniciar y sostener una reacción de fusión. Los accionadores de energía son preferentemente emisores de rayos X estimulados (SXE) como fueron descritos por primera vez por el inventor de la presente invención en la Patente de Estados Unidos 4.723.263. En el modo de realización preferido, los accionadores SXE mencionados están equipados con un medio de producción RF que proporciona un impulso simultáneo de energía RF para proporcionar calor adicional a la reacción. Esto se describe además en el análisis de las **FIGS. 10 - 13**.

35 Con referencia a las **FIGS. 1-3**, una pluralidad de conos de extracción de energía 14 está dispuesta alrededor de la región central objetivo 10. Cada uno de estos conos es una porción de un sistema de vacío. Cada uno de ellos contiene una rejilla de recogida de energía 46 que produce una salida de CC de alta tensión que se usa para accionar los accionadores de energía SXE 6. Los conos de extracción de energía 14 pueden estar formados en otras formas, tales como cilindros. Un análisis detallado de este proceso se encuentra en el análisis de la **FIG. 3** a continuación.

40 El sistema de las **FIGS. 1-3** contiene un segundo medio de extracción de energía que puede ser adecuadamente un bucle térmico de ciclo Rankine estándar. El refrigerante se introduce en un subsistema de intercambio de calor interno 24 por un tubo de entrada 18, se hace circular a través del intercambiador de calor 24 y luego se saca del reactor a través del tubo 20. El refrigerante calentado se usa para accionar una turbina que a su vez acciona un generador para producir electricidad. La mayor parte de esta electricidad está disponible para suministrar a redes de energía externas. Una pequeña porción se usa para proporcionar la llamada energía supletoria al sistema para compensar la pequeña ineficiencia de los conos de extracción de energía HVDC 14. Se usa un sistema de inyección de gránulos de combustible 16 para inyectar los gránulos objetivo de fusión en el reactor. En el sistema actual, el inyector de gránulos 16 está orientado verticalmente como se muestra en la **FIG. 2B**.

50 Las **FIGS. 2A-2B** muestran los componentes internos y externos principales y su relación geométrica. En la **FIG. 2A**, vemos una sección transversal del reactor. La disposición de los accionadores de energía 12 y de los conos de extractor de energía 14 es claramente visible. Son también visibles las estructuras internas de los reactores, que se muestran con detalle en la **FIG. 2B**. La pared de la cámara del reactor es la capa externa, mostrada en 10, que proporciona soporte estructural para las estructuras internas y también es el recinto de vacío. Aunque se representa como un objeto esférico, pueden emplearse con éxito otras formas. La forma de la cámara no tiene ningún impacto en la funcionalidad del sistema.

La capa interna siguiente consiste en bobinas de confinamiento magnético 30. Estas bobinas crean un campo magnético fuerte que confina el plasma de fusión y evita que entre en contacto con el revestimiento 28 y otras estructuras internas. El campo magnético producido por las bobinas de confinamiento magnético 30 tiene aberturas (regiones de campo bajas) que corresponden a las ubicaciones de los conos de extractor de energía y de los accionadores de energía SXE.

La capa interna siguiente es la capa de paso de refrigerante (intercambiador de calor) 24. El refrigerante entra en esta estructura a través de la entrada de refrigerante 18, circula a través de los pasos de refrigerante 24 y sale en un estado sobrecalentado a través de la salida de refrigerante 20. Este refrigerante sobrecalentado se usa para alimentar una turbina y un generador para producir electricidad. En esta vista, el inyector de gránulos 16 se ve en su orientación vertical apropiada.

**La FIG. 3** es un diagrama de bloques del flujo de energía del sistema reactor de la **FIG. 1**. Se muestran los dos bucles de extracción de energía. El bucle térmico consiste en la entrada de refrigerante térmico 18, la salida de refrigerante térmico 20 y la capa de paso de refrigerante (intercambiador de calor) 24. El funcionamiento de este bucle se describe anteriormente en el análisis de la **FIG. 2**. El bucle de extracción CC de alta tensión consiste en el cono de extractor 14, la rejilla de extractor 46, el retorno CC 48, los medios de almacenamiento y acondicionamiento de energía 38, el modulador de impulsos 34 y sus dos salidas sincronizadas (a) 36, el accionador de energía HVDC a SXE 12 y (b) 32, la señal de la unidad de confinamiento magnético. Fundamental para un modo de realización preferido de esta invención es el uso de CC de alta tensión extraída directamente para accionar los accionadores de energía SXE. El SXE se ejecuta en CC de alta tensión, por lo que es directamente compatible con la salida de CC directa de los conos de extractor de energía 14. La energía extraída se usa para recargar los medios de almacenamiento de energía 38. El sistema de almacenamiento de energía puede utilizar ya sea un medio de almacenamiento capacitivo o un medio de almacenamiento inductivo o ambos, a modo de ejemplo. El uso de almacenamiento capacitivo es el modo de realización preferido para esta porción del sistema. El subsistema de almacenamiento y acondicionamiento de energía 38 tiene una segunda entrada de energía 40 que permite que se aplique la energía de fuentes externas (por ejemplo, 42, 44) al sistema. La fuente externa 42 puede ser un transformador acoplado por electrones como se describe a continuación y la fuente externa 44 es una fuente de alimentación de CC de alta tensión. La energía de la segunda entrada de energía 40 se usa para el arranque del sistema y también para proporcionar energía supletoria durante el funcionamiento. Esto es para compensar las pérdidas de ineficiencia en el bucle de extracción de HVDC descrito.

**Las FIGS. 4A y 4B** son secciones transversales del accionador básico de energía SXE, que pueden usarse como accionadores de energía en la **FIG. 1**. **La FIG. 4A** es una vista posterior y la **FIG. 4B** es una vista lateral. En estas vistas son visibles un ánodo 64, una rejilla 66 y un cátodo 68. El SXE es un tubo de electrones de triodo. Tiene una estructura de cañón de electrones novedosa, comprendida por el cátodo 68 y la rejilla 66. La yuxtaposición física de estos elementos es de tal manera que forma una guía de ondas circular. Una guía de ondas circular soporta el modo electromagnético transversal (TEM) que se propaga siempre a la velocidad de la luz ("c") en el vacío. Esta propiedad es crítica para la función del SXE, ya que garantiza que el haz de electrones, como se muestra con flechas, barre el ánodo a la velocidad de la luz y que coinciden la velocidad de fase y la velocidad de grupo del frente de onda del modo TEM. Este frente de onda del modo TEM es conocido como la onda progresiva plegable. Esto es importante en el proceso de formación de rayos X porque garantiza que los rayos X formados por el haz están desplazándose siempre en una zona altamente ionizada y, por lo tanto, no se absorben mediante procesos de autoabsorción.

La estructura de rejilla (analizada con detalle en la **FIG. 5**) es altamente simétrica. Esto garantiza que el pliegue de la onda hacia el ánodo es perfectamente simétrico. Como resultado, cuando los electrones golpean el ánodo, crean una región altamente ionizada de radiación de frenado. Existe también un gran número de electrones secundarios presentes en esta región altamente ionizada. El ánodo se llena de un material láser. Los fotones de radiación de frenado golpean los átomos del material láser y, como resultado de que están en una energía significativamente más alta que el potencial de ionización de capa K del átomo, ionizan por completo el átomo. La cascada de repoblación resultante ocasiona la liberación de fotones de cada capa de electrones del átomo. El excedente de electrones garantiza que este proceso se produce muy rápidamente. Sigue una reacción en cascada. La radiación es, al principio, isotrópica. Pero, a medida que avanza a lo largo de la longitud del ánodo, la radiación fuera del eje se suprime mediante la pared de la residencia o se usa para ionizar otros átomos. Todo esto tiene lugar en la zona ionizada que barre a lo largo del ánodo en "c" (en un vacío). El haz resultante está colimado de forma geométrica por el ánodo y consiste principalmente en fotones de capa K, fotones de capa L y fotones de capa M cuando están presentes.

Con referencia ahora a las **FIGS. 5A, 5B y 5C**, estas figuras muestran detalles de la red de coincidencia de rejilla y fases del SXE de las **FIGS. 4A y 4B**. **La FIG. 5A** muestra toda la red – de coincidencia de rejilla y fases y los detalles del aislamiento de rejilla. Estos dos elementos son realmente parte de una única estructura. **La FIG. 5B** muestra detalles de un medio de tensionado y aislamiento de rejilla preferido. **La FIG. 5C** muestra el esquema eléctrico de la red de coincidencia de fases. Comunes a todos los tubos con cañones de electrones de ondas progresivas (TWEG) son los requisitos de diseño para la rejilla. Independientemente de la escala o del nivel de energía para el que se diseñe el tubo, las características siguientes son comunes y deben estar presentes para que funcione el cañón de electrones de onda progresiva.

5 El cañón de electrones de onda progresiva (TWEG) es una estructura única en la que usa la estrecha yuxtaposición de la rejilla 66 y del cátodo 68 para producir una estructura de guía de ondas circular que soporte un modo electromagnético transversal (TEM). El modo electromagnético transversal en una guía de onda circular se desplaza siempre a la velocidad de la luz ("c") en el vacío. Este aspecto del TWEG explica su tiempo de subida extremadamente rápido (un nanosegundo para cada pie o 30,48 cm de longitud de cañón).

La rejilla se usa también para producir el campo eléctrico necesario para extraer electrones del cátodo y para controlar el flujo de dichos electrones. Esto se logra inclinando de forma selectiva la rejilla en relación con el cátodo. Tanto las funciones de conmutación como las de modulación pueden alcanzarse mediante una polarización apropiada del tubo.

10 Existen varias condiciones críticas que deben cumplirse cuando se diseñe una rejilla para una estructura TWEG. Son:

(1) La separación entre la rejilla y el cátodo debe ser constante a través de la longitud de la rejilla. Esto se consigue usualmente colocando la rejilla bajo alta tensión o construyéndola con una estructura rígida

15 (2) El número de elementos en la rejilla debe ser lo suficientemente alto como para garantizar un campo eléctrico constante y uniforme en la región entre la rejilla y el cátodo.

(3) No deben existir bordes afilados ni rebabas en ninguna parte de la estructura de rejilla. Los elementos individuales pueden ser formas elípticas redondas, planas o de alta relación de aspecto. Todos los bordes deben estar completamente redondeados. En este contexto, completamente redondeado significa que el borde tiene un radio igual a la mitad del grosor del material; un ejemplo de completamente redondeado aparece en 125 en la FIG. 14.

20 La implementación real de estas reglas de diseño está determinada por el tamaño de la rejilla que esté construyéndose. La rejilla puede estar hecha de una sola pieza o, más comúnmente, de una serie de elementos individuales limitados por anillos de montaje en cualquiera de los extremos 130, 132, provistos de aislantes eléctricos 136, 140 adecuados para impedir el arco y un medio para mantener la tensión sobre la estructura de rejilla. En el modo de realización preferido mostrado, cada elemento de rejilla está provisto de un medio de tensionado en forma de un resorte pesado 146, de una arandela 148 y de una tuerca 150. Las tuercas de los diversos elementos de rejilla se aprietan con una llave de par para garantizar la tensión uniforme en todos los elementos.

25 La conexión eléctrica a la rejilla se realiza por medio de una red de coincidencia de fases 134, 136 que está conectada al extremo de entrada de la rejilla. La red de coincidencia de fases consiste en una serie de cables 134 de longitud exactamente igual, con una tolerancia típica de +/- 0,0005 "(+/- 12 micras). Cada cable de la red de coincidencia de fases está conectado al anillo de soporte de rejilla inferior 132 en un punto equidistante de los dos elementos de rejilla adyacentes. Existe una pluralidad de cables de red de coincidencia de fases dispuestos de forma simétrica alrededor del anillo de soporte de rejilla.

30 Los otros extremos de los cables de red de coincidencia de fases están conectados a un elemento conector común 136. Tiene un número de orificios en un extremo igual al número de cables de red de coincidencia de fases y un único orificio en el extremo opuesto. Un cable se conecta a este orificio y se hace pasar hasta el alimentador de vacío de rejilla. Los cables se sueldan con plata o se sueldan con el procedimiento de tungsteno en gas inerte (TIG) según sea apropiado. La soldadura TIG se prefiere pero no siempre es posible.

35 El propósito de esta red de coincidencia de fases es garantizar que toda la base de la rejilla responda a la señal de control en el mismo momento con una precisión que esté preferentemente en el intervalo de picosegundos. Esto da como resultado una onda altamente simétrica que se propaga en la estructura TWEG. Cuando la rejilla se conecta a tierra a través de la red de coincidencia de fases, se forma una onda de progresiva plegable radialmente simétrica y se propaga a lo largo de la longitud de la estructura TWEG. Esta es una onda de potencial de tierra y tiene el efecto de permitir que la energía almacenada en el espacio entre la rejilla y el cátodo y también la energía disponible para que el cátodo se propague hacia el ánodo dando como resultado la conducción de esta señal.

Inestabilidad hidrodinámica: Causas y reparación

40 La FIG. 6 muestra el principio de funcionamiento del filtro apodizante, con el movimiento de frente de onda mostrado con flechas. El rendimiento óptimo de cualquier sistema de fusión depende de la creación de una compresión perfectamente simétrica del gránulo objetivo de combustible. Los accionadores de energía 12 (FIG. 1) de la presente invención proporcionan un medio de iluminación simétrica del objetivo. Si se dan a los frentes de onda 60 que inciden en el destino una geometría cóncava cuyo radio coincida con el radio del gránulo objetivo, entonces es posible crear un frente de onda de compresión casi perfectamente simétrico en el gránulo objetivo de combustible. La razón por la que esto es necesario es minimizar la inestabilidad de Rayleigh-Taylor que, si es suficientemente severa, puede hacer que el gránulo de combustible se caliente de una manera no uniforme y, por lo tanto, no se encienda en una reacción de fusión. Si es necesario, pueden añadirse accionadores de energía adicionales 12 en pares simétricos para aumentar la uniformidad de los frentes de onda de compresión. Las consideraciones

geométricas determinan el número de accionadores que se añaden. Si seis pilotos no son suficientes, la etapa siguiente sería preferentemente 12 accionadores, seguidos por 14 accionadores, seguidos preferentemente por 20 pilotos. Otros números de accionadores de energía son posibles.

5 El filtro de apodización 58 de la **FIG. 6** consiste en un objeto de grosor variable que se coloca en la trayectoria del haz. La sección transversal se hace coincidir en grosor con el radio del objetivo. En el modo de realización preferido, estos filtros están hechos de materiales de película delgada que se depositan para crear la sección transversal deseada. La selección del material se determina mediante el requisito de accionamiento de energía de la combinación de combustible por fusión. En el caso de la reacción Deuterio-Tritio, esto es entre 250 y 350 voltios de electrones, entonces se usarían los materiales con un número atómico muy bajo tal como litio, berilio, boro o carbono. Reacciones de energía más altas como hidrógeno-boro usarían estos materiales o, posiblemente, magnesio, aluminio o silicio. Es importante que el número atómico del material de densidad no sea tan alto que se produzca una absorción significativa. Se observa que el filtro de apodización producirá alguna radiación de dispersión pero que no sea un problema en la presente invención.

15 Fundamental para el proceso de las reacciones de fusión es la minimización de las inestabilidades de Rayleigh-Taylor (RTI) que se produce durante la compresión del material objetivo de fusión. Para las geometrías de objetivo esféricas, el frente de onda de compresión ideal es una onda esférica concéntrica que se reduce en diámetro con una simetría perfecta. En los equipos prácticos para las reacciones de fusión controladas, esto es extremadamente difícil de conseguir.

20 Es importante señalar que las técnicas ópticas difractivas en forma de elementos tales como placas de zona pueden usarse también para corregir el frente de onda. Las placas de zona son bien conocidas en ciencias ópticas. La extensión a la porción de rayos X blanda del espectro es simple y ya se ha presentado en la bibliografía.

Comparación de la fusión de accionamiento directo de rayos X con la fusión por confinamiento inercial de láser

25 El desafío que enfrenta a los diseñadores de reactores de fusión es cómo lograr una compresión simétrica similar del objetivo de fusión. Una amplia gama de soluciones ha producido numerosas geometrías de reactores. El presente análisis se enfoca en el caso específico de sistemas que usan gránulos de combustible como material objetivo de fusión. Esta clase de sistemas es conocido como sistemas de confinamiento inercial ("ICF"). Común a todos los sistemas ICF es tener la energía del accionador presentada al objetivo como una serie colectiva de haces de energía síncronos combinados. Los frentes de onda síncronos combinados de los haces de energía se aproximan a una capa esférica plegable. En general, cuanto más haces se usen, mejor (o más esférico) es el confinamiento. Esto puede apreciarse con mayor claridad en el área de fusión accionada con láser donde los sistemas más exitosos tienen el mayor número de haces. Los sistemas como el láser NOVA tienen más de 50 haces. El National Ignition Facility (NIF) en el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) tiene 192 haces síncronos y se espera que tenga un confinamiento significativamente mejor que los sistemas predecesores como NOVA (LLNL), OMEGA (LLNL) y GEKKO (Japón).

35 Los principios básicos de ICF descritos a continuación son:

- (1) Tiempos de confinamiento,
- (2) fracciones de combustiones y
- (3) la necesidad de implosión de compresión objetivo.

40 El proceso de implosión de un objetivo típico de ICF de accionamiento directo está dividido aproximadamente en tres fases: fase inicial, fase de aceleración y fase de deceleración. (La invención reivindicada actualmente usa un sistema de accionamiento directo.) En la fase inicial, la primera onda de choque se desplaza en un gránulo de combustible y el fluido en el gránulo se hace acelerar principalmente por la onda de choque. La capa externa (o ablativa) se acelera de forma ablativa hacia el interior en la segunda fase. Entonces, el combustible se comprime fuertemente en la fase de deceleración. En la fase inicial, las perturbaciones en la superficie objetivo se siembran por impresión inicial debido a la falta de uniformidad de la irradiación láser, junto con la rugosidad de la superficie objetivo original. Estas perturbaciones se acompañan de una propagación de choque ondulada antes de que el choque se rompa en la superficie interna del gránulo de combustible y se acompaña además de una propagación de rarefacción ondulada. Las perturbaciones crecidas en la superficie externa debido principalmente a la inestabilidad R-T en la segunda fase (aceleración) se alimentan entonces a través de la superficie interna. (Referencia Nakai.)

50 En la instalación NIF mencionada, 192 rayos láser se usan para producir 1,8 megajulios de energía y consumir 500 teravatios de energía, de los cuales 30 kilojulios se transfieren finalmente como rayos X en el combustible de deuterio-tritio en el gránulo de combustible objetivo. Con la ignición y la combustión exitosa, el combustible puede producir unas 600 a 1000 veces más energía que la que se pone en el mismo. Esto produce un flujo intenso de rayos X de casi 1000 teravatios por centímetro cuadrado.

55 El gran número de haces en la instalación NIF permitirá que la iluminación láser se aproxime más a un campo uniforme de rayos X que lo que lo hizo la instalación NOVA mencionada. Sin embargo, una asimetría básica seguirá

5 existiendo debido a los puntos calientes calentados directamente por los rayos láser y los puntos fríos donde el calor se pierde a través de los orificios láser. Debido a que la ignición depende de la iluminación lisa de rayos X del gránulo, los diseñadores objetivo pretenden reducir las asimetrías en el flujo de rayos X a menos del 1 por ciento ubicando apropiadamente los puntos calientes calentados por láser, ajustando la longitud exacta de la cavidad que contenga el gránulo y modificando las intensidades del impulso láser. Las cavidades se usan con sistemas de accionamiento indirecto, en contraste con el sistema de accionamiento directo de rayos X reivindicado actualmente.

10 El mecanismo del ICF accionado por láser se basa en la luz que esté absorbiéndose en las paredes del cilindro de cavidad, que convierte la luz láser en rayos X blandos. La cavidad está hecha de un material de alto número atómico como el oro, que maximiza la producción de rayos X. Estos rayos X se absorben y vuelven a emitirse rápidamente por las paredes que fijan una onda térmica accionada por radiación que se difunde en las paredes de la cavidad. La mayoría de los rayos X se pierden finalmente en las paredes, algunos escapan por los orificios de entrada del láser y el resto se absorben por el gránulo objetivo en el centro de las cavidades y accionan su implosión. Típicamente, este acoplamiento al gránulo es menor que un  $\frac{1}{2}$  de la energía total, o aproximadamente 0,2 para una cavidad calentada por láser de escala de central. Por lo tanto, el acoplamiento para el accionamiento indirecto es relativamente pobre en comparación con el accionamiento directo. (Referencia Rosen.)

15 El accionamiento indirecto es menos eficiente al acoplar energía a un gránulo que el accionamiento directo debido a la conversión a rayos X en la cavidad. Sin embargo, el accionamiento indirecto es menos sensible a las variaciones en la intensidad del haz y en las inestabilidades hidrodinámicas. El umbral de ignición para los destinos accionados directamente y accionados indirectamente es aproximadamente el mismo. Sin embargo, la ganancia se calcula para ser aproximadamente un factor 2 mayor en destinos accionados directamente.

20 La elección de la temperatura de los rayos X es crucial porque dicta el material que forma la capa de ablación externa del gránulo, clave para la implosión y las reacciones de ignición posteriores. Si esta capa es suficientemente lisa y está bañada de forma uniforme de rayos X, su ablación forzará de forma eficiente el gránulo hacia adentro a una velocidad de aproximadamente 400 kilómetros por segundo (más de una milésima de la velocidad de la luz) y creará la presión y temperatura requeridas para la fusión para comenzar. (Referencia Haan.)

25 Una de las cuestiones clave para minimizar las inestabilidades de Rayleigh-Taylor se refiere al flujo de rayos X que interactúa con la superficie de ablación. En flujos más altos, la ablación del material también elimina las perturbaciones crecientes. Las perturbaciones iniciales se minimizan también haciendo las capas de gránulos lo más lisas posible. La inestabilidad entre el láser y plasma y las inestabilidades hidrodinámicas son amenazas complementarias para la ignición y los objetivos están diseñados intencionadamente de modo que las dos amenazas son aproximadamente equilibradas. Las temperaturas más altas que requieren mayores intensidades de láser empeoran las inestabilidades entre el láser y el plasma, pero minimizan las inestabilidades hidrodinámicas. A su vez, las bajas temperaturas minimizan las inestabilidades entre el láser y el plasma, pero aumentan las inestabilidades hidrodinámicas. Como resultado, los diseñadores han llegado a límites de temperatura de rayos X bajos y altos, aproximadamente 250 voltios de electrones y 350 voltios de electrones para el caso específico de combustible de deuterio-tritio, más allá de los cuales son difíciles de conseguir la implosión y la ignición eficaces. Otros combustibles tienen requerimientos energéticos más altos.

30 La diferencia fundamental entre la dinámica de las implosiones accionadas directamente por los láseres y las accionadas por los rayos X es que los láseres se absorben a una densidad electrónica relativamente baja,  $n$ , correspondiente a la densidad de electrones críticos para la longitud de onda de ese láser, mientras que los rayos X se absorben más profundamente en el objetivo a densidades de material sólido, que, cuando se ionizan mediante el flujo de rayos X, están a densidades electrónicas muy elevadas. Por lo tanto, incluso aunque el láser esté a 1/3 mm de luz, la región típica de absorción de rayos X tiene densidades electrónicas casi 100 veces mayores.

35 Para conseguir las condiciones bajo las cuales el confinamiento inercial es suficiente para conseguir la combustión termonuclear, un gránulo de combustible implosionado se comprime a condiciones de alta densidad y temperatura. En el laboratorio, se requiere que un accionador transmita energía al gránulo para efectuar una implosión. Existen tres accionadores que están teniéndose en cuenta para el ICF en el laboratorio:

- (1) Láseres de alta potencia,
- (2) iones pesados acelerados y
- 50 (3) rayos X resultantes de máquinas de energía pulsada.

Definimos la velocidad de ablación mediante  $v_{abl} \approx 5 \text{ dm/s}$ . Esperamos una diferencia de orden de magnitud completa en  $v_{abl}$ , entre el accionamiento directo y el indirecto. El accionamiento directo, en virtud de su mejor acoplamiento general [ $\tau$  del orden de (0,8)(0,1) = 8% frente al accionamiento indirecto (0,2) (0,2) = 4%] tiene ventajas sobre el accionamiento indirecto, ambos en términos de ganancia y en términos de un accionador más pequeño, pero se desafía por la inestabilidad RT. (Referencia Barnes.)

55 Las presiones,  $P$ , escalarán como  $nT\alpha n^{1/3} P^{2/3}$ . Mediante este escalamiento, esperaríamos un factor de diferencia 5 de presiones entre el accionamiento directo e indirecto, y de hecho a flujos de energía iguales de  $1015 \text{ W/cm}^2$ , la luz

láser de 1/3 mm tiene una presión de aproximadamente 90 MB, mientras que los rayos X producen una presión de región de ablación de aproximadamente 400 MB. La mayor presión alcanzable con el accionamiento de rayos X directo acoplado con la eficacia de acoplamiento más alta lo hace un candidato más deseable. Una de las razones de que la unidad de rayos X directa no se haya elegido para los experimentos a gran escala hasta la fecha ha sido la falta de disponibilidad de los accionadores adecuados.

Con el fin de lograr las condiciones para el ICF, los destinos tienen una capa esférica llena de una mezcla equimolar de baja densidad ( $<1 \text{ mg/cm}^3$ ) de gas de deuterio y tritio (DT). La capa esférica consiste en un ablador externo y en una región interna de DT congelado o líquido. La energía del accionador se entrega al ablador que se calienta y se expande. A medida que el ablador se expande, el resto de la capa se empuja hacia adentro para conservar el impulso. El gránulo se comporta como un cohete esférico accionado por ablación. A medida que el gránulo implosiona, la onda de compresión calienta la región central. La conducción de electrones y las pérdidas radiactivas actúan para enfriar la región central. Se requieren relaciones de convergencia de combustible de 30-40:1 y una temperatura de combustible central de 10 KeV para que la deposición de partículas  $\alpha$  desde la combustión termonuclear de DT pueda superar las pérdidas de conducción y radiactivas y puede generarse una onda de combustión autónoma.

Una implosión asimétrica convertirá menos de la energía disponible en compresión. Suponiendo que la energía disponible es de tal manera que una variación del 25% de simetría es tolerable en la compresión máxima del combustible, entonces la variación de simetría de menos del 1% es aceptable en el gránulo precomprimido. (Referencia Barnes.)

El análisis anterior explica la dinámica de la física de implosión objetivo, las eficiencias relativas y las compensaciones de los sistemas de accionamiento directo e indirecto y el impacto de la inestabilidad hidrodinámica de Rayleigh-Taylor (RTI). El trabajo previo se ha centrado en mejorar la uniformidad de la iluminación láser para minimizar los efectos de la RTI. Observamos que, una vez que el gránulo de combustible está encendido, no existe ninguna diferencia entre los sistemas de fusión de accionamiento directo e indirecto.

Puesto que los láseres son la fuente de accionamiento de alta energía más frecuente, han sido el foco de la mayor parte de la investigación. Se han utilizado haces de iones pesados, pero estos sistemas tienden a ser menos eficientes que los sistemas de accionamiento por láser. Un pequeño porcentaje del trabajo se ha hecho usando la unidad de rayos X directa. Esto se ha hecho principalmente con una pinza Z o con accionadores de enfoque de plasma. Ninguno de estos sistemas ha demostrado la fiabilidad o la eficacia de los procesos de fusión de rayos X de accionamiento directo práctico.

El emisor de rayos X estimulado (SXE) de la Patente de Estados Unidos 4.723.263 es únicamente adecuado para resolver tanto los problemas del accionador como los de la RTI. Este sistema escala de forma eficiente a los tamaños necesarios para accionar las reacciones de fusión. Si tenemos en cuenta que el valor NIF de 30 kilojulios de flujo de rayos X es necesario para accionar una reacción de fusión, podemos escalar un sistema SXE en consecuencia.

Si usamos 6 accionadores, entonces cada accionador necesita solamente producir 5 kilojulios. Doce accionadores escalan a 2,5 kilojulios y 20 conductores escalan a 1.5 kilojulios. A continuación se muestra lo que es necesario para producir un accionador SXE de 2,5 kilojulios (por ejemplo).

Las primeras investigaciones con el SXE mostraron que tiene una eficiencia de conversión del 10%. Por lo tanto, para lograr la salida de 2,5 kilojulios, es necesaria la entrada de CC de 25 kilojulios por accionador. Asumiendo que hacemos funcionar un SXE de un pie (30,48 cm) de diámetro a 500KV, obtenemos aproximadamente 3,5 kilojulios por pie lineal de accionador. Suponiendo además que queremos un impulso de rayos X de 20 nanosegundos; esto significa que sería necesario un SXE de 20 pies de largo (6,1 metros de longitud). Un SXE de 20 pies (6,1 metros) sería por lo tanto capaz de 7 kilojulios de salida de rayos X. Así que este accionador podría usarse en una configuración de 6 accionadores. El uso de accionadores de 20 pies produce una "huella" compacta de sistema de 3600 pies cuadrados (335 metros cuadrados) y ocupa un cubo de 60 pies a un lado (216.000 pies cúbicos o 6.116 metros cúbicos). Dicho sistema es suficientemente compacto para usarse en aplicaciones marítimas, tales como en portaaviones y otros buques navales importantes o en centrales eléctricas flotantes especializadas.

Esto es muy atractivo, excepto cuando se tiene en cuenta la cuestión RTI. El SXE produce un frente de onda nominalmente plano en su impulso de salida. En una configuración de 6 accionadores, está claro que la RTI impediría probablemente que se produzca una reacción satisfactoria.

Si, sin embargo, estamos dispuestos a aceptar una pequeña pérdida de eficacia, es posible introducir un filtro de apodización en el haz de rayos X, como se ha analizado anteriormente en conexión con la **FIG. 6**. Como se usa en el presente documento, "un filtro de apodización" significa que un elemento cuasióptico tiene un perfil de transmisión que es más denso en el centro que en los bordes, con una función de atenuación controlada desde el borde hasta el centro hasta el borde. Este sería el equivalente de rayos X de los filtros de apodización que se usan de forma rutinaria con láseres de banda óptica para controlar la forma de frente de onda. El filtro para el SXE se construiría para producir un frente de onda cóncavo. El montaje simétrico de los frentes de onda cóncavos sería altamente

beneficioso para suprimir la RTI aumentando la uniformidad del frente de onda de compresión. El uso de más de 6 accionadores, en configuraciones tales como 12, 14, 20 o más accionadores ofrece el potencial para una mayor uniformidad del frente de onda de compresión. La ventaja de usar un filtro de apodización es minimizar el número de accionadores necesarios, lo cual reduce el coste total y la complejidad del sistema y aumenta la fiabilidad del sistema.

Este concepto puede extenderse también hacia los sistemas de fusión de accionamiento óptico. Sin embargo, dadas las ventajas del accionamiento directo de rayos X, particularmente cuando uno tiene en cuenta el grupo de reacción rápida de procesos, el uso en sistemas de accionamiento ópticos, mientras que algunos mejoran el rendimiento, se niega por las ventajas del accionador de rayos X.

Aunque el uso de un objeto de densidad variable como un filtro de apodización se considera como el modo de realización preferido, se observa que es posible usar técnicas ópticas difractivas para construir un filtro de apodización para la banda de rayos X blanda. Una forma típica de óptica difractiva es la placa de zona. Este dispositivo usa zonas de Fresnel para modificar el frente de onda. Dicho filtro de difracción es actualmente más difícil de fabricar que un filtro de apodización de tipo de densidad variable.

Mejora del almacenamiento de energía del SXE

La FIG. 7 muestra una vista proyectada del accionador SXE mejorado con un condensador de almacenamiento de energía 70 integrado directamente en su estructura. Uno de los problemas más difíciles asociados con las reacciones de fusión controladas es conseguir una cantidad suficiente de energía en la reacción en un período de tiempo muy corto. Es necesario suministrar energía del orden de 30 kilojulios de rayos X en el objetivo en unos pocos nanosegundos. Dado que la electricidad se desplaza a la velocidad de la luz o cerca de ella, lo que equivale a aproximadamente un pie (30,48 cm) por nanosegundo y el tiempo disponible para hacerlo es de solamente unos pocos nanosegundos, resulta evidente que los medios de almacenamiento de energía deben estar próximos a los medios de suministro de energía.

Este problema se aborda en el diseño del accionador SXE 12 de la FIG. 4 añadiendo un condensador coaxial a la superficie externa del SXE, como se muestra en la FIG. 7. La superficie externa del SXE es la superficie exterior del cátodo 68, por lo que ofrece un medio muy amplio de conexión de inductancia baja. Toda la superficie interna del condensador está unida en contacto eléctrico íntimo al cátodo. El condensador se enrolla entonces alrededor del accionador SXE hasta que tiene un diámetro adecuado para proporcionar la capacitancia requerida para almacenar la energía necesaria para la reacción.

Debería observarse que el espacio interelectrodos de rejilla de cátodo – es un condensador por sí mismo y almacena una cantidad considerable de energía. Una estructura de diámetro de tres pulgadas (75 mm) almacena aproximadamente 200 picofaradios por pie (30,48 cm). Un dispositivo de diámetro de dos pies (61 cm) almacenaría 1,6 nanofaradios por pie (30,48 cm) si funcionara a 500.000 voltios y almacenaría aproximadamente 4 kilojulios en el espacio intraelectrodos de rejilla de cátodo –. Por lo tanto, el condensador coaxial tendría solamente que añadir un kilojulio para satisfacer los requisitos de la reacción de fusión. La razón por la que este medio de almacenamiento mejorado se incluye en una forma preferida de la presente invención es para la generación de energía comercial a gran escala. También permite que se usen accionadores de energía 12 más cortos si se contemplan reacciones de "fusión rápida". Las compensaciones en el ancho de impulsos de rayos X y en la energía sugieren la posible necesidad de esta mejora.

Transformador acoplado por electrones

La FIG. 8 muestra una sección transversal de un transformador acoplado por electrones. El transformador acoplado por electrones (ECT) es un tubo de electrones novedoso derivado del SXE. El ECT es un dispositivo de amplificación de impulsos. Utiliza el mismo estilo de cañón de electrones que el SXE (es decir, el cátodo 68 y la rejilla 66). La diferencia radica en el diseño y en la instalación del ánodo 64.

En el SXE, el ánodo es siempre hueco y se llena con un material láser. El extremo de entrada (izquierda, inferior, FIG. 8) está siempre conectado al suelo. El inventor de la presente invención se dio cuenta de que la estructura SXE básica era muy similar a una clase de transformadores de alta velocidad conocidos como "transformadores de adherencia lineales". En estos dispositivos, el secundario es un "tallo" con un extremo conectado a tierra y el otro extremo como el terminal de salida de alta tensión. Una serie de primarios toroidales se apilan en el tallo. Estos se impulsan en secuencia, de tal manera que el tiempo entre impulsos es igual al tiempo de propagación del impulso hacia arriba del tallo. Cada impulso secundario se suma a la energía (tensión) en el secundario.

La desventaja del transformador de adición lineal magnético es que las primarias toroidales entrarán en saturación y plegarán el campo si se accionan con un impulso demasiado grande. Esto limita la cantidad de energía que puede extraerse de este tipo de transformador.

El inventor de la presente invención se dio cuenta de que existía una gran similitud entre el transformador de adición lineal y el SXE. Ambos incorporaron un "Tallo". Ambos usaron un mecanismo de accionamiento secuencial, pero el SXE tenía una capacidad de manejo de corriente mucho mayor debido a la gran capacidad de manejo de corriente

de su cátodo frío. En los primeros experimentos de SXE, ambos extremos del ánodo fueron conectados a tierra para que no se observara ninguna alta tensión. Se llevó a cabo un experimento a finales de 2006 donde se construyó una versión del SXE que tenía un primer extremo conectado directamente a tierra y un segundo extremo aislado de una conexión directa al suelo. Un ánodo sólido 64 (**FIG 8**) se usó en esta prueba. Se inyectó un impulso en el cátodo y se midió la salida del ánodo. Una distinción final entre el transformador de adición lineal y el ECT es que, en el transformador de adición lineal, las primarias son entidades independientes y distintas. El impulso que resulta tiene un borde delantero "en escalera" como resultado. El ECT, en su modo de realización preferido, tiene un primario continuo (cátodo) y por lo tanto tiene un borde delantero liso para su impulso. El ECT es mucho más ligero que un adionador lineal debido a la falta de núcleos magnéticos. Un ECT 100KV/100KA pesa menos de 200 libras (90,7 kilogramos).

La **FIG. 9** muestra los resultados de la prueba anterior. El impulso de entrada 86 y el impulso de salida 84 se midieron con divisores de tensión idénticos en un osciloscopio de alta velocidad. El impulso de salida fue varias veces mayor que el impulso de entrada, verificando por lo tanto el concepto de funcionamiento del ECT.

La enorme capacidad de manejo de energía del ECT nos da algunas opciones para el diseño de la fuente de alimentación. Las opciones básicas son:

(1) Suministros de alimentación aislados individuales 34, 38 (**FIG. 3**) para cada accionador 12 (sin importar cuántos se usan) que se sincronizan mediante el uso de generadores de retardo de alta precisión en cada fuente de alimentación.

(2) Dos grandes fuentes de alimentación 34, 38 (**FIG. 3**), una para cada mitad del número total de accionadores 12, con un único generador de retardo para sincronizar los dos lados. La alta tensión se distribuye por una red similar a la red de coincidencia de fases 134, 136 (**FIGS. 5A-5C**), donde las longitudes de la línea de transmisión 36 están controladas para garantizar la sincronización de los accionadores 12.

(3) Un único suministro grande 34, 38 para accionar todo el sistema. La alta tensión se distribuye por una red similar a la red de coincidencia de fases 134, 136, donde las longitudes de la línea de transmisión 36 están controladas para garantizar la sincronización de los accionadores 12

Mientras que es posible en la teoría, el diseño de # 3 anterior no sería práctico por razones geométricas y de seguridad. Las líneas de transmisión de alta tensión 36 (**FIG. 3**) serían muy largas y habría un riesgo constante de descarga de arco.

El diseño de #2 anterior es más práctico, pero todavía tiene largas líneas de transmisión 36 (**FIG. 3**). Sin embargo, tiene la ventaja de reducir la complejidad del sistema y, por lo tanto, una mayor fiabilidad. Los diseños de ECT 42 y de modulador de impulsos 38 manejarán la carga impuesta por este diseño.

El diseño de # 1 anterior es el más complejo, pero es el más fácil de implementar en algunas formas. Las fuentes de alimentación individuales 34, 38 para cada accionador 12 serían de "tamaño modesto". La línea de transmisión de alta tensión 36 de los suministros de alimentación 34, 38 a los accionadores 12 sería extremadamente corta, lo cual es preferible. Cada fuente de alimentación 34, 38 tendría que controlarse mediante su propio generador de retardo y existiría un proceso de sintonización necesario donde todos los accionadores 12 se llevan a la sincronización temporal.

Observamos que también es posible sincronizar los accionadores 12 por medios mecánicos. En este caso, la longitud física de la línea de entrada de alta tensión 36 se ajustaría una pequeña cantidad (fracciones de una pulgada o milímetros) para conseguir la sincronización temporal de los accionadores 12.

Con referencia de nuevo a la **FIG. 8**, vemos que el ECT es casi idéntico en forma al SXE (**FIG. 4**), pero las dimensiones, el ánodo y la salida son diferentes. En el modo de realización preferido, el ECT está encerrado en un envolvente de vacío de vidrio 76. Existe un robusto aislante de alta tensión 80 en la salida, que proporciona una conexión eléctrica de impedancia constante al mundo exterior. Las señales de rejilla y de cátodo se alimentan a través de los alimentadores 74 y 72, respectivamente. Todo el dispositivo está encerrado en una capa de radiación conductora 78 para contener el campo de radiación transversal que se forma. El grosor de la capa 78 es una función de la tensión del cátodo y se calcula por medios convencionales para determinar una pantalla de seguridad contra la radiación.

Observamos que es posible y práctico utilizar el sistema de mejora de energía del condensador coaxial descrito anteriormente en "Mejora de almacenamiento de energía del SXE" con el ECT. Este sería un procedimiento conveniente para hacer que el ECT disponga de energía adicional para aplicaciones de energía extremadamente alta.

Accionadores de energía SXE y RF combinados

La **FIG. 10** muestra un SXE combinado con un medio de generación RF y la **FIG. 11** muestra los medios de generación RF. Específicamente, un tubo independiente conocido genéricamente como oscilador de cátodos virtual

(Viricator) está montado sobre el extremo de salida (mostrado a la derecha) del SXE en la **FIG. 11**. En esta configuración, aprovechamos el principio del transformador acoplado por electrones (ECT) para usar el impulso de alta tensión creado por el proceso SXE y aplicarlo directamente al cátodo 90 del Viricator. El cuerpo de Viricator forma una cavidad resonante 98 que oscila cuando el cátodo se dispara. Una rejilla 92 controla el disparo del Viricator. La señal de control se obtiene a partir del terminal de salida 142 de la rejilla del SXE, que está ubicado en el extremo opuesto de la red de coincidencia de fases. El impulso de activación se aplica de forma secuencial al Viricator como resultado de la acción de la onda progresiva de la rejilla SXE. El cátodo y la rejilla contienen una abertura en su centro a través de la que el impulso de rayos X se propaga.

La novedad del sistema anterior es que combina dos técnicas conocidas por sí mismas, es decir, el accionamiento directo de rayos X y el calentamiento RF, con el fin de realizar una mayor eficiencia del sistema. Este concepto es práctico porque el SXE va a generar un impulso de CC de alta tensión, se use o no. Sin embargo, si no se emplea el calentador RF, entonces la salida SXE se conecta a tierra y no se produce ningún impulso de CC de alta tensión. La energía eléctrica deja entonces el sistema en forma de impulso de corriente en el retorno a tierra. Pero, debido a que el pulso HVDC está disponible, tiene sentido usarlo, particularmente porque su uso no afecta a la salida de rayos X.

La **FIG. 11** muestra una sección transversal del cabezal RF de Viricator. Los componentes principales son el cátodo 90, la rejilla 92, un ánodo de malla 94, una cavidad resonante 98 y una ventana de salida 96. El impulso de accionamiento procede directamente del ánodo del SXE 12, que está conectado directamente al cátodo de Viricator a través del alimentador de cátodo 102. El Viricator se activa mediante la señal de salida desde la rejilla SXE 142. Cuando se activa el Viricator, se forma una ráfaga de energía RF mediante la oscilación en la cavidad resonante 98. Esta energía tiene una distribución espectral que se determina mediante las dimensiones de la cavidad 98. Típicamente, esta energía está entre 200 MHz y 2,5 GHz. La energía sale del Viricator y entra en la cámara objetivo 10 por la ventana de salida 96. El Viricator es un tipo de fuente de RF que puede integrarse en el SXE 12 para aumentar el rendimiento de funcionamiento del sistema. El cátodo Viricator 90 tiene una abertura 93 en su centro a través del cual el impulso de rayos X desde el SXE pasa a la cámara objetivo 10.

La **FIG. 12** muestra una sección transversal de un SXE combinado con un oscilador lineal aislado de forma magnética (MILO) en el extremo de salida (mostrado a la derecha) del SXE. El MILO es otra fuente RF bien conocida de alta tensión, similar al Viricator. La diferencia significativa es que puede producir frecuencias mucho más altas que el Viricator. Estructuralmente, la diferencia principal es la incorporación de un tubo de deriva 122 de la **FIG. 14A** y el uso de un cañón de electrones de onda progresiva (TWEG) en lugar del cátodo plano 90 y la rejilla 92 del Viricator. Existe una cavidad resonante 98 y sus dimensiones en conjunción con las dimensiones del tubo de deriva 122 (**FIG. 14A**) determinan el rango de salida. Los dispositivos MILO convencionales tienen salidas entre 300 MHz y 3,5 GHz. El inventor de la presente invención ha verificado de forma experimental que, colocando una superficie de rejilla sobre la cara interna del tubo de deriva 122 (**FIG. 14A**), como se muestra en la **FIG. 14B**, es posible generar RF a frecuencias mucho más altas que las disponibles a partir de un tubo de deriva de agujero liso 122. La fuente de este RF se debe al efecto Smith-Purcell que describe la interacción de un haz de electrones relativista con una superficie de rejilla 123. Son posibles las salidas en el rango THz. La superficie de rejilla puede estar formada por muchos procedimientos. La separación, el ángulo de cara y la geometría de rejilla son todos determinantes en la frecuencia alcanzada (**FIG. 14B**). Se ha determinado que el modo de realización preferido de la rejilla de tubo de deriva es una rosca interna como se muestra en las **FIGS. 14A** y **14B**. Alterando los parámetros del hilo, se cambia la frecuencia de salida. Los extremos del tubo de deriva 125 se redondean para minimizar la formación de perturbaciones indeseables del campo eléctrico dentro de la cavidad resonante 98.

El balance del accionador SXE-MILO es el mismo que el SXE-Viricator. De hecho, los cabezales RF—Viricator y MILO—pueden intercambiarse. Como en el caso del SXE-Viricator, el TWEG del MILO tiene un centro hueco a través del cual pasan los rayos X. La salida de electrones del TWEG se comprimen por el tubo de deriva 122 y oscila en la cavidad resonante 98.

Eficiencia de sistema de energía de fusión

El sistema de generación de energía de fusión basado en el SXE tiene una eficiencia sustancialmente más alta que todos los otros sistemas de generación de energía por fusión. Esto se debe a dos factores:

(1) El accionamiento directo de rayos X es de forma inherente más eficiente que cualquier procedimiento indirecto.

(2) Múltiples medios de extracción de energía.

Tengamos en cuenta cuáles son los determinantes básicos de la eficiencia del proceso de fusión. Primero tenemos la cantidad de energía requerida para iniciar una reacción de fusión.

Tenemos:

$W$  = Entrada de energía a los accionadores, (NIF = 400 teravatios, SXE = 50 megavatios)

$X$  = Energía requerida para generar rayos X (NIF = 1,5 megajulios, SXE = 50 kilojulios)

Y = Cantidad de rayos X requerida para accionar la reacción (25 kilojulios, en cualquier caso)

Z = Salida de energía total de la fusión, (1000 veces la energía de entrada, en cualquier caso)

T = tiempo de combustión de la reacción (frecuencia de repetición de 5 hercios = 200 milisegundos, en cualquier caso)

5 Ahora podemos hacer las afirmaciones siguientes:  $X > Y$ , y para que un sistema sea práctico,  $Z \gg X$

10 En el caso de NIF,  $X = 1,5$  megajulios e  $Y = 25$  kilojulios (para una reacción D-T). De acuerdo con los investigadores en el NIF, un retorno completo del gránulo de combustible producirá "entre 600 y 1000 veces la cantidad de energía que se ponga en el mismo [el objetivo]" (Referencia Hann). El Dr. Haan no nos dice si se refiere a la entrada de energía láser o a la entrada de rayos X. Si está refiriéndose a la entrada de energía láser de 1,5 megajulios, esto discutiría una salida de 1,5 gigajulios. Si está refiriéndose a la entrada de rayos X, entonces la entrada de 25 kilojulios produciría una salida de 25 megajulios.

El diseño de referencia del NIF requiere una tasa de inyección de gránulos de 5 gránulos por segundo, por lo que es razonable suponer que la vida útil del plasma es de 200 milisegundos.

15 El sistema NIF requiere alrededor de 400 teravatios de energía ( $4 \times 10^{12}$  vatios) para conseguir esto. Si usamos la entrada real de rayos X de 25 kilojulios y una salida de 25 megajulios, los tiempos de valor de salida, la combustión es igual a 5 megajulios. Un sistema que consume 400 teravatios para producir 5 megavatios tiene una eficiencia del 0,00015%. Si tuviéramos que usar la energía de entrada al láser como multiplicador en lugar de la energía de entrada de rayos X, la salida sería solamente de unos 250 gigavatios. En cualquier caso, cuando se compara con el requisito masivo de energía de entrada (400 teravatios), está claro que NIF es solamente una etapa en el proceso, no un sistema que deba alcanzar condiciones de equilibrio.

20 Tengamos en cuenta ahora un sistema basado en el SXE que usa la misma reacción D-T y el gránulo de combustible que el análisis anterior de NIF. Hemos demostrado previamente que la reacción de fusión D-T produce  $2,5 \times 10^8$  vatios (250 gigavatios) por gránulo durante un periodo de 200 milisegundos. El sistema de accionador SXE consumirá 25 megajulios que, durante el período de tiempo de 200 milisegundos, funciona a  $(2,5 \times 10^8) \times (2 \times 10^{-1}) = 5 \times 10^7$  vatios o 500 megavatios. Un sistema que consume 500 megavatios para producir los mismos 250 gigavatios tiene una eficiencia de 500% (salida/entrada = eficiencia). Ahora tomamos la pérdida del ciclo Rankine y obtenemos una eficiencia del 250%.

30 El cálculo anterior no tiene en cuenta una de las características más importantes de un modo de realización preferido de la presente invención: El uso simultáneo de la extracción directa de alta tensión CC para ejecutar los accionadores SXE, que se ejecutan en CC de alta tensión. El proceso de extracción directa tiene una eficiencia verificada de aproximadamente el 85%. Esto significa que el 15% de 500 megavatios (75 megavatios) se extrae de la salida térmica dejando más de 249 gigavatios disponibles para la salida a una red eléctrica. Esta característica hace práctico el uso de sistemas SXE para aplicaciones marítimas ya que la dimensión del sistema es lo suficientemente pequeña para permitir su incorporación en cualquier barco con un haz de 100 pies (30,5 metros) o más. Este análisis muestra también que el sistema de diseño de referencia descrito en esta solicitud es más que capaz de superar las condiciones de equilibrio.

#### Accionador de energía alterna

40 La presente invención no se limita al uso del SXE ni a sus derivados como fuente de rayos X para proporcionar energía para iniciar la reacción de fusión. Existe un dispositivo de la técnica anterior conocido como dispositivo de enfoque de plasma. Este es un tubo de electrones con una estructura diferente a la del SXE. Es capaz de producir combustiones intensas de rayos X a los niveles de energía requeridos para las aplicaciones de fusión de accionamiento directo. Tiene varios atributos desventajosos que lo hacen menos deseable que el SXE para su uso como accionador de fusión.

45 El enfoque de plasma no produce un haz colimado de rayos X como lo hace el SXE. Esto no es deseable ya que existe una necesidad de enfocar la energía en el destino. El SXE produce un haz colimado del diámetro correcto. El enfoque de plasma requiere un reflector fuera del eje que está curvado en 2 dimensiones. Este reflector puede usarse para colimar el haz o llevarlo a un foco en el gránulo objetivo. La calidad del haz es de tal manera que sería necesario usar el filtro de apodización de un modo de realización preferido de esta invención para corregir el frente de onda a una forma útil.

50 El enfoque de plasma no genera un impulso de salida de CC de alta tensión simultáneo como lo hace el SXE. Esto es una desventaja, ya que significa que las tecnologías de calentamiento o compresión externas requerirán una fuente de alimentación independiente y reducirán significativamente la eficiencia global del reactor por fusión. (Referencia Gai.)

## ES 2 637 019 T3

### Números de referencia de dibujo

La lista siguiente de números de referencia de dibujo tiene tres columnas. La primera columna incluye números de referencia de dibujo; la segunda columna especifica las partes asociadas con los números de referencia; y la tercera columna menciona un material preferido (si corresponde) para las partes.

<b>Lista de números de referencia</b>	<b>Material preferido</b>	
10	Cámara objetivo	Acero inoxidable
12	Accionador de rayos X SXE (6 lugares)	Diversos
14	Conos de extracción de energía (6 lugares)	Diversos
16	Inyector de granulos objetivo	Diversos
18	Entrada de refrigerante térmico	Acero inoxidable
20	Salida de refrigerante térmico	Acero inoxidable
22	Ubicación de refrigerante objetivo	n/a
24	Capa de paso de refrigerante	n/a
28	Revestimiento	Metal refractario
30	Bobinas de confinamiento magnético	Cobre
32	Accionador de confinamiento magnético	n/a
34	Modulador de impulsos	Electrónica
36	Accionador HVDC a SXE	Electrónica
38	Almacenamiento y acondicionamiento de energía	Electrónica
40	Energía de arranque y supletoria	Electrónica
42	Transformador acoplado por electrones	Diversos
44	Suministro de energía HV CC	Electrónica
46	Rejilla de extractor de CC	Metal refractario
48	HV CC recicla para almacenar energía	n/a
56	Onda plana	Rayos X
58	Filtro de apodización	Diversos materiales Z bajos
60	Frente de onda corregido	Rayos X
62	Onda progresiva plegable	Onda electromagnética
64	Ánodo	Metal refractario; Hi-z
66	Red	Metal refractario
68	Cátodo	Grafito (modo de realización preferido)
70	Condensador coaxial	Capas dieléctricas/metálicas
72	Alimentador del cátodo	Cerámica y Metal
74	Alimentador de rejilla	Cerámica y Metal
76	Envoltorio de vacío de vidrio	Vidrio (cerámica, acero inoxidable)

<b>Lista de números de referencia</b>		<b>Material preferido</b>
78	Capa de radiación	Dirigir
80	Aislador de salida de ánodo	Cerámica
84	Forma de onda de entrada ECT	n/a
86	Forma de onda de salida ECT	n/a
90	Cátodo Vircator	Grafito
92	Rejilla Vircator	Metal refractario
93	Apertura en el cátodo Vircator	n/a
94	Malla de ánodo	Metal refractario
96	Ventana de salida	Cerámica Z baja transparente RF
98	Cavidad circular resonante	Acero inoxidable o cobre
100	Brida de montaje	Acero inoxidable
102	Alimentador del cátodo	Cerámica y Metal
104	Soporte de cátodo	Metal refractario
106	Alimentador de rejilla	Cerámica y Metal
108	Soporte de rejilla	Metal refractario
110	Bomba Getter	n/a
112	Alimentador de bomba Getter	Cerámica y Metal
114	Cátodo MILO	Grafito
116	Soporte de cátodo MILO	Metal refractario
118	Rejilla MILO	Metal refractario
120	Soporte de rejilla MILO	Metal refractario
122	Tubo de deriva	Metal refractario
124	Soporte de tubo de deriva	Cerámica
125	Extremo radiado de tubo de la deriva	Material refractario
126	Aislador de ánodo interno	Cerámica
128	Aislante de rejilla	Cerámica
130	Anillo de soporte de rejilla superior	Acero inoxidable
132	Anillo de soporte de rejilla inferior	Acero inoxidable
134	Cable de red de coincidencia de fases	Acero inoxidable
136	Conector de red de coincidencia de fases	Acero inoxidable
138	Aislador de ánodo interno	Cerámica
140	Aislante de extremo de red de coincidencia de fases	Cerámica
142	Terminal de salida de rejilla	Metal refractario
144	Alimentador de cable a rejilla	Cerámica y Metal
146	Resorte de tensión de rejilla	Acero inoxidable

**Lista de números de referencia**

**Material preferido**

148	Arandela	Acero inoxidable
150	Tuerca hexagonal	Acero inoxidable
152	Aislante de red de coincidencia de fases	Cerámica

**Citas de referencias bibliográficas**

Las referencias bibliográficas siguientes se citan brevemente en la memoria descriptiva. Por ejemplo, la breve referencia bibliográfica para el autor " Nakai "se da de la forma siguiente: (Referencia Nakai.)

- 5 "On Target Designing for Ignition", Steven Haan, Lawrence Livermore, revisión de la ciencia y de la tecnología, julio/agosto, 1999
- "The Physics Issues That Determine Inertial Confinement Fusion Target Gain and Driver Requirements: A Tutorial ", Mordecai D. Rosen, Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, Livermore, California 94550 12 de noviembre de 1998, Física de los Plasmas, vol. 6, N° 5.
- 10 "Convergent Hydrodynamics of Inertia - Confinement Fusion Implosions", CW Barnes, LLNL División de Física 132 Informe de Progreso 1997–1998
- "Fundamental Experiments on Hydrodynamic Instability in Direct Drive Laser Fusion at Gekko XII", M. Nakai, Instituto de Ingeniería Láser, Universidad de Osaka, Japón.
- "Production of Fast Neutron with a Plasma Focus Device", Moshe Gai, Laboratorio de Ciencias Nucleares en Avery Point, Universidad de Connecticut, 5 de mayo de 2006
- 15 Lo anterior describe sistemas de energía de fusión en los cuales se extraen tanto la energía de CC de alta tensión como la energía térmica. En un modo de realización, la energía de CC de alta tensión extraída puede usarse como una fuente de energía para sostener reacciones de fusión controladas. La alta estabilidad hidrodinámica al enfocar la energía de accionamiento sobre un gránulo de combustible objetivo puede realizarse con el uso de un filtro de apodización para conformar los frentes de onda de energía de accionamiento que alcanzan un gránulo de combustible.
- 20 Aunque la invención se haya descrito con respecto a modos de realización específicos a modo de ilustración, se producirán muchas modificaciones y cambios a los expertos en la técnica. Por lo tanto, se entenderá que las reivindicaciones adjuntas están previstas para cubrir todas dichas modificaciones y cambios ya que caen dentro del alcance de la presente invención.
- 25

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema para aplicar impulsos de rayos X síncronos a material objetivo de fusión por confinamiento inercial, que comprende:
- 5 a) una cámara central objetivo (10) para recibir el material objetivo de fusión en forma de un gránulo objetivo de fusión (22) de forma esférica;
- en el que la cámara objetivo (10) está unida por una pared de cámara;
- b) una pluralidad de accionadores de energía (12) dispuestos alrededor del exterior de la cámara objetivo (10) en pares simétricos alrededor de dicho gránulo objetivo de fusión (22) y dispuestos en una configuración de  
10 accionamiento directo simétrica de forma tridimensional alrededor de dicho gránulo objetivo de fusión (22);
- c) medios para controlar la pluralidad de accionadores de energía para:
- generar impulsos de rayos X (60) exteriores a la pared de la cámara,
- emitir los impulsos de rayos X (60) generados dentro de la cámara objetivo (10) y
- 15 aplicar los impulsos de rayos X (60) emitidos como impulsos de rayos X síncronos combinados directamente en el gránulo objetivo de fusión (22) en la cámara objetivo (10),
- en los que cada uno de los impulsos de rayos X síncronos incluye un impulso de rayos X de cada uno de los accionadores de energía (12); y
- d) una pluralidad de medios para extraer la energía de la reacción por fusión liberada del gránulo objetivo de fusión, que comprende:
- 20 i) medios (14) para extraer energía de CC de alta tensión (48) del plasma de fusión que implica el gránulo objetivo de fusión (22); y
- ii) medios (20) para extraer energía térmica de la cámara objetivo (10);
- e) cada uno de la pluralidad de accionadores de energía que comprende una fuente de rayos X, en el que cada fuente de rayos X comprende:
- 25 i) un tubo de electrones de triodo cilíndrico (12),
- en el que cada tubo de electrones incluye un ánodo central hueco (64) a lo largo de un eje central del tubo (12),
- en el que cada tubo de electrones incluye una rejilla (66) y un cátodo (68) radialmente espaciado del ánodo;
- 30 ii) en el que el cátodo (68) y la rejilla (66) forman un cañón de electrones de onda progresiva que produce una onda progresiva radialmente simétrica (62) de potencial de tierra en modo electromagnético transversal cuando la rejilla está conectada a tierra a través de una red de coincidencia de fases (134, 136),
- propagándose dicha onda a lo largo de una longitud del cañón de electrones de onda progresiva a la velocidad de la luz en vacío,
- ocasionando dicha onda un haz de electrones para fluir desde el cátodo (68) hasta el ánodo (64) de manera que barre a lo largo del ánodo (64) a la velocidad de la luz en vacío,
- 35 teniendo dicha onda una energía capaz de hacer que los electrones penetren en una pared del ánodo (64) y ocasionar una zona tanto de radiación de frenado como de electrones, y
- barriendo dicha zona a lo largo de un espacio hueco interno del ánodo (64) a la velocidad de la luz en un vacío;
- iii) en el que el espacio hueco interno está lleno de un medio láser que está completamente ionizado por la zona barrida; y
- 40 iv) en el que la energía de la zona barrida se bombea de forma lineal mediante al menos la energía contenida en la capacitancia de interelectrodos distribuida del cátodo (68) y la rejilla (66).
2. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en el que cada uno de la pluralidad de accionadores de energía (12) comprende un aparato unitario (12 & 94–124) que produce:
- 45 un impulso de rayos X (60) para ocasionar la liberación de energía de reacción de fusión del gránulo objetivo de fusión; y

energía RF para calentar el gránulo objetivo de fusión (22).

3. El sistema de la reivindicación 1, que comprende además:

5 una estructura de apodización asociada con cada uno de la pluralidad de accionadores de energía (12) para reconformar un frente de onda (56) del impulso de rayos X (60) respectivo para ser cóncavo desde la perspectiva del gránulo objetivo de fusión (22);

estando la estructura de apodización definida por cualquiera de:

i) un filtro de apodización (58) que comprende un objeto sólido de grosor variable a lo largo de la dirección del impulso de rayos X; siendo el grosor del filtro de apodización (58) mayor cerca del centro del frente de onda (56) del impulso de rayos X que cerca de los bordes de dicho frente de onda (56); o

10 ii) un componente óptico difractivo.

4. El sistema de la reivindicación 2, que comprende además:

una estructura de apodización asociada con cada uno de la pluralidad de accionadores de energía (12) para reconformar el frente de onda (56) del impulso de rayos X (60) respectivo para que sea cóncavo desde la perspectiva del gránulo objetivo de fusión (22);

15 estando la estructura de apodización definida por cualquiera de:

un filtro de apodización (58) que comprende un objeto sólido de grosor variable a lo largo de la dirección del impulso de rayos X; estando el grosor del filtro de apodización (58) más próximo al centro del frente de onda (56) del impulso de rayos X que cerca de los bordes de dicho frente de onda (56), o

un componente óptico difractivo.

20 5. El sistema de las reivindicaciones 1, 2 o 3, en el que dicha pluralidad de accionadores de energía (12) se accionan por un medio de almacenamiento de energía (38); recibiendo dichos medios de almacenamiento de energía desde:

una primera fuente de alimentación (40) que proporciona energía de arranque y supletoria; y

25 una segunda fuente de alimentación que obtiene energía a partir de la energía de CC de alta tensión (48) extraída de dicha energía de reacción de fusión;

en el que dicha energía de arranque es la energía total requerida para iniciar la liberación de energía de reacción de fusión y la energía supletoria es la energía que se añade a la energía de la segunda fuente de alimentación para mantener la liberación de energía de reacción de fusión.

30 6. El sistema de la reivindicación 1, en el que cada uno de la pluralidad de accionadores de energía (12) usa un gas de origen de rayos X de cualquiera de las combinaciones de oxígeno, nitrógeno, neón, argón, criptón, radón, bismuto, mercurio y uranio.

7. El sistema de las reivindicaciones 1, 2 o 3, en el que cada uno de la pluralidad de accionadores de energía (12) tiene una energía de accionamiento de rayos X entre aproximadamente 200 voltios de electrones y 100 voltios de kiloelectrones.

35 8. El sistema de las reivindicaciones 1, 2 o 3, en el que cada uno de la pluralidad de accionadores de energía (12) usa un medio láser de cualquiera de, o combinación de, cualquier elemento con un número atómico entre 7 y 93.

9. El sistema de la reivindicación 1, que comprende además un condensador coaxial (70) enrollado concéntricamente sobre la superficie externa del cátodo (68).

10. El sistema de la reivindicación 1, en el que:

40 a) la fuente de rayos X (12) produce también un impulso de tensión (84) en el extremo de salida del ánodo (64) que es más alto que un impulso de tensión (86) inyectado en el cátodo (68); y

b) se usa dicho impulso de tensión (84) para producir un impulso RF para calentar el material objetivo de fusión mediante medios de generación RF que comprenden una cavidad resonante (98) y un cañón de electrones unidos al extremo de salida del ánodo (64) de la fuente de rayos X (12) a fin de producir una ráfaga coherente de fase de energía RF coincidente con el impulso de rayos X (60).

45 11. El sistema de la reivindicación 5, en el que dicha primera fuente de alimentación (40) usa un transformador acoplado por electrones (42) para generar un impulso de tensión de salida (84) como una versión amplificada de un impulso de entrada (86) compatible con, y añadido a, la energía generada por dicha segunda fuente de alimentación.

12. El sistema de la reivindicación 10, en el que medios de generación RF (92-112) en cada uno de la pluralidad de accionadores de energía comprenden un oscilador de cátodo virtual con una abertura central (93) en el cátodo (90) del cañón de electrones, 93) permitiendo que un impulso de rayos X (56) pase a través del cátodo (90) del cañón de electrones del oscilador de cátodo virtual.
- 5 13. El sistema de la reivindicación 10, en el que los medios de generación RF de cada uno de la pluralidad de accionadores de energía (12) incorporan un tubo de deriva cilíndrico (122) que forma un oscilador lineal aislado de forma magnética (74-124) con una abertura central en el cátodo (114) del cañón de electrones, lo cual permite que un impulso de rayos X (56) pase a través del cátodo (114) del cañón de electrones del oscilador lineal aislado de forma magnética.
- 10 14. El sistema de la reivindicación 12 o 13, en el que los medios de generación RF se activan de forma automática secuencialmente después del inicio del impulso de rayos X (56) por elementos interconectados internos del accionador de energía.
15. El sistema de la reivindicación 12, en el que:
- a) el tubo de deriva (122) tiene una superficie de rejilla periódica (123) en la superficie interna de dicho tubo;
- 15 b) el cañón de electrones produce un haz de electrones incidente sobre la superficie de rejilla periódica (123);
- c) la separación, el ángulo de la cara y la geometría de la superficie de rejilla (123) y la energía del haz de electrones son determinantes del espectro de frecuencia de salida RF del oscilador lineal aislado de forma magnética (72-124); y
- d) la energía del haz de electrones incidente es superior a 100.000 voltios de electrones.
- 20 16. El sistema de la reivindicación 3, en el que la estructura de apodización se define mediante un filtro de apodización que comprende un objeto sólido de grosor variable a lo largo de la dirección del impulso de rayos X; siendo el grosor del filtro de apodización mayor cerca del centro del frente de onda del impulso de rayos X que cerca de los bordes de dicho frente de onda.
- 25 17. El sistema de la reivindicación 1, en el que la cámara objetivo (10) contiene bobinas de confinamiento magnético pulsado (30) para impedir que el plasma entre en contacto con la superficie enfrentada interna de la estructura enfrentada interna en la cámara objetivo (10), respondiendo dichas bobinas a una salida de un modulador de impulsos (34) sincronizado con una salida de un modulador de impulsos que suministra CC de alta tensión a dicha pluralidad de accionadores de energía (12).
- 30 18. El sistema de la reivindicación 2, en el que todos los dichos accionadores de energía (12) están situados externos a la cámara objetivo (10).
19. Un procedimiento para aplicar impulsos de rayos X síncronos al material objetivo de fusión por confinamiento inercial, que comprende:
- a) proporcionar una cámara objetivo central (10) para recibir material objetivo de fusión en forma de un gránulo objetivo de fusión (22) de forma esférica;
- 35 en el que la cámara objetivo (10) está unida por una pared de cámara;
- b) disponer una pluralidad de accionadores de energía (12) alrededor del exterior de la cámara objetivo (10) en pares simétricos alrededor de dicho gránulo objetivo de fusión y en una configuración de accionamiento directo simétrica tridimensional alrededor de dicho gránulo objetivo de fusión (22);
- c) controlar la pluralidad de accionadores de energía de modo que:
- 40 generen impulsos de rayos X (60) exteriores a la pared de la cámara,
- emitan los impulsos de rayos X (60) generados a la cámara objetivo y
- apliquen los impulsos de rayos X (60) emitidos como impulsos combinados de rayos X síncronos (10),
- en el que cada uno de los impulsos de rayos X síncronos (60) incluye un impulso de rayos X de cada uno de los accionadores de energía (12); y
- 45 d) proporcionar una pluralidad de medios para extraer energía de reacción de fusión liberada del gránulo objetivo de fusión (22), que comprenden ambos:
- i) proporcionar medios (14) para extraer energía de CC de alta tensión (48) a partir del plasma de fusión que implica el gránulo objetivo de fusión (22); y

ii) proporcionar medios para extraer energía térmica de la cámara objetivo (10).

e) en el que cada uno de la pluralidad de accionadores de energía comprende una fuente de rayos X, en el que cada fuente de rayos X comprende: i)

i) un tubo de electrones de triodo cilíndrico (12),

5 en el que cada tubo de electrones incluye un ánodo central hueco (64) a lo largo de un eje central del tubo (12), en el que cada tubo de electrones (12) incluye una rejilla (66) y un cátodo (68) radialmente separado del ánodo;

ii) en el que el cátodo (68) y la rejilla (66) forman un cañón de electrones de onda progresiva que produce una onda progresiva plegable radialmente simétrica (62) del potencial de tierra en modo electromagnético transversal cuando la rejilla está conectada a tierra a través de una red de coincidencia de fases (134, 136),

10 propagándose dicha onda a lo largo de una longitud del cañón de electrones de onda progresiva a la velocidad de la luz en el vacío;

haciendo dicha onda que un haz de electrones fluya desde el cátodo hasta el ánodo de tal manera que barra a lo largo del ánodo (64) a la velocidad de la luz en vacío,

15 teniendo dicha onda una energía capaz de hacer que los electrones penetren una pared de ánodo (64) y de ocasionar una zona tanto de radiación de frenado como de electrones, y

barriendo dicha zona lo largo de un espacio hueco interno del ánodo (64) a la velocidad de la luz en vacío;

iii) en el que el espacio hueco interno está lleno de un medio láser que está completamente ionizado por la zona barrida; y

20 iv) en el que la energía de la zona barrida se bombea de forma lineal mediante al menos la energía contenida en la capacitancia de interelectrodos distribuida del cátodo (68) y la rejilla (66).

20. El procedimiento según la reivindicación 19, que comprende además, reconformar un frente de onda (56) del impulso de rayos X (60) respectivo para que sea cóncavo desde la perspectiva del gránulo objetivo de fusión (22), por medio de una estructura de apodización definida como uno de un componente óptico difractivo o un filtro de apodización (58) que comprende un objeto sólido de grosor variable a lo largo de la dirección del impulso de rayos X (60); siendo el grosor del filtro de apodización (58) mayor cerca del centro del frente de onda (56) del impulso de rayos X (60) que cerca de los bordes de dicho frente de onda (56).

21. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 20, en el que la reconformación del frente de onda (56) del impulso de rayos X (60) para que sea cóncavo desde la perspectiva del gránulo objetivo de fusión (22) es por medio de una estructura de apodización definida como filtro de apodización (58) que comprende un objeto sólido de grosor variable a lo largo de la dirección del impulso de rayos X (60); siendo el grosor del filtro de apodización (58) mayor cerca del centro del frente de onda (56) del impulso de rayos X (60) que cerca de los bordes de dicho frente de onda (56).

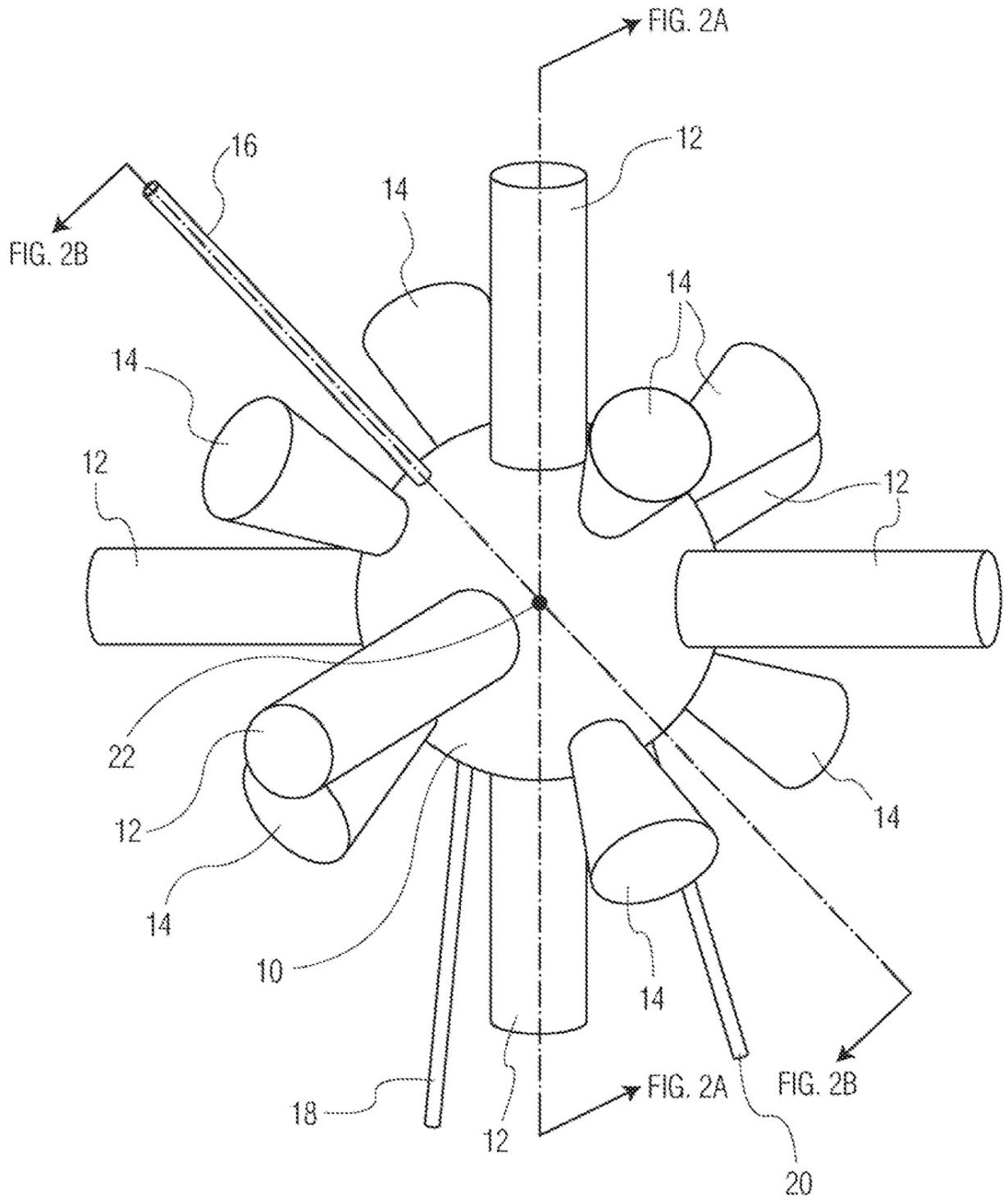


FIG. 1

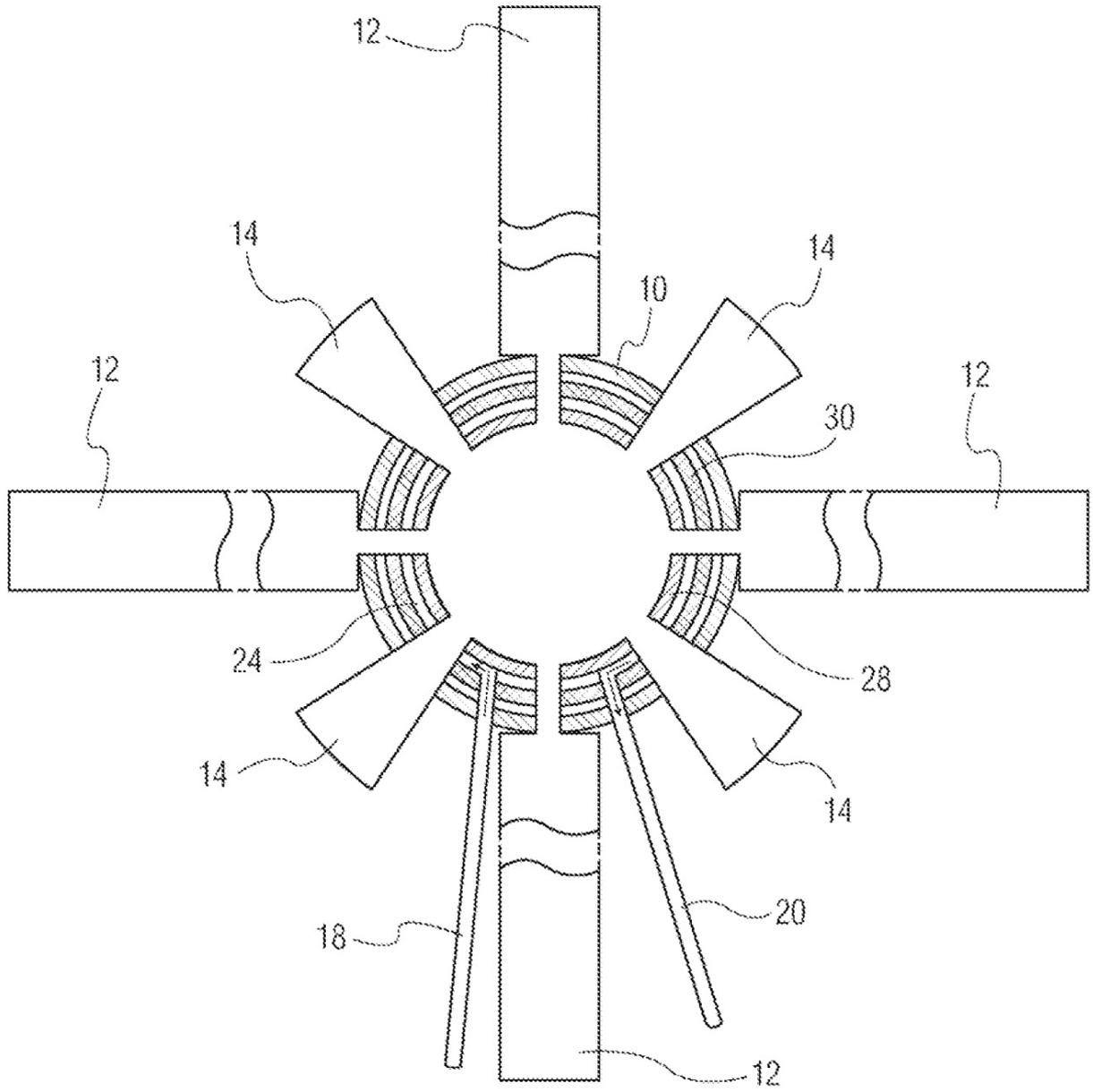


FIG. 2A

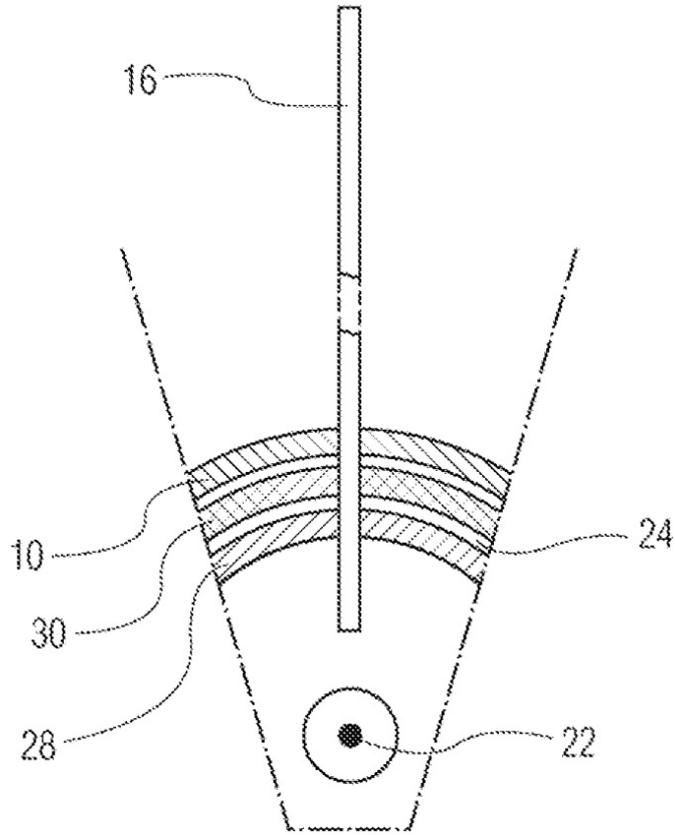


FIG. 2B

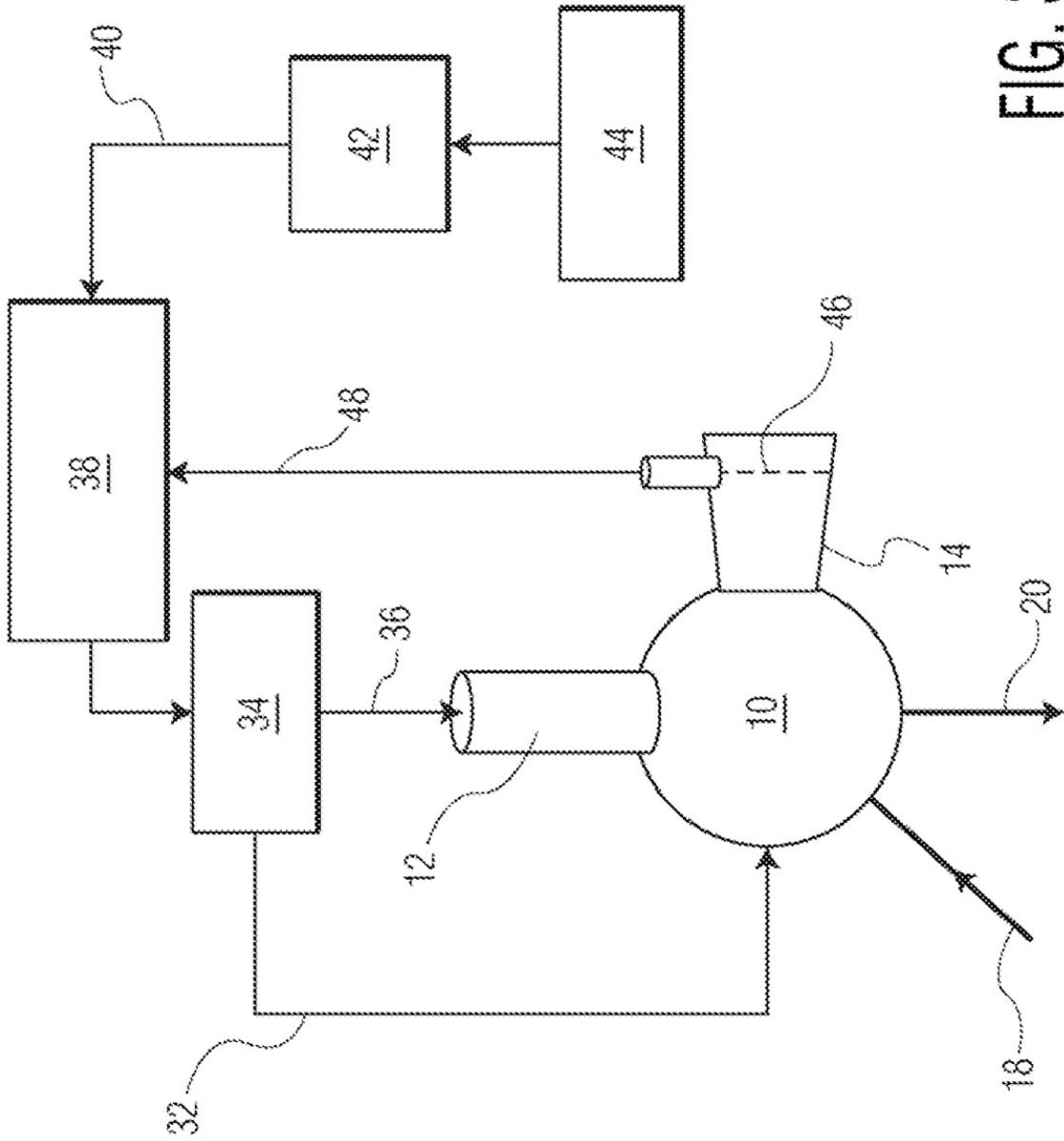


FIG. 3

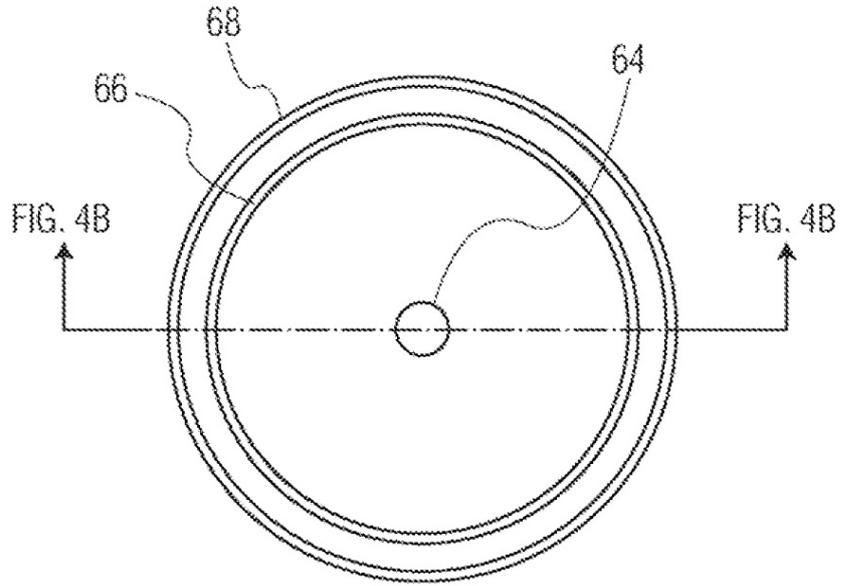


FIG. 4A

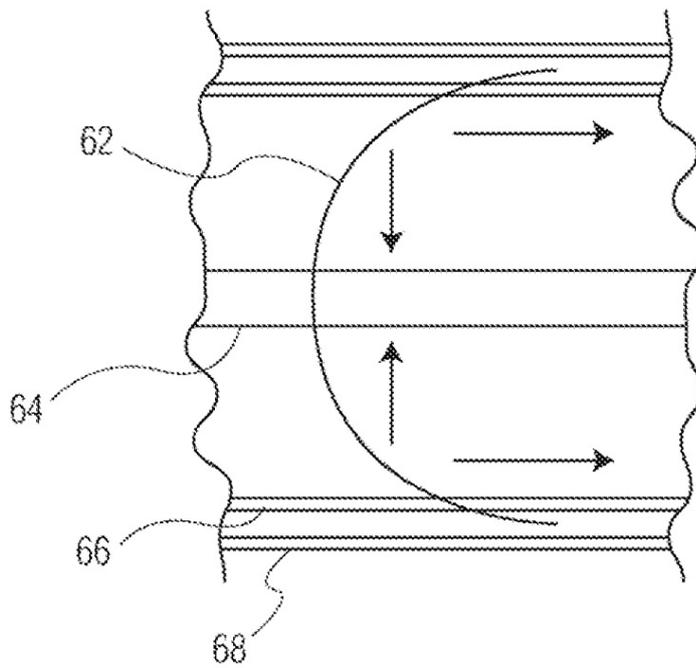


FIG. 4B



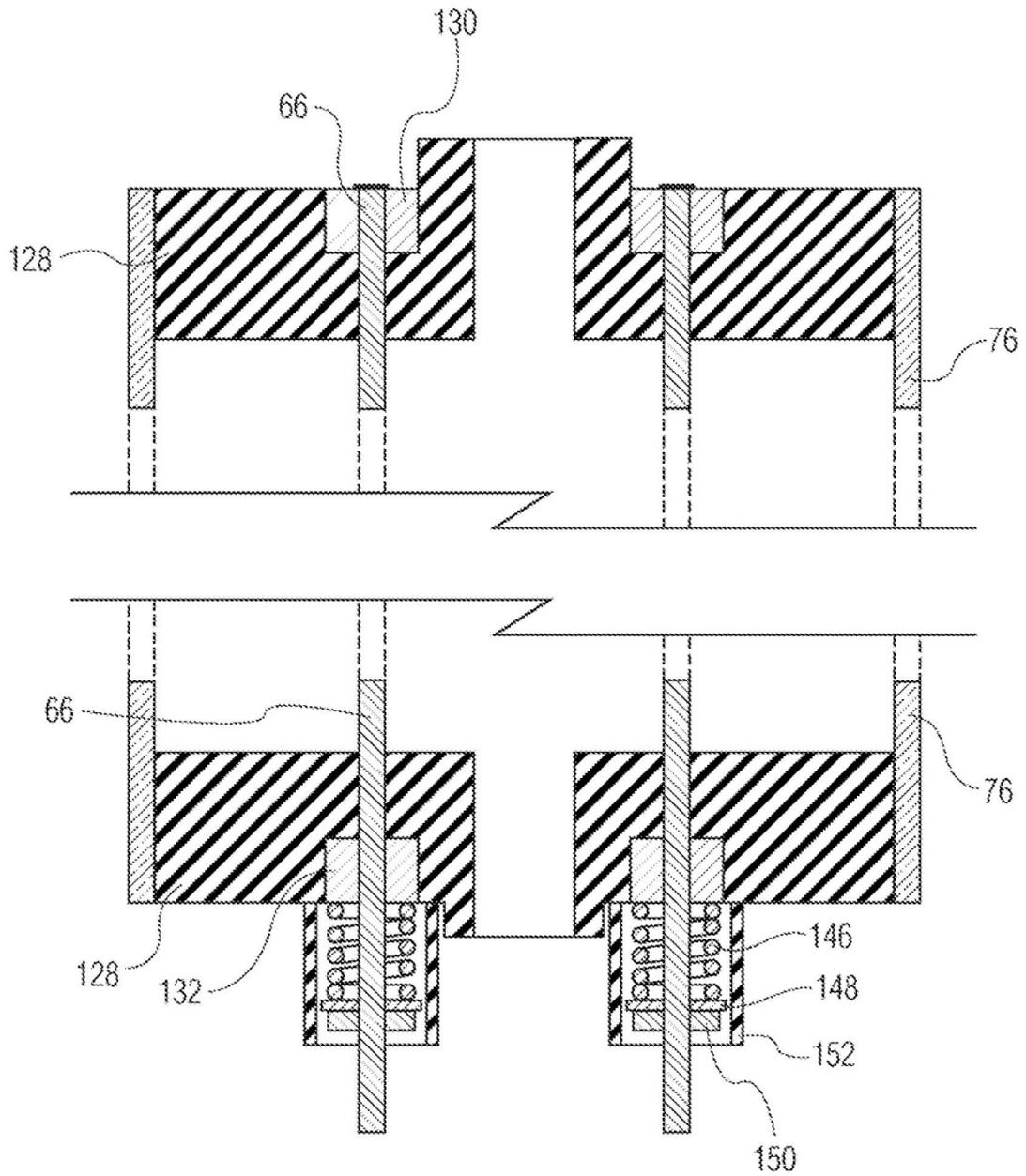


FIG. 5B

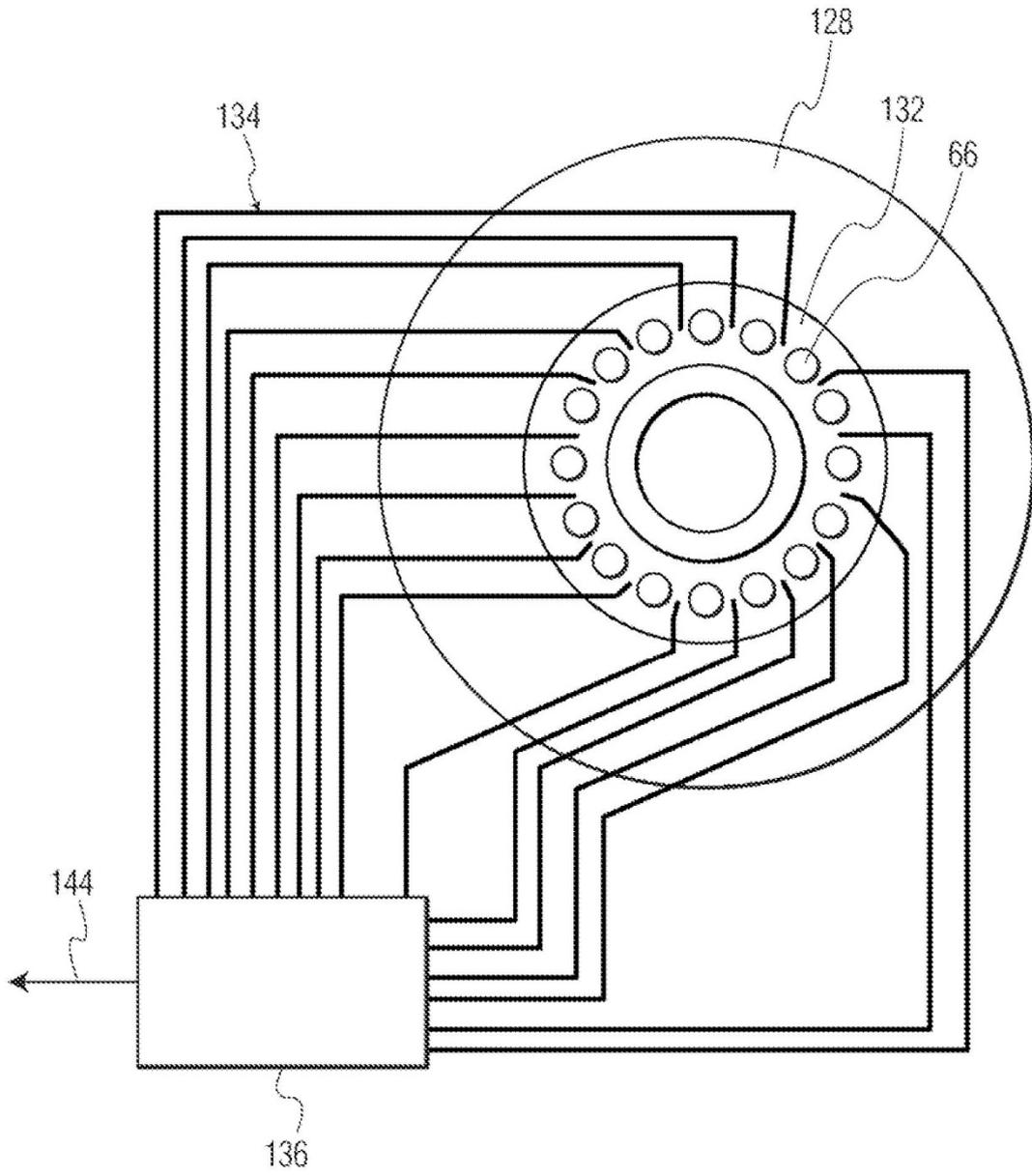


FIG. 5C

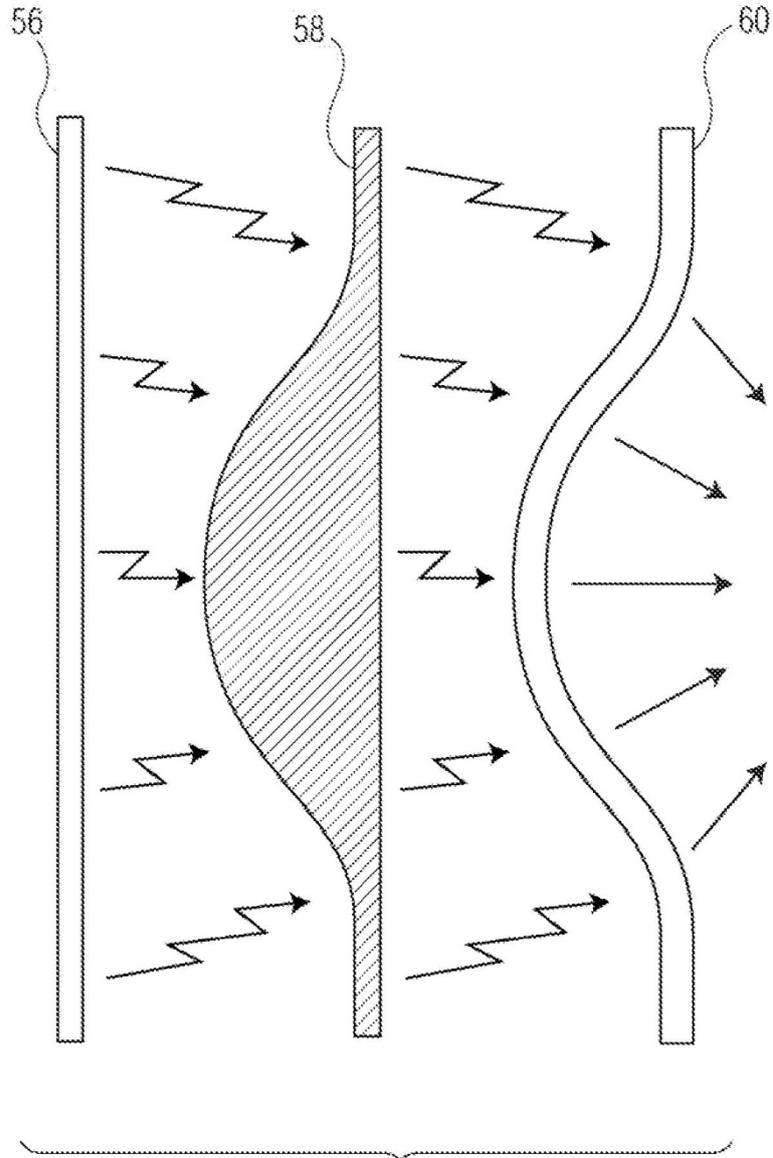


FIG. 6

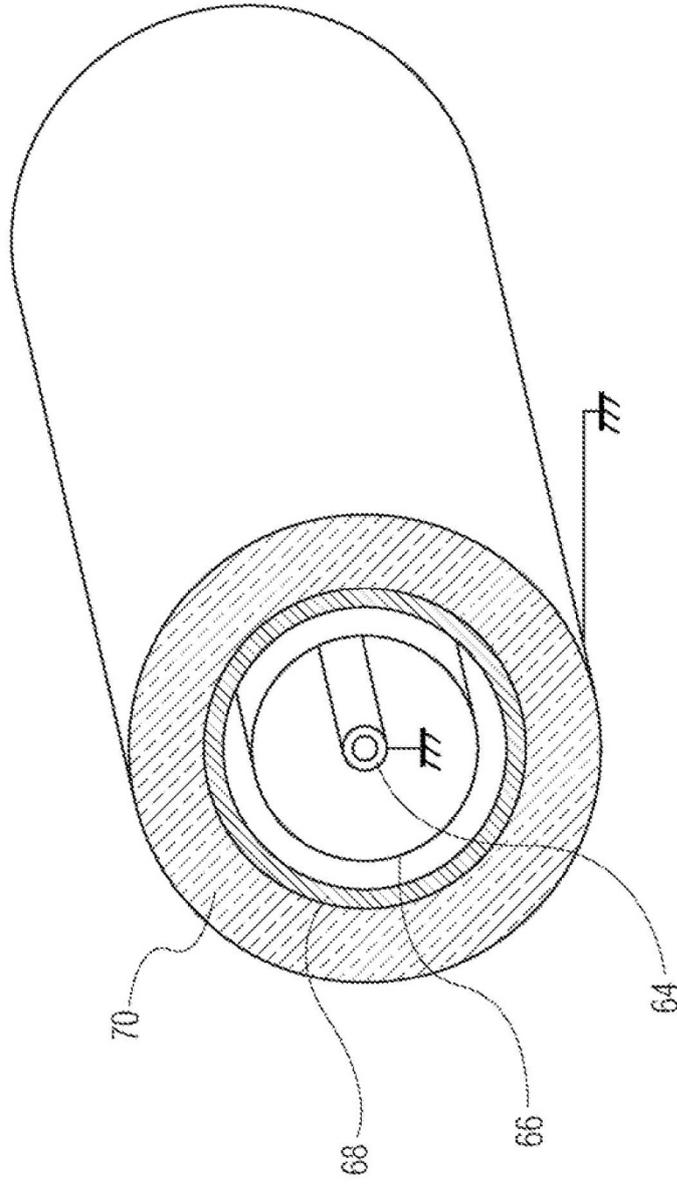
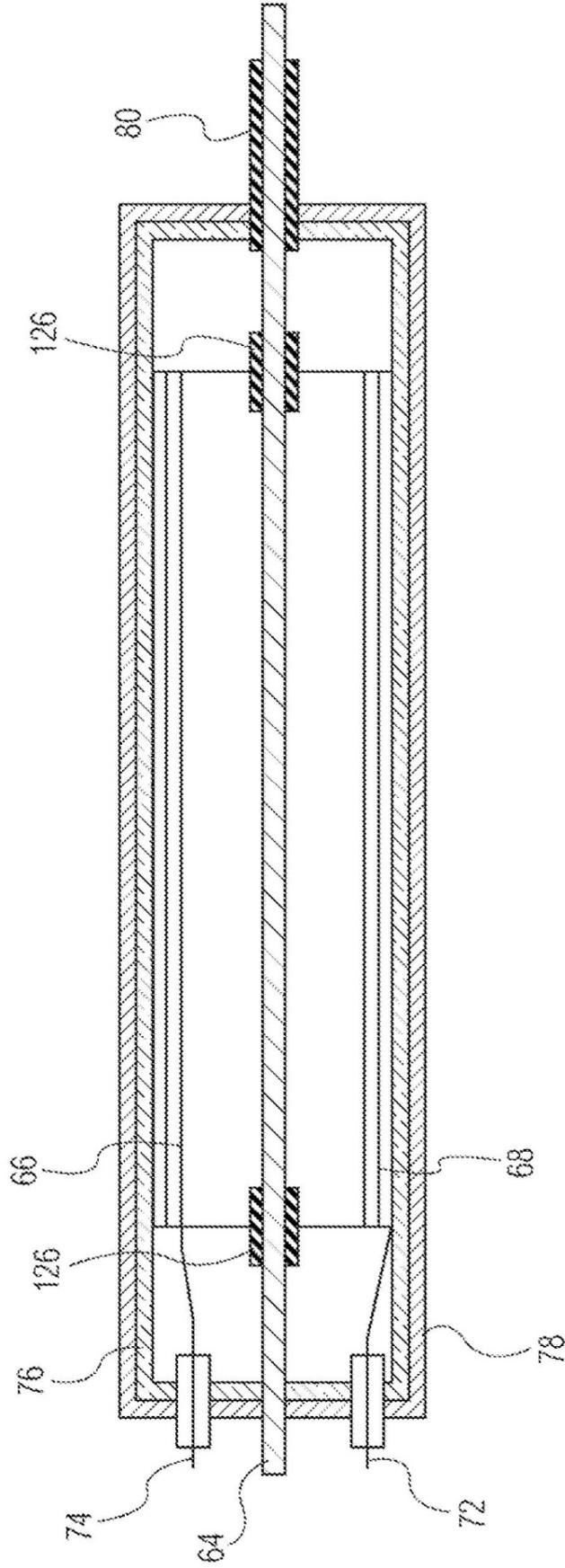


FIG. 7



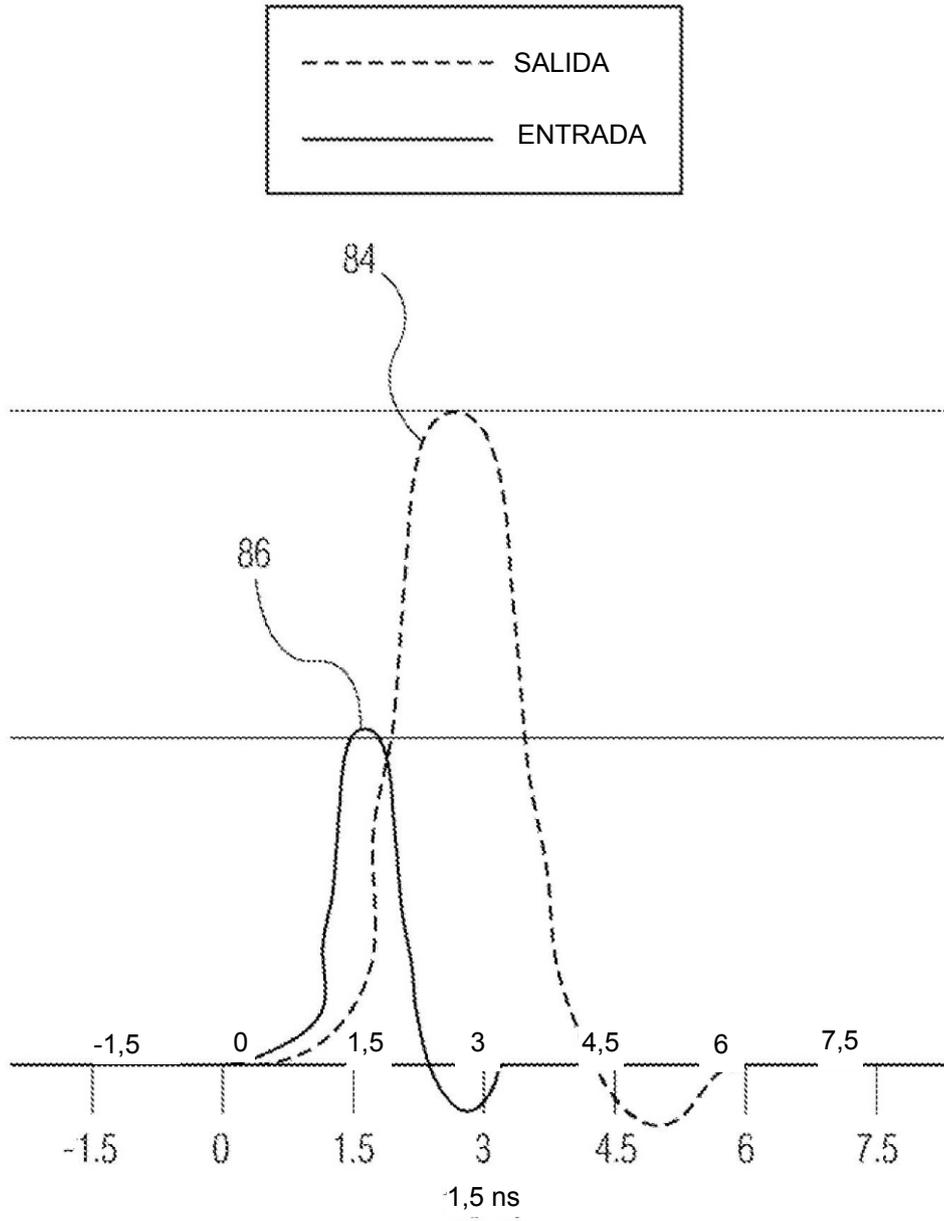


FIG. 9

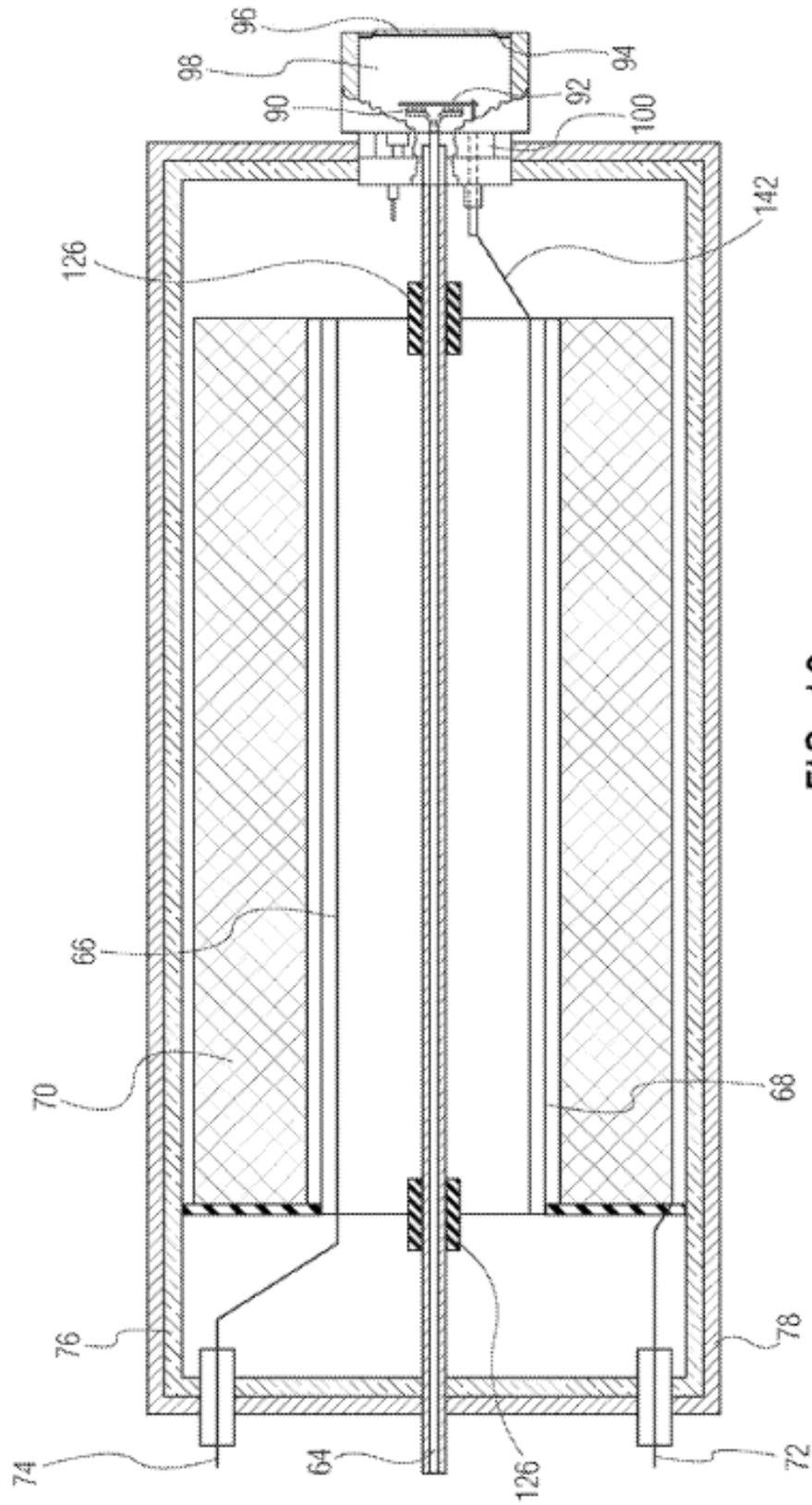


FIG. 10

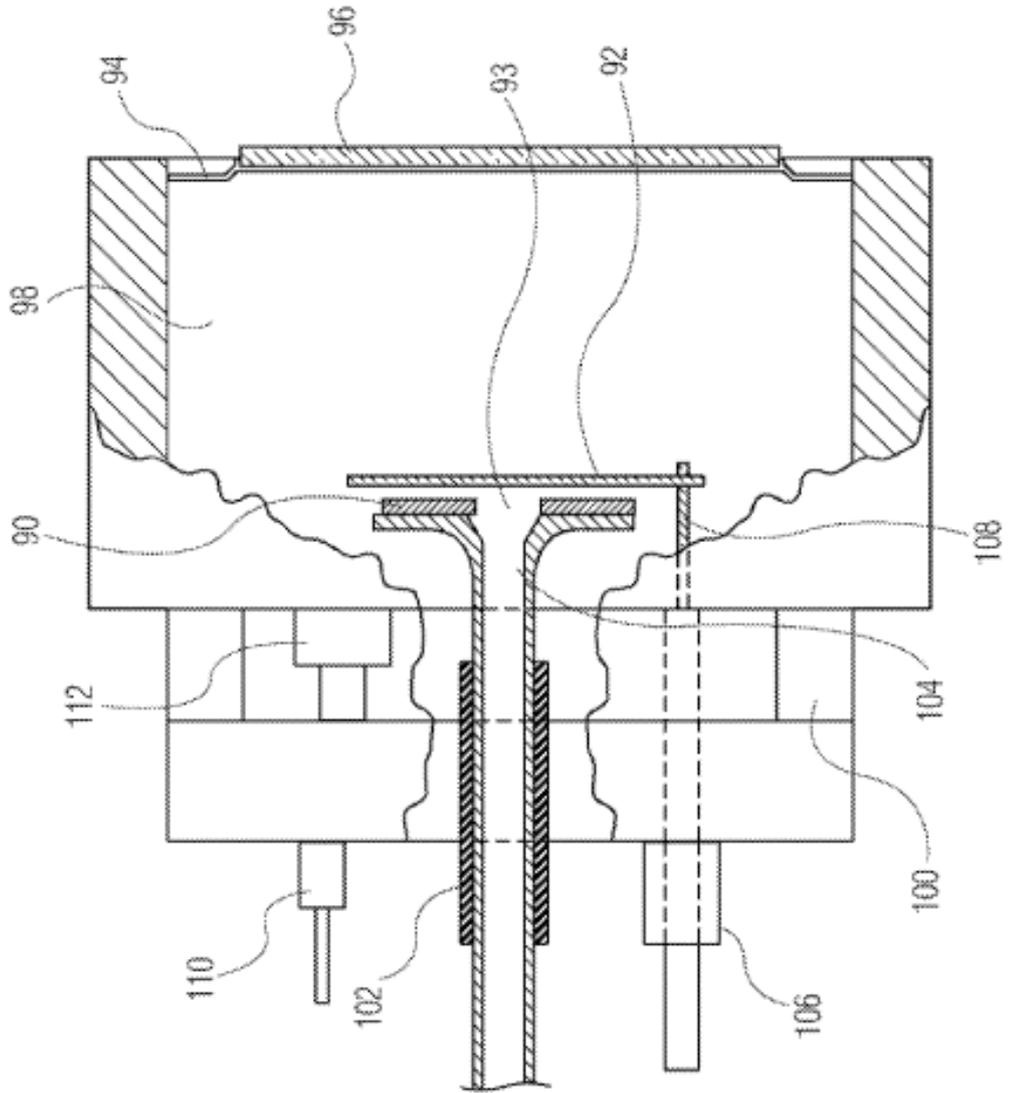
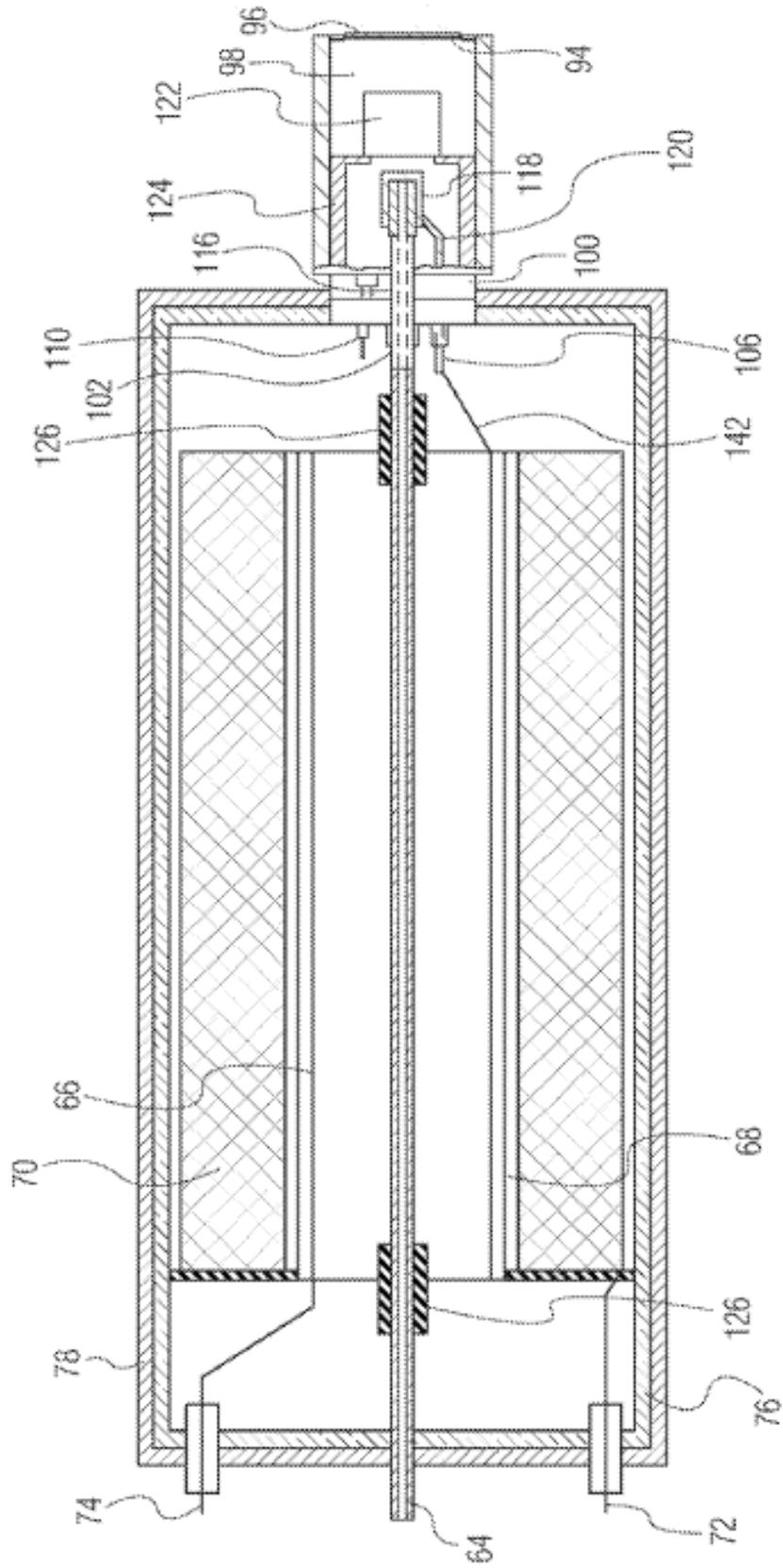


FIG. 11



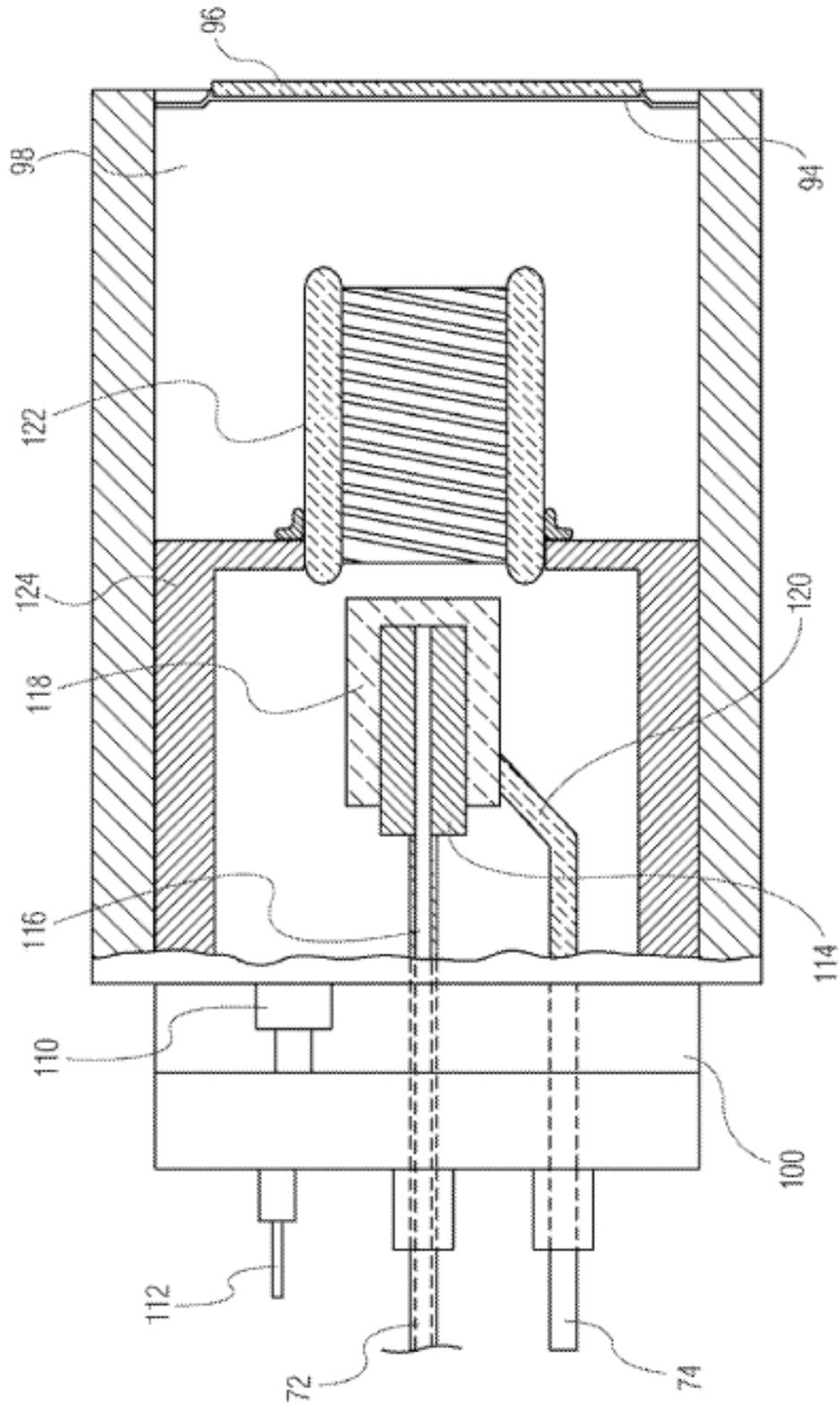


FIG. 13

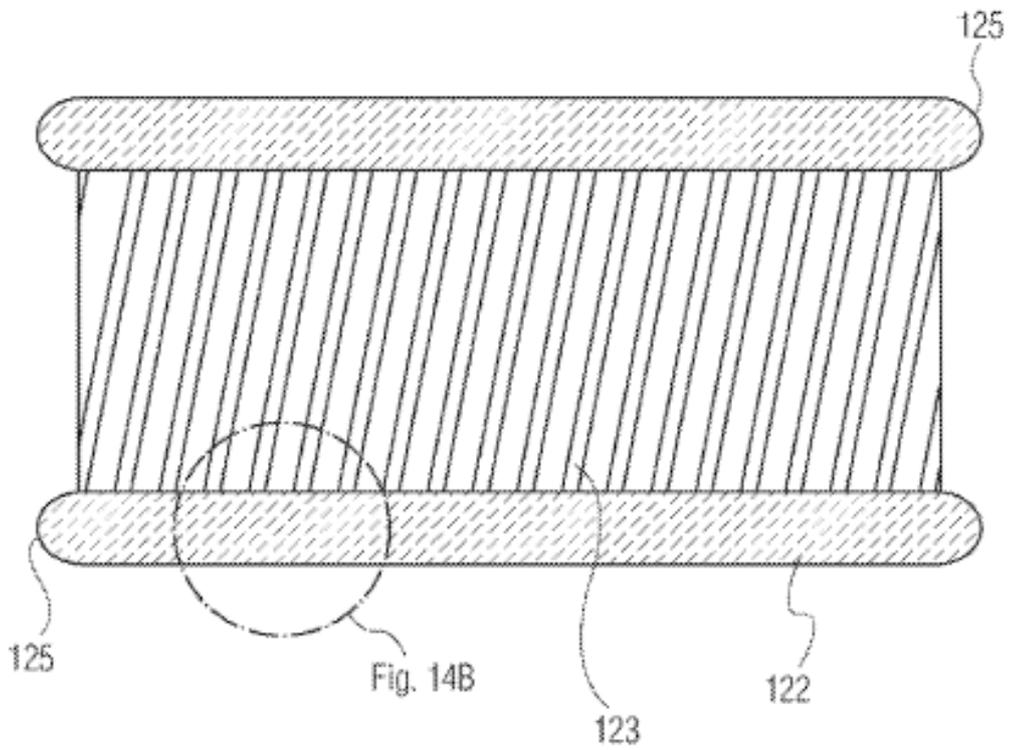


FIG. 14A

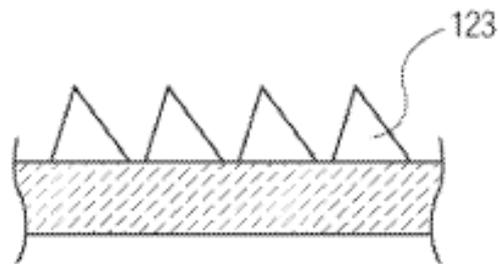


FIG. 14B