

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 415 519**

51 Int. Cl.:

**H05H 1/54** (2006.01)

**H05G 2/00** (2006.01)

**H05H 15/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.09.2007 E 07804232 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.03.2013 EP 2060159**

54 Título: **Acelerador de partículas cargadas y fuente de radiación**

30 Prioridad:

**12.09.2006 GB 0617943**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**25.07.2013**

73 Titular/es:

**ISIS INNOVATION LIMITED (33.3%)  
EWERT HOUSE EWERT PLACE  
SUMMERTOWN OXFORD OX2 7LG, GB;  
THE UNIVERSITY OF STRATHCLYDE (33.3%) y  
LAWRENCE BERKELEY NATIONAL  
LABORATORY (33.3%)**

72 Inventor/es:

**HOOKER, SIMON MARTIN;  
GONSALVES, ANTHONY JOSEPH;  
JAROSZYNSKI, DINO ANTHONY y  
LEEMANS, WIM PIETER DAVID**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

**ES 2 415 519 T3**

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

**DESCRIPCIÓN**

Acelerador de partículas cargadas y fuente de radiación

- 5 La presente invención se refiere a un método y a un aparato para la producción de radiación electromagnética usando partículas cargadas aceleradas.

Se conoce desde hace unos 25 años que los grandes campos eléctricos formados en la onda de densidad de carga que sigue a un pulso de láser intenso que se propaga a través de un plasma (gas ionizado) se podría usar para  
 10 acelerar partículas cargadas en una distancia que es mil veces inferior a la que se requiere con un acelerador convencional para energías de salida comparables. Los aceleradores de plasma que funcionan con láser, también conocidos como aceleradores de campo de estela, podrían formar por lo tanto la base de una nueva clase de acelerador muy compacto con unas dimensiones de sólo unos pocos centímetros (excluyendo el accionador de láser), y capaces de generar rayos de partículas con energías iguales a las que suministran las máquinas  
 15 convencionales de varias decenas o centenas de metros de longitud. Una ventaja adicional es que el rayo de salida, habitualmente electrones pero siendo también posibles otras partículas cargadas, de un acelerador de plasma está compuesto de pulsos de una duración mucho más corta (femtosegundos) que la que es posible con un acelerador convencional (que típicamente suministra paquetes de varios picosegundos de longitud). Los aceleradores de plasma que funcionan con láser podrían por lo tanto reemplazar a los aceleradores convencionales usados para  
 20 alimentar fuentes de radiación, tales como sincrotrones, y para formar una fuente compacta de pulsos cortos de partículas cargadas y radiación ajustable.

Sin embargo, existen dificultades prácticas asociadas con la inyección de los paquetes de partículas cargadas que se van a acelerar en el acelerador de plasma, que pueden limitar la calidad de la salida del acelerador. Por ejemplo,  
 25 cuando los paquetes de partículas cargadas se generan por separado y se transportan al acelerador de plasma, es muy difícil evitar que los paquetes se hagan menos definidos espacialmente (es decir, se dispersen) durante la fase de transporte. Esta y otras limitaciones en la precisión con la que se puede llevar a cabo el proceso de inyección pueden causar fluctuaciones en la energía de salida del acelerador (fluctuaciones y/o dispersión no deseada de energía en los paquetes de partículas cargadas de salida).

Los onduladores se pueden usar para obtener radiación electromagnética de los rayos de partículas cargadas aceleradas y de ese modo formar una fuente de radiación. Tales onduladores se basan en conjuntos de imanes permanentes dispuestos de modo que sus campos magnéticos desvían periódicamente un rayo de partículas cargadas que pasa a través de ellos. El movimiento transversal impartido de esta manera al rayo de partículas  
 35 cargadas produce el denominado ondulator o radiación sincrotrón de wiggler, que forma la base de las fuentes de sincrotrón modernas. Los onduladores también se usan en fuentes láser sin electrones de rayos X para producir una radiación intensa coherente de rayos X. Los onduladores de láser sin electrones de rayos X tienen habitualmente entre 20 y 150 m de longitud y tienen muchos miles de períodos.

- 40 Generalmente se requieren fuertes campos magnéticos para desviar el rayo de partículas cargadas, lo que presenta la dificultad de la miniaturización de los imanes permanentes y la producción de un ondulator compacto.

Es un objetivo de la presente invención proporcionar un ondulator compacto mejorado para una fuente de radiación.

45 De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se proporciona un método para la producción de radiación electromagnética, que comprende: formar un canal de plasma en un capilar; disparar un pulso de láser a través del canal de plasma; disponer un grupo de partículas cargadas para que se inyecten en una estela de densidad de plasma del pulso de láser de modo que sean aceleradas por la estela; y disponer el canal de plasma y el disparo del pulso de láser de modo que la estela del pulso de láser ejerza una fuerza transversal sobre el grupo inyectado de  
 50 partículas cargadas que varíe periódicamente mientras que el pulso de láser se propaga a lo largo de la longitud del canal, causando la aceleración transversal resultante del grupo de partículas cargadas la emisión de dicha radiación electromagnética.

De acuerdo con un aspecto adicional de la presente invención, se proporciona una fuente de radiación electromagnética, que comprende: un capilar adecuado para crear un canal de plasma; una fuente de láser dispuesta para disparar un pulso de láser a través del canal de plasma; y medios para inyectar un grupo de partículas cargadas en una estela de densidad del plasma del pulso de láser de modo que el grupo sea acelerado por la estela, en la que la fuente de láser y el canal se dispongan de modo que la estela en uso del pulso de láser ejerza una fuerza transversal sobre el grupo inyectado de partículas cargadas que varíe periódicamente a medida  
 60 que el pulso de láser se propaga a lo largo de la longitud del canal, causando la aceleración transversal resultante del paquete de partículas cargadas la emisión de dicha radiación electromagnética.

De acuerdo con lo anterior, la estela que sigue a un pulso de láser en el canal, que se puede definir como la alteración en la densidad de carga del plasma causada por el paso del pulso de láser, se puede usar como un  
 65 ondulator para producir radiación electromagnética, y en particular para producir un pulso corto de radiación de alta frecuencia. El período espacial entre dos ondulaciones (que puede variar a lo largo del capilar de acuerdo con la

frecuencia o el intervalo de frecuencias de salida deseado al tomar en consideración la aceleración o deceleración de las partículas cargadas) en las realizaciones de tal sistema puede ser considerablemente más corto que 1 mm para producir radiación de rayos X, a diferencia de las dimensiones de 1 cm o superiores para un ondulator comparable de tipo imán permanente. Esto significa que, por ejemplo, un ondulator de 1000 períodos con una periodicidad de 100 micrómetros puede tener una longitud de tan sólo 10 cm, lo que reduce el coste y el tamaño del ondulator considerablemente. Los onduladores convencionales pueden costar varios cientos de miles de libras por metro y necesitan ser alojados en grandes edificios construidos especialmente con espesas capas de hormigón protectoras de la radiación. Un ondulator de plasma tal como el que se ha discutido se podría añadir a un acelerador que funciona con láser (acelerador de plasma) virtualmente sin coste extra.

La frecuencia de la radiación de salida depende de la velocidad de las partículas cargadas. Cuanto más cerca estén de la velocidad de la luz mayor es la frecuencia. En el marco de referencia de la partícula cargada, el período del ondulator presenta desplazamiento Doppler y parece tener un período más corto (con un factor igual al factor de contracción relativista de Lorenz  $\gamma$ ). Las partículas cargadas radiarán luz con este período (es decir la frecuencia del desplazamiento Doppler). Sin embargo, para un observador en el marco de referencia del laboratorio la frecuencia presenta de nuevo un desplazamiento Doppler a una frecuencia mayor. Se puede decir que de esta manera la radiación presenta un doble desplazamiento Doppler - una vez en el marco de referencia de la partícula cargada y a continuación de nuevo de vuelta en el marco de referencia del laboratorio. En la práctica, por lo tanto, la frecuencia (y por lo tanto la longitud de onda) de la radiación de salida depende predominantemente del período espacial del ondulator ( $\lambda_w$ ) y de la energía (E) de las partículas cargadas, que se puede parametrizar con el factor de Lorenz  $\gamma$  en  $E = \gamma m_e c^2$ , siendo  $m_e$  la masa en reposo de la partícula cargada. En estos términos, la longitud de onda de salida viene dada aproximadamente por  $\lambda = \lambda_w / 2\gamma^2$ . Sin embargo, existen términos de corrección que dependen de la fortaleza de la fuerza de desviación transversal. El término "ondulator" se entiende en el campo que incluye medios para inducir oscilación en una dimensión (por ejemplo una oscilación transversal en combinación con un movimiento traslacional) y también movimiento periódico en tres dimensiones, tal como el movimiento helicoidal en un campo magnético. Para fuerzas de desviación muy fuertes, la radiación emitida se denomina a veces radiación wiggler y se producen multitud de armónicos altos de la frecuencia fundamental que extienden el intervalo espectral de la radiación de sincrotrón.

Un aspecto útil adicional de la realización anterior es que hace posible la producción de pulsos de radiación de duración ultracorta, potencialmente más cortos que 10 fs, lo que no es fácil de conseguir usando otras fuentes ajustables de luz. Además, esta técnica proporciona la base para la generación de pulsos de rayos X del orden de femtosegundos ampliamente ajustables, lo que es difícil/imposible de realizar de cualquier otra manera conocida.

La corta duración de los pulsos de radiación es posible debido a que se puede hacer que la densidad de carga del plasma varíe en una escala de longitud muy corta - típicamente unas pocas decenas de micrones. Esto fija el período de onda de la estela de densidad de carga del plasma sobre la que las partículas cargadas "hacen surf", y el surfista, que es el paquete o grupo de partículas cargadas que se van a acelerar, debe ser más corto que el período de onda pues de lo contrario se montaría en más de una estela de plasma y parte del paquete de partículas cargadas sería acelerado y parte sería decelerado. El período de onda de densidad del plasma fija de esta manera básicamente la longitud del paquete, que a su vez limita la duración del pulso de radiación.

La capacidad para producir pulsos en la escala de femtosegundos de esta forma podría ser valiosa para científicos que deseen llevar a cabo estudios de resolución temporal de la estructura de la materia, por ejemplo, permitiendo que tales estudios se lleven a cabo en escalas de tiempo sin precedentes y proporcionando las bases para la creación de "películas" de rayos X de la estructura de la materia que se desarrolla en sus escalas naturales de tiempo, por ejemplo en reacciones químicas, etc.

La fuerza transversal de la estela puede ser el resultado de una desviación correspondiente de la estela causada por la desviación del pulso de láser. Se pueden disponer el canal de plasma y el disparo del pulso de láser para hacer esto de varias maneras. Una opción es disparar el pulso de láser fuera del eje del canal (es decir, una disposición especial de disparo del pulso de láser en lugar de la del canal, que puede ser simplemente en línea recta en esta realización), que causa una desviación transversal periódica del pulso de láser (a través del "batido de modo"). Este fenómeno se puede visualizar mediante la analogía de un trineo o un bobsleigh descendiendo a gran velocidad por un canal de nieve o una canica rodando a través de un canalón horizontal en forma de U. Siguiendo la analogía de la canica, si la canica se hace rodar a lo largo del fondo del canalón, en una dirección paralela al eje del canalón, continuará rodando sin desviarse. Sin embargo, si la canica comienza a rodar desde un lado, o se empuja en una dirección que forma un ángulo con el eje del canalón, o ambas cosas, experimentará un movimiento transversal periódico (debido a la fuerza restauradora transversal inducida por la gravedad que surge de la forma en U del canalón). En un canal de plasma, el gradiente de densidad de carga transversal, que es el que hace que el canal de plasma "canalice" el pulso de láser, proporciona la fuerza de restauración transversal para el rayo láser.

La inyección "fuera de eje" del pulso de láser puede comprender por lo tanto disparar el pulso de láser en una dirección paralela al eje central longitudinal del canal (o capilar) pero comenzando desde un punto separado radialmente del eje, o puede comprender disparar el pulso de láser en una dirección oblicua con respecto al eje pero comenzando desde un punto en el eje, o una mezcla de ambos. Una segunda opción, que se puede aplicar por

separado o en combinación con la primera opción, es proporcionar un canal que tenga una forma, inducida por la forma del capilar, que cause la desviación transversal periódica del pulso de láser y de la estela (es decir, una disposición especial del canal o del capilar en lugar del disparo del pulso de láser, que se puede llevar a cabo normalmente). Las formas especiales pueden incluir ondulaciones de sección transversal longitudinal básicamente sinusoidal o desviaciones localizadas en la sección transversal que se separan longitudinalmente a lo largo del canal. Ambas opciones se pueden implementar con un coste relativamente bajo y se pueden usar en conjunto para producir una fuente de radiación controlada con precisión. Otras posibilidades incluyen formas de tipo hélice o patrones de onda cuadrada. Más generalmente, podría ser adecuada cualquier forma en la que existan variaciones periódicas en la posición transversal del eje del canal, o en la sección transversal del canal, o en ambas. Además, como se discutirá posteriormente, puede ser útil variar el período del patrón con la posición a lo largo del canal. Esto puede ser útil, por ejemplo, para controlar la posición del paquete de partículas cargadas aceleradas en la estela (por ejemplo, para mantener el paquete en la misma posición en la estela), para variar el espectro de la radiación de salida o para mantener la coherencia de la radiación emitida de un período de ondulator al siguiente.

Los canales de plasma periódicos descritos anteriormente se pueden crear por formación de capilares que tienen variaciones periódicas en la posición de sus ejes o en sus secciones transversales. Los capilares se pueden mecanizar con precisión para este fin usando micromecanización con láser u otros métodos de grabado en una sustancia tal como, por ejemplo, zafiro.

La etapa de disponer un grupo de partículas cargadas para que se inyecten en una estela del pulso de láser puede comprender producir un grupo de partículas cargadas fuera del capilar e inyectarlas al interior del capilar desde el exterior. Este enfoque tiene la ventaja de que se pueden introducir un gran número de partículas cargadas en el interior del canal con relativa facilidad. Adicional o alternativamente, el grupo de partículas cargadas inyectado puede originarse a partir del propio plasma y extraerse por la estela del pulso de láser. Este enfoque obvia la necesidad de una fuente separada de partículas cargadas y también evita los problemas asociados con el transporte de las partículas cargadas desde el sistema generador de partículas cargadas separado al capilar, produciendo de esa manera una inyección de partículas cargadas potencialmente más controlada. Se pueden usar diversos métodos para provocar la inyección de partículas cargadas a partir del plasma. Por ejemplo, se pueden inducir variaciones en la densidad del plasma que provoquen la inyección de las partículas cargadas; esto se puede conseguir por medio de desviaciones en el perfil del capilar (véase posteriormente) y/o mediante el uso de pulsos de láser adicionales (es decir, además del pulso de láser usado para acelerar las partículas cargadas atrapadas en su estela).

Se puede disponer el plasma formado en el capilar para que tenga un perfil de densidad transversal que favorezca el enfoque del pulso de láser hacia un eje central del capilar (es decir, que el plasma forme un canal para guiar el pulso de láser). Esto ayuda a mantener elevada la intensidad del pulso de láser a una larga distancia, permitiendo de esa manera una aceleración más eficaz de las partículas cargadas en la estela del pulso de láser. El efecto de enfoque es también lo que hace posible inducir que el pulso de láser experimente variaciones periódicas: las fuerzas que enfocan el láser hacia el centro del canal son las mismas que forzarían al pulso de láser para que ejecute un movimiento periódico en el canal de plasma periódico. El perfil de densidad transversal, por ejemplo, se puede caracterizar por tener una densidad que disminuya desde las paredes del canal hacia el eje del canal. Tal perfil de densidad de plasma se puede crear cuando se forma el plasma por disparo de una descarga a través del gas contenido en el capilar, causando la transferencia de calor a las paredes del capilar que el plasma tenga una temperatura mayor cerca del eje central del capilar en comparación con la temperatura cerca de las paredes del capilar.

Se puede proporcionar un medio para inyectar un grupo de partículas cargadas en el canal en forma de una desviación localizada longitudinalmente en la sección transversal del capilar que, en uso, causa una desviación correspondiente en la densidad de plasma, siendo dicha desviación en la densidad del plasma tal que causa la inyección de un grupo de partículas cargadas desde el plasma a la estela del pulso de láser en la región de la desviación del canal de modo que el grupo sea acelerado por la estela. Esta disposición permite una inyección de partículas cargadas altamente controlada que puede reducir la dispersión de energía del paquete de partículas cargadas aceleradas así como reducir la fluctuación en la energía media del paquete de partículas cargadas.

De acuerdo con una disposición desvelada adicionalmente, se proporciona un aparato para acelerar partículas cargadas, que comprende: un capilar adecuado para formar un canal de plasma; y una fuente de láser dispuesta para disparar un pulso de láser a través del canal de plasma, en el que dicho capilar tiene una desviación localizada longitudinalmente en su sección transversal que, en uso, causa una desviación correspondiente en la densidad de plasma, siendo dicha desviación en la densidad de plasma tal que causa la inyección de un grupo de partículas cargadas desde el plasma a una estela del pulso de láser en la región de la desviación del capilar de modo que el grupo sea acelerado por la estela.

De acuerdo con una disposición desvelada adicionalmente, se proporciona un método para acelerar partículas cargadas, que comprende: formar un canal de plasma en un capilar; y disparar un pulso de láser a través del plasma, en el que dicho capilar tiene una desviación localizada longitudinalmente en su sección transversal que causa una desviación correspondiente en la densidad del plasma, siendo dicha desviación en la densidad del plasma tal que causa la inyección de un grupo de partículas cargadas desde el plasma a la estela del pulso de láser

en la región de la desviación del capilar de modo que el grupo sea acelerado por la estela.

En el presente documento, las partículas cargadas se inyectan en la estela del pulso de láser en el sentido en que son posteriormente barridas hacia delante por la estela, moviéndose longitudinalmente fuera de sus posiciones originales en el plasma a lo largo de la longitud del canal, acelerando durante esta trayectoria debido a los campos eléctricos del interior de la estela de modo que emergen con una mayor energía más adelante en el canal (al final del canal, por ejemplo). Estas partículas cargadas inyectadas permanecerán dentro de la estela a aproximadamente la misma distancia detrás del pulso de láser durante la mayoría de la trayectoria restante del pulso de láser en el canal. Las partículas cargadas del plasma que no se inyectan en la estela pueden alterarse por el pulso de láser a medida que pasa, y esto puede incluir un elemento de aceleración longitudinal, pero tales partículas cargadas normalmente no se transportarán significativamente a lo largo de la estela: tenderán a volver hacia sus posiciones de partida después de que el pulso de láser haya pasado. Este último caso es el que ocurre a menudo cuando el pulso de láser se propaga a través de un plasma uniforme, aunque no obstante puede producirse alguna inyección de partículas cargadas (por ejemplo, la propia estela tenderá a actuar sobre el pulso de láser incluso en un plasma nominalmente uniforme, lo que puede causar que el pulso de láser se distorsione y cause una inyección; además, cuando la intensidad del láser es muy elevada - suficientemente elevada para causar que las partículas cargadas viajen cerca de la velocidad de la luz - algunas partículas cargadas quedarán espontáneamente atrapadas/inyectadas en la estela). Sin embargo, la dinámica de las partículas cargadas desplazadas cambia cuando la densidad longitudinal del plasma es no uniforme (que se puede inducir mediante las desviaciones en la estructura del capilar, por ejemplo) y puede ser tal que provoque la captura deseada de las partículas cargadas en la estela del pulso de láser.

Esta última cuestión se puede entender con mayor claridad de nuevo mediante la analogía del surfista. La inyección de partículas cargadas en la onda de plasma de modo que sean aceleradas consiste en preparar las partículas cargadas para coger la onda (es decir, mejorar sus posibilidades de que sean barridas hacia delante con la onda), que se puede ver de forma análoga a la forma en que un surfista remaría en la dirección de una ola que viene por el mar para "cogerla" según pasa. Así como el surfista rema en la dirección de la ola, la idea en el canal de plasma es que cambiando localmente la forma del capilar en el que se forma el canal de plasma sería posible cambiar localmente la densidad longitudinal del plasma (es decir, en la dirección en que viajará la onda), causando de esa manera gradientes longitudinales locales en la densidad del plasma que se ha mostrado que provocan la inyección de partículas cargadas.

De acuerdo con este enfoque, las partículas cargadas se inyectan de forma controlada en una parte precisa de la estela de plasma, justo en el punto en el que comenzarán a acelerarse, y la aceleración se puede mantener durante una gran distancia dado que el pulso de láser se enfocará por el canal. Este enfoque puede producir por lo tanto un rayo de partículas cargadas estable tanto en términos de las fluctuaciones de la energía de salida (es decir, "fluctuación") como de la dispersión de energía de los paquetes de partículas cargadas de salida.

La posición de la desviación en el capilar se puede usar para determinar la energía final del grupo de partículas cargadas aceleradas debido a que se puede determinar la longitud a través de la que se aceleran las partículas cargadas. Por lo tanto, la energía de salida del sistema acelerador se puede controlar fácilmente por ajuste de la separación entre el punto de inyección de las partículas cargadas que van a ser aceleradas y la salida. Por ejemplo, el capilar puede comprender al menos una desviación localizada longitudinalmente adicional en su sección transversal que, en uso, cause al menos una desviación correspondiente adicional en la densidad del plasma, siendo cada una de dichas desviaciones adicionales en la densidad del plasma tal que cause la inyección de un grupo adicional de partículas cargadas del plasma en la estela del pulso de láser en la región de la desviación adicional en el canal de modo que cada grupo adicional sea acelerado por la estela. La pluralidad de desviaciones localizadas en tal disposición se puede usar por lo tanto para inyectar paquetes de partículas cargadas que se van a acelerar a diferentes energías, determinando las posiciones de las desviaciones longitudinales respectivas las energías finales.

A continuación se describirán las realizaciones de la presente invención, solamente a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos esquemáticos acompañantes en los que los símbolos de referencia correspondientes indican las partes correspondientes, y en los que:

- Las Figuras 1A y 1B son respectivamente las vistas esquemáticas de perfil y de frente de un capilar que contiene un gas ionizado con un gradiente de densidad radial;
- Las Figuras 2A y 2B son las vistas esquemáticas de perfil y de frente del capilar de las Figuras 1A y 1B a través del que se propagan el pulso de láser y su estela;
- La Figura 3 ilustra un capilar al que se ha dado forma para operar como ondulator;
- La Figura 4 ilustra el disparo fuera de eje de un pulso de láser en un canal de plasma que causa un comportamiento ondulator;
- La Figura 5 ilustra una fuente de radiación que usa un ondulator de canal de plasma;
- La Figura 6 ilustra una desviación localizada longitudinalmente que comprende un aumento localizado en el área de sección transversal del capilar;
- La Figura 7 ilustra una desviación localizada longitudinalmente que comprende una sección adicional del capilar que se extiende lateralmente hacia el exterior;
- La Figura 8 ilustra una desviación localizada longitudinalmente que comprende un cambio de etapa en el área

de sección transversal del capilar, con medios para producir un patrón de flujo de gas adaptado;  
 La Figura 9 ilustra una pluralidad de desviaciones localizadas longitudinalmente en la sección transversal del capilar para provocar la inyección de partículas cargadas a partir del plasma desde puntos diferentes; y  
 La Figura 10 ilustra una disposición para producir una densidad de plasma que cambia gradualmente en el capilar.

Un pulso de láser de alta intensidad disparado a través de un plasma (un gas ionizado) desplaza las partículas cargadas a medida que se propaga a través del plasma de forma similar a un barco que se abre paso a través del agua. Como las partículas de agua desplazadas en la analogía del barco, las partículas de carga desplazadas también tienden a volver aproximadamente (no necesariamente de forma exacta) hacia sus posiciones de partida después de que el pulso de láser haya pasado debido a las fuerzas de Coulomb, y entran en una especie de movimiento oscilatorio en la estela del pulso de láser.

El desplazamiento de las partículas cargadas en la estela del pulso de láser está asociado con enormes campos eléctricos. Los componentes longitudinales de estos campos eléctricos se pueden usar para acelerar las partículas cargadas a lo largo de la dirección del pulso de láser. En particular, es posible inyectar partículas cargadas en la estela de tal manera que sean efectivamente arrastradas hacia delante detrás del pulso de láser, permaneciendo en una región de la estela que tiene un componente de campo eléctrico longitudinal que las acelera durante cierta distancia. La inyección de paquetes de partículas cargadas en una estela de esta forma es el principio de operación de un acelerador de plasma que funciona con láser.

Un problema práctico que se ha encontrado es mantener la intensidad del pulso de láser dirigido durante distancias de más de aproximadamente 1 milímetro, lo que ha limitado la energía de salida de los aceleradores que funcionan con láser a unos pocos cientos de MeV ( $10^6$  electrón voltios). Sin embargo, los desarrollos recientes han mostrado que se puede usar una guía de ondas de plasma para mantener el pulso de láser enfocado durante varios centímetros, aumentando la salida del acelerador al nivel de GeV. Este es el mismo tipo de energía que se usa rutinariamente en instalaciones de sincrotrón, pero generada en un acelerador de sólo unos pocos centímetros de longitud.

Las Figuras 1A y 1B ilustran una forma en la que se puede crear una guía de ondas de plasma de acuerdo con una realización de la presente invención. Un capilar 2 (mostrado de perfil en la Figura 1A y de frente en la Figura 1B), que puede tener unos pocos centímetros de longitud y unos pocos cientos de micrómetros de diámetro, se llena con un gas adecuado (hidrógeno, por ejemplo). A continuación se dispara una descarga eléctrica a través del capilar 2, que ioniza el gas y produce el canal de plasma. La descarga produce como consecuencia natural un plasma que está más caliente que las paredes del capilar y la conducción térmica entre el plasma y las paredes causa un gradiente de temperatura entre el eje longitudinal del capilar 2 y las paredes del capilar 2. El plasma está más caliente cerca del eje del capilar 2 que cerca de las paredes. El gradiente de temperatura causa un gradiente de densidad en el plasma, teniendo el plasma una menor densidad cerca del eje que cerca de las paredes. El efecto de este gradiente de densidad es mantener el pulso de láser enfocado cerca del eje del capilar (es decir, "guiar" el pulso de láser por el canal de plasma formado de esa manera) por medio de la refracción (la luz tenderá a curvarse hacia fuera desde la región de mayor densidad hacia la región de menor densidad). Cualquier efecto de difracción que tienda a causar la divergencia radial del pulso de láser tenderá de esa manera a compensarse por las propiedades de refracción del canal de plasma. Este enfoque continuo del pulso de láser se indica esquemáticamente mediante flechas 4 en la Figura 1B (y también en la Figura 2B - véase posteriormente) y es el principio básico de un tipo de canal de plasma o guía de ondas.

Las Figuras 2A y 2B muestran las vistas correspondientes del capilar 2 lleno de plasma de las figuras 1A y 1B después de que se haya disparado un pulso de láser 6 por el capilar 2. Las partículas cargadas se inyectan desde el dispositivo 10 en la estela 8 del pulso de láser 6 mientras el pulso de láser 6 pasa por un punto de inyección en el capilar 2 de modo que sean aceleradas por la estela como se ha descrito anteriormente. La inyección de partículas cargadas se puede conseguir bien por inyección de un rayo de partículas cargadas producido externamente a partir de un acelerador convencional (como se muestra), o bien a través de inyección "completamente óptica", provocada, por ejemplo, por un gradiente de densidad inducido por la estructura longitudinal del capilar 2. El paso del pulso de láser desplaza las partículas cargadas satisfactoriamente inyectadas y hace que oscilen en la fase y la velocidad de fase correctas para que sean capturadas por la estela y aceleradas a altas energías (el último método se describe con mayor detalle posteriormente).

Los paquetes acelerados de partículas cargadas se pueden usar para producir radiación de alta frecuencia tal como rayos X, que puede ser útil en numerosas aplicaciones. Como se ha discutido anteriormente, este proceso de conversión se puede llevar a cabo pasando las partículas cargadas aceleradas a través de un ondulator que consiste en una disposición de imanes permanentes configurada para causar que el rayo de partículas cargadas experimente desplazamientos transversales periódicos a medida que pasa entre ellos. Sin embargo, una disposición de imanes permanentes es cara, inflexible y de frecuencia limitada.

Las Figuras 3 y 4 muestran onduladores de acuerdo con una realización de la presente invención, en los que la estela de un pulso de láser aplica una fuerza ondulante sobre las partículas cargadas que son aceleradas dentro de

este. Una vía para poder conseguir esto es doblando o de otro modo formando el capilar 2 con una forma ondulante como se muestra en la Figura 3, lo que causa una variación periódica en el canal de plasma formado en el capilar que a su vez forzará al pulso de láser y a su estela a ondular (es decir, a desplazarse periódicamente en una dirección transversal) a medida que se propagan a través de la guía de ondas (indicada esquemáticamente mediante las flechas 12). La estela de plasma ondulante ejerce una fuerza transversal que cambia periódicamente sobre las partículas cargadas inyectadas en la estela.

Se pueden usar diversas formas de canal para provocar el movimiento ondulante de la estela. Estas pueden incluir alteraciones discretas o "baches" 14, como se muestra en la Figura 3, o pueden comprender un perfil de sección continuo, que tenga por ejemplo una forma de sección básicamente sinusoidal (no mostrado). Una alternativa adicional podría ser helicoidal, que se podría usar para producir luz polarizada circularmente, lo que sería una gran ventaja para algunas aplicaciones.

En términos generales, la función principal del canal que varía periódicamente es causar que el láser siga una ruta similar y por lo tanto, a través de las fuertes fuerzas transversales de la estela, guiar el paquete de partículas cargadas también a lo largo de una ruta similar (de la misma manera que un trineo seguiría una pista de nieve que se curva periódicamente, extendiendo la analogía usada anteriormente).

Se puede conseguir una ondulación similar de la estela de plasma al introducir el pulso de láser en el canal de la guía de ondas ligeramente fuera de eje, como se ilustra en la Figura 4 (representando la flecha 18 el pulso de láser y representando la línea de puntos 16 el eje longitudinal del canal 2). El efecto es producir un modo de sacudir el pulso de láser, lo que causa efectivamente que el pulso de láser se desvíe periódicamente del eje 16 a medida que se propaga por el canal 2. Se puede usar una combinación de las disposiciones de las Figuras 3 y 4 para el ajuste preciso del movimiento transversal de los paquetes de partículas cargadas.

Con cualquiera de los dos enfoques anteriores que se adopte, la aceleración transversal de las partículas cargadas en el canal 2 produce radiación electromagnética, de la misma manera que un rayo de partículas cargadas en un dispositivo de inserción de ondulator en un anillo de almacenamiento de sincrotrón (cuyo ondulator emplearía típicamente una disposición de imanes permanentes, por ejemplo, para dirigir las aceleraciones transversales de las partículas cargadas).

La Figura 5 muestra un aparato generalizado para llevar a cabo el método anterior. Se proporciona un capilar 2 en el que se puede introducir un gas. Se proporciona un circuito de descarga 34 que pase una descarga eléctrica a través del gas para formar un canal de plasma dentro del capilar. Los detalles específicos de tal disposición se pueden encontrar en el artículo *Investigation of a hydrogen plasma waveguide*, D. J. Spence y S. M. Hooker, *Phys. Rev. E* 63, 015401 (R), que se incorpora en el presente documento como referencia en su totalidad.

En este ejemplo, el capilar 2 tiene un diámetro del orden de 200  $\mu\text{m}$  (más generalmente, se prevé que pueda ser útil un intervalo de diámetros de capilar de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ ) y una longitud de varios centímetros, y puede comprender un tubo hueco o formarse por mecanizado con láser de canales/ranuras en forma de U en la superficie de dos placas y juntando las dos placas para formar un capilar. Los detalles adicionales de cómo se pueden crear los canales de plasma, incluyendo el método de mecanizado con láser de los capilares y las entradas de gas, etc., se pueden encontrar en D.A. Jaroszynski, y col. *Phil. Trans. R. Soc. A*, Vol. 364, N° 1840 / 15 de marzo de 2006, páginas -689 - 710-, que se incorpora en presente documento como referencia en su totalidad. Los materiales adecuados para el tubo o las placas son alúmina o zafiro, u otros materiales para altas temperaturas. Se introduce gas hidrógeno en el capilar 2, a través de agujeros con un diámetro del orden de 100  $\mu\text{m}$  que se han mecanizado con láser cerca de cada extremo, de modo que la densidad de hidrógeno sea constante entre estos puntos de inyección de gas. Una disposición alternativa podría ser de inyectar gas a diferentes presiones en cada extremo del capilar 2. Esto podría proporcionar un flujo de gas a lo largo del capilar 2 que produciría un pequeño gradiente longitudinal en la densidad de plasma; tales gradientes pueden ser útiles para "igualar la fase" de la aceleración, aunque no serían suficientes para inducir la inyección de partículas cargadas. Los electrodos 36 localizados en cada extremo del capilar permiten que se dispare un pulso de descarga a través del capilar 2 mediante el circuito de descarga 34, ionizando de esta manera el gas en el interior del mismo. El pulso de descarga se dirige mediante un capacitor con una capacitancia del orden de 2 nF, cargado con una tensión inicial de aproximadamente 20 kV. La corriente de descarga resultante tiene un pico de varios cientos de amperios y un período medio del orden de 200 ns.

La fuente de láser 32 se configura para introducir un pulso de láser en el canal 2 (bien en el eje o bien fuera de eje) una vez que se ha establecido el plasma. En la práctica, esto se puede hacer usando un espejo o lente para enfocar el rayo láser en la parte deseada del capilar 2.

La fuente de partículas cargadas 10 se proporciona para inyectar las partículas cargadas que se van a acelerar por la estela del pulso de láser en el capilar 2. Alternativa y/o adicionalmente, las partículas cargadas se pueden inyectar a partir del propio plasma al proporcionar desviaciones localizadas en la sección transversal del capilar 2 (véase posteriormente). Se puede proporcionar una sección de ondulator 30 en el extremo de salida del canal 2 para aplicar un movimiento periódico transversal al rayo de partículas cargadas para producir la radiación (por ejemplo,

rayos X). Las partículas cargadas pueden continuar acelerándose a medida que se propagan a través de la sección de ondulator 30 de modo que la separación espacial entre las ondulaciones puede tener que aumentar (teniendo en consideración efectos relativistas, por supuesto) el movimiento de izquierda a derecha a lo largo de la sección de ondulator 30 si la frecuencia de la radiación que se genera se va a mantener constante en el marco de referencia del laboratorio. Una cuestión importante es que el doble desplazamiento Doppler cambiará a medida que las partículas cargadas alcancen mayor energía, lo que tenderá a desplazar la frecuencia de la radiación hacia valores mayores. Este efecto se puede compensar aumentando la periodicidad de "ondulador" de modo que la frecuencia de la radiación de salida permanezca constante.

5  
10 También puede haber aplicaciones en las que sería útil permitir cambios en la frecuencia generada a medida que las partículas cargadas se propagan a través del ondulator. Por ejemplo, esto podría permitir que se genere radiación de amplio ancho de banda que se podría comprimir posteriormente para generar pulsos de duración muy corta.

De esa manera, la manipulación del período del ondulator (con un período constante o variable) se puede usar para controlar las propiedades detalladas del espectro de la radiación de salida.

Aunque la parte que produce aceleración del canal 2 y la sección ondulator 30 se muestran como elementos separados en la realización de la Figura 5, también se pueden combinar en un canal único.

20 De acuerdo con una realización de la presente invención, la inyección de las partículas cargadas en la estela del pulso de láser se consigue provocando la aceleración de partículas cargadas a partir del propio plasma. Esto se puede conseguir creando una desviación en la sección transversal del capilar 2. La desviación en la sección transversal del capilar 2, que está localizada en el sentido de ser una extensión espacial corta a lo largo de un eje longitudinal de la guía de ondas (es decir, a lo largo de la dirección de propagación del pulso de láser), causa una desviación localizada correspondiente en la densidad del plasma. Esta desviación de la densidad localizada provoca la unión de un gran número de partículas cargadas (un "paquete") en la estela del pulso de láser que pasa (de modo que sean aceleradas y permanezcan en la estela a medida que se mueven por el capilar 2) y la aceleración de las partículas cargadas inyectadas de esa manera se puede mantener durante una larga distancia dado que el pulso de láser se canalizará por el canal de plasma formado en el capilar 2 (por ejemplo, debido a los efectos de refracción del gradiente de densidad radial inducido por la temperatura en el plasma). La técnica permite un alto nivel de control de las propiedades del rayo de partículas cargadas de salida tal como las fluctuaciones de energía de salida (es decir, la "fluctuación") y la dispersión de energía de los paquetes de partículas cargadas de salida.

35 La desviación en la sección transversal del capilar 2 puede tomar un determinado número de formas diferentes. Por ejemplo, las desviaciones se pueden localizar en el sentido en que la longitud del capilar durante la que cambia la forma de la sección transversal del capilar sea pequeña en comparación con la longitud del capilar 2. El efecto de esta disposición es causar un cambio espacialmente brusco o repentino en la densidad del plasma en la región de la desviación. La forma del capilar puede ser idéntica en cualquiera de los lados de la desviación o puede ser diferente (por ejemplo, cuando la desviación es un cambio de etapa en el área de sección transversal del capilar).

40 La Figura 6 muestra una disposición de ejemplo. El gas que se va a ionizar para producir el plasma en el capilar 2 se introduce a través de los tubos de entrada de gas 22 y 24 formados en el sustrato 48 (estando indicada la dirección del flujo de gas por las flechas 23) y abandona el capilar 2 a través de los puertos de salida de gas 26 y 28 (estando indicada la dirección del flujo de gas por las flechas 27). Se puede proporcionar y controlar el flujo de gas por medio de un controlador de flujo de gas 50. La desviación localizada en este ejemplo comprende un aumento localizado 20 en el área de sección transversal del capilar 2. Para el ejemplo particular mostrado, el diámetro 42 del capilar 2 es de 210 micrómetros y el diámetro 40 del aumento localizado 20 es de 420 micrómetros. Sin embargo, los diámetros y/o la longitud de la desviación localizada se pueden variar para conseguir una inyección óptima de partículas cargadas. Esta disposición conduce a un cambio brusco en la densidad longitudinal (también denominada "axial") del canal de plasma formado en el capilar 2 a través de una combinación de cambios en el flujo de calor a la pared del capilar 2 y de cambios en la manera en que fluye el gas a través del capilar 2 relacionados con la desviación localizada 20.

55 La Figura 7 muestra una realización alternativa que incluye una disposición similar de los puertos de entrada de gas 22/24, los puertos de salida 26/28, el flujo de gas 23/27 y el capilar 2 a la de la Figura 6 (se han usado los mismos numerales de referencia para representar características análogas). Sin embargo, en esta realización, la desviación localizada comprende una sección adicional del capilar 21 que se extiende lateralmente hacia fuera del capilar 2 por el que el pulso de láser se propagará en uso. En el ejemplo mostrado, la sección adicional del capilar 21 se extiende hacia fuera del capilar 2 en dos direcciones (hacia arriba y hacia abajo en la Figura 7), pero también se puede concebir que la sección adicional 21 sólo se extienda hacia fuera en una única dirección. Cuando se dispara la descarga eléctrica por el capilar 2, se fuerza al plasma hacia arriba en este capilar adicional 21 lo que conduce al cambio localizado brusco requerido en la densidad longitudinal del plasma.

60 La Figura 8 muestra una realización adicional, que hace uso de un patrón de flujo diferente para el gas que se va a ionizar. En este ejemplo, solo se proporciona un único puerto de entrada de gas 22 con dos puertos de salida de gas 26 y 28 para producir un flujo constante del gas que se va a ionizar en el capilar 2. La desviación localizada consiste en este caso en un cambio de etapa 44 en el área de sección transversal del capilar 2. En efecto, el capilar 2 consta



de dos secciones, una primera con un diámetro menor 42 (de 210 micrómetros en el ejemplo particular ofrecido) y una segunda con un diámetro mayor 46 (de 460 micrómetros en el ejemplo particular ofrecido). Se hace que el gas fluya continuamente sobre el cambio de etapa 44 antes de que se dispare la descarga eléctrica, estabilizando de esa manera la densidad inicial del gas que varía a lo largo del eje del capilar 2 (que no es el caso en las realizaciones de las Figuras 6 y 7). Cuando se dispara la descarga eléctrica, la variación de la densidad inicial del gas se traduce en la correspondiente variación de la densidad longitudinal del plasma.

También pueden ser adecuadas otras formas de desviación localizada, por ejemplo desviaciones con un perfil cónico (es decir, comprendiendo una sección transversal que cambia continuamente durante una longitud corta (localizada) del capilar 2), o desviaciones con una sección transversal que varía helicoidalmente (u otra desviación azimutalmente no uniforme). En términos generales, las desviaciones deberían ser tales que perturben la densidad del plasma en la región de la desviación de manera que provoquen la inyección de partículas cargadas en la estela del pulso de láser que pasa a través del canal 2.

Los paquetes de partículas cargadas arrastrados en la estela de un pulso de láser en el capilar 2 se someten a fuerzas eléctricas que aumentan la energía del paquete. Normalmente, el capilar 2 se dispondrá de modo que los paquetes de partículas cargadas sean acelerados continuamente desde un punto de inyección (en el que se inyectan las partículas cargadas) a un punto de salida (en el que las partículas cargadas escapan del capilar 2). La energía de salida de un paquete de partículas cargadas en tal disposición dependerá por lo tanto, para un pulso de láser determinado, de la distancia entre los puntos de inyección y de salida.

Un capilar 2 se puede configurar para paquetes de salida de partículas cargadas con diferentes energías de salida controlando el punto del canal en el que se inyectan las partículas cargadas en la estela del pulso de láser. Los paquetes de partículas cargadas insertados en la estela más pronto en su trayectoria a través del capilar 2 serán acelerados más que las partículas cargadas inyectadas en la estela más tarde. La Figura 9 muestra esquemáticamente como se podría configurar un capilar 2 para paquetes de partículas cargadas de salida con tres energías diferentes, que corresponden a cada una de las tres desviaciones localizadas longitudinalmente 20, que provocan la inyección de partículas cargadas en cada uno de los puntos A, B y C. Para pulsos de láser que viajan de izquierda a derecha en la figura, las partículas cargadas inyectadas en el punto A tendrán la mayor energía, siguiendo a continuación las partículas cargadas inyectadas en el punto B, teniendo las partículas inyectadas en el punto C la menor energía.

La discusión anterior supone que las partículas cargadas inyectadas se aceleran durante su trayectoria completa a lo largo del capilar 2, lo que se prevé que será la disposición normal. Sin embargo, este no siempre puede ser el caso, dependiendo de lo lejos que se hagan viajar las partículas cargadas por el capilar 2. Si no se toman contramedidas, por ejemplo, las partículas cargadas aceleradas (que alcanzan rápidamente velocidades cercanas a la velocidad de la luz en el vacío) podrán adelantar con el tiempo al pulso de láser que se propaga a una velocidad menor a través del plasma (o al menos adelantarse con respecto al pulso de láser a un punto en la estela que ya no está en un campo eléctrico de aceleración), un fenómeno conocido como "desfase" que interrumpirá la aceleración del paquete de partículas cargadas.

Como se ha mencionado anteriormente, el problema del desfase se puede abordar estableciendo una densidad de plasma en el capilar que cambie gradualmente en la dirección longitudinal (que se opone al cambio localizado brusco que se necesita para la inyección de partículas cargadas en la estela del pulso de láser). Tal cambio gradual puede tener lugar durante una parte importante de la trayectoria del pulso de láser, por ejemplo, que generalmente supondrá una distancia considerablemente (es decir muchas veces) más larga que el período espacial de las ondulaciones en una fuente de radiación de capilar o que la extensión longitudinal de las desviaciones localizadas en un inyector. La Figura 10 muestra un ejemplo de cómo se podría conseguir esto durante la sección de un capilar uniforme 2, con la entrada de gas a través del puerto de entrada 22 y la salida a través de los puertos de salida de 26 y 28. En la disposición mostrada, la densidad del gas antes de que se dispare la descarga eléctrica se puede estimar teóricamente. En particular, para la mayoría de los capilares 2, suponiendo que el flujo es viscoso, laminar e incomprensible, la variación de presión dentro del capilar se puede escribir mediante la expresión:

$$P(z) = P(z_g) \sqrt{\frac{z}{z_g}}$$

en la que z es la distancia desde el puerto de salida de gas 26 o 28 y z<sub>g</sub> es la distancia desde el puerto de entrada de gas 22 al puerto de salida de gas 26 o 28. P(z<sub>g</sub>) es la presión inicial en el puerto de entrada de gas 22. Esta disposición produce por lo tanto una densidad de gas que cambia gradualmente durante una región extendida del capilar 2 que, cuando se dispara la descarga eléctrica, produce un canal de plasma con una densidad de plasma que también varía gradualmente a lo largo de la longitud del capilar 2.

En el ejemplo mostrado en la Figura 10, el puerto de entrada de gas 22 está localizado en el centro del capilar 2 pero son posibles otras disposiciones que aún permiten que se forme una densidad de plasma que cambie gradualmente. Una variación adicional posible podría ser añadir puertos de entrada de gas adicionales a lo largo de la longitud del capilar 2, que podría hacer posible controlar el perfil longitudinal de la densidad inicial de gas, y por lo tanto la densidad longitudinal de plasma una vez que se haya disparado la descarga, más precisamente.

Tanto las densidades de plasma que aumentan gradualmente (es decir, que aumenta a lo largo de la dirección de propagación del pulso de láser) como las densidades de plasma que disminuyen gradualmente pueden ser útiles para mejorar el rendimiento de los aceleradores de plasma que funcionan con láser. Por ejemplo, las densidades de plasma que aumentan gradualmente serían eficaces generalmente para superar el desfase, mientras que las densidades de plasma que disminuyen gradualmente serían eficaces generalmente para reducir la dispersión de energía de un paquete de partículas cargadas aceleradas.

En los ejemplos anteriores, las partículas cargadas en cuestión son habitualmente electrones y/o positrones, pero también se pueden usar otras partículas cargadas.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método de producción de radiación electromagnética, que comprende:

5 formar un canal de plasma en un capilar (2);  
 disparar un pulso de láser (6) a través del canal de plasma;  
 disponer un grupo de partículas cargadas para que se inyecten en una estela de densidad de plasma (8) del  
 pulso de láser (6) de modo que sean aceleradas por la estela (8); y  
 10 disponer el canal de plasma y el disparo del pulso de láser de modo que la estela (8) del pulso de láser (6)  
 ejerza una fuerza transversal sobre el grupo inyectado de partículas cargadas que varíe periódicamente a  
 medida que el pulso de láser (6) se propaga a lo largo de la longitud del canal, causando la aceleración  
 transversal resultante del grupo de partículas cargadas la emisión de dicha radiación electromagnética.

15 2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el pulso de láser (6) se dispara en el canal de plasma  
 fuera de eje para que cause de manera eficaz una desviación transversal periódica del pulso de láser (6) y de su  
 estela (8) a medida que el pulso de láser (6) se propaga a lo largo de la longitud del canal.

20 3. Un método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el pulso de láser (6) se dispara en el canal de plasma en  
 una posición separada radialmente del eje central longitudinal del canal, en un ángulo oblicuo al eje central  
 longitudinal del canal, o una combinación de los mismos.

25 4. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el canal de plasma tiene una  
 forma, inducida por la forma del capilar (2), que causa una desviación transversal periódica del pulso de láser (6) y  
 de su estela (8) a medida que el pulso de láser (6) se propaga a lo largo de la longitud del canal.

30 5. Un método de acuerdo con la reivindicación 4, en el que la forma del capilar (2) comprende al menos una de las  
 siguientes: ondulaciones de sección transversal longitudinal básicamente sinusoidal, desviaciones localizadas en la  
 sección transversal separadas longitudinalmente, desviaciones helicoidales en la sección transversal, y ondulaciones  
 de sección transversal longitudinal de onda cuadrada.

35 6. Un método de acuerdo con la reivindicación 5, en el que varía longitudinalmente una periodicidad espacial en la  
 forma del capilar (2) de modo que consigue:

una frecuencia de desviación transversal básicamente constante; o  
 una frecuencia de desviación transversal que varía básicamente a medida que el pulso de láser (6) se propaga  
 por el canal de plasma.

40 7. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la etapa de disponer un  
 grupo de partículas cargadas para que se inyecten en una estela (8) del pulso de láser (6) comprende:

producir un grupo de partículas cargadas externamente al canal e inyectarlas en el canal; o  
 provocar la extracción de un grupo de partículas cargadas a partir del plasma mediante la estela (8) del pulso  
 de láser (6).

45 8. Una fuente de radiación electromagnética, que comprende:

un capilar (2) adecuado para la creación de un canal de plasma;  
 una fuente de láser (32) dispuesta para disparar un pulso de láser (6) a través del canal de plasma; y  
 50 medios para la inyección de un grupo de partículas cargadas en una estela de densidad de plasma (8) del  
 pulso de láser (6) de modo que el grupo sea acelerado por la estela (8), en la que  
 la fuente de láser (32) y el canal se disponen de modo que en uso la estela (8) del pulso de láser (6) ejerza una  
 fuerza transversal sobre el grupo inyectado de partículas cargadas que varíe periódicamente a medida que el  
 pulso de láser (6) se propaga a lo largo de la longitud del canal, causando la aceleración transversal resultante  
 55 del grupo de partículas cargadas la emisión de dicha radiación electromagnética.

9. Una fuente de radiación electromagnética de acuerdo con la reivindicación 8, configurada para llevar a cabo un  
 método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.

60 10. Una fuente de radiación electromagnética de acuerdo con la reivindicación 8 o 9, en la que:

dichos medios para la inyección de un grupo de partículas cargadas comprenden una desviación localizada  
 longitudinalmente en la sección transversal del capilar (2) que, en uso, causa una desviación correspondiente  
 en la densidad del plasma, siendo dicha desviación en la densidad del plasma tal que cause la inyección de un  
 grupo de partículas cargadas desde el plasma a la estela (8) del pulso de láser (6) en la región de la desviación  
 65 en el capilar (2) de modo que el grupo sea acelerado por la estela (8).

11. Un aparato de acuerdo con la reivindicación 10, que comprende además:

5 un controlador de flujo de gas (50) dispuesto para establecer un flujo de gas a lo largo de dicho capilar (2); y un circuito de descarga para pasar una descarga eléctrica a través del flujo de gas para formar un canal de plasma dentro del capilar (2), en el que dicha desviación localizada comprende un cambio de etapa en el diámetro del capilar.

12. Un aparato de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 10 a 11, en el que:

10 una posición de dicha desviación en el capilar (2) determina una energía final para el grupo acelerado de partículas cargadas;  
dicho capilar (2) comprende al menos una desviación localizada longitudinalmente adicional en su sección transversal que, en uso, causa al menos una desviación adicional correspondiente en la densidad del plasma, siendo cada una de dichas desviaciones adicionales en la densidad del plasma tales que causen la inyección  
15 de un grupo adicional de partículas cargadas desde el plasma a la estela (8) del pulso de láser (6) en la región de la desviación adicional en el capilar (2) de modo que cada grupo adicional sea acelerado por la estela (8);  
grupos de partículas cargadas inyectados en diferentes desviaciones en el capilar (2) sean acelerados a diferentes energías finales, determinando las posiciones de las respectivas desviaciones longitudinales dichas energías finales; y/o  
20 dicho capilar (2) se dispone de modo que en uso la densidad del plasma para un tiempo determinado aumenta gradualmente o disminuye gradualmente en función de la posición a lo largo de una porción longitudinal extendida del capilar (2).

25 13. Un aparato de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12, en el que dicha desviación o desviaciones comprenden:

un cambio localizado en el área de sección transversal del capilar (2);  
un aumento localizado en el área de sección transversal;  
una sección adicional de capilar que se ensancha en el interior, y se extiende lateralmente hacia afuera de, el  
30 capilar por el que se propaga la el pulso de láser (6); y/o  
al menos uno de los siguientes: una desviación de sección transversal helicoidal, y una desviación de sección transversal cónica.

FIGURA 1A

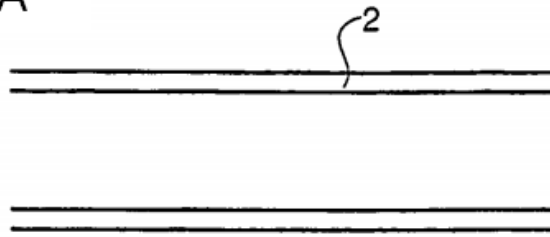


FIGURA 1B



FIGURA 2A

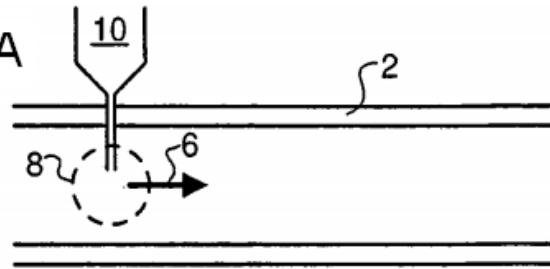


FIGURA 2B



FIGURA 3

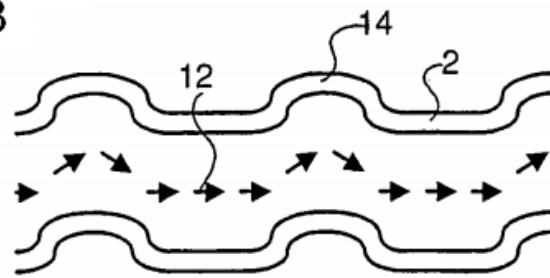


FIGURA 4

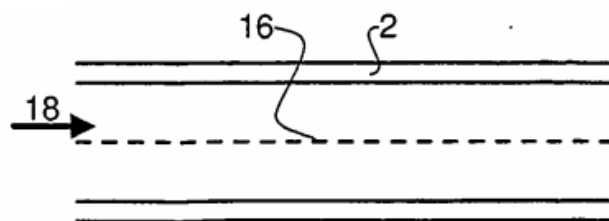


FIGURA 5

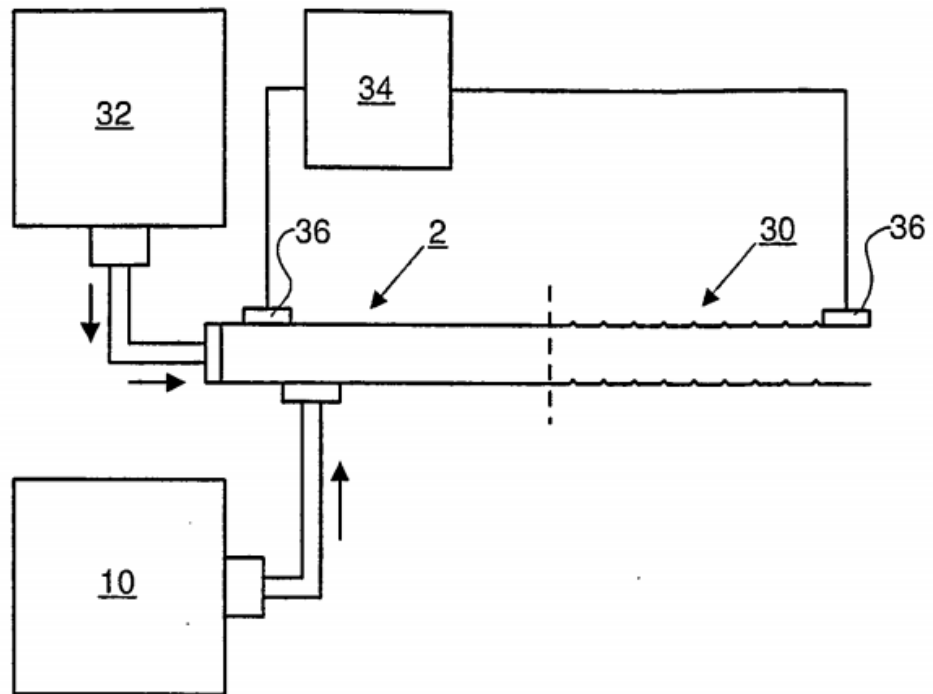


FIGURA 6

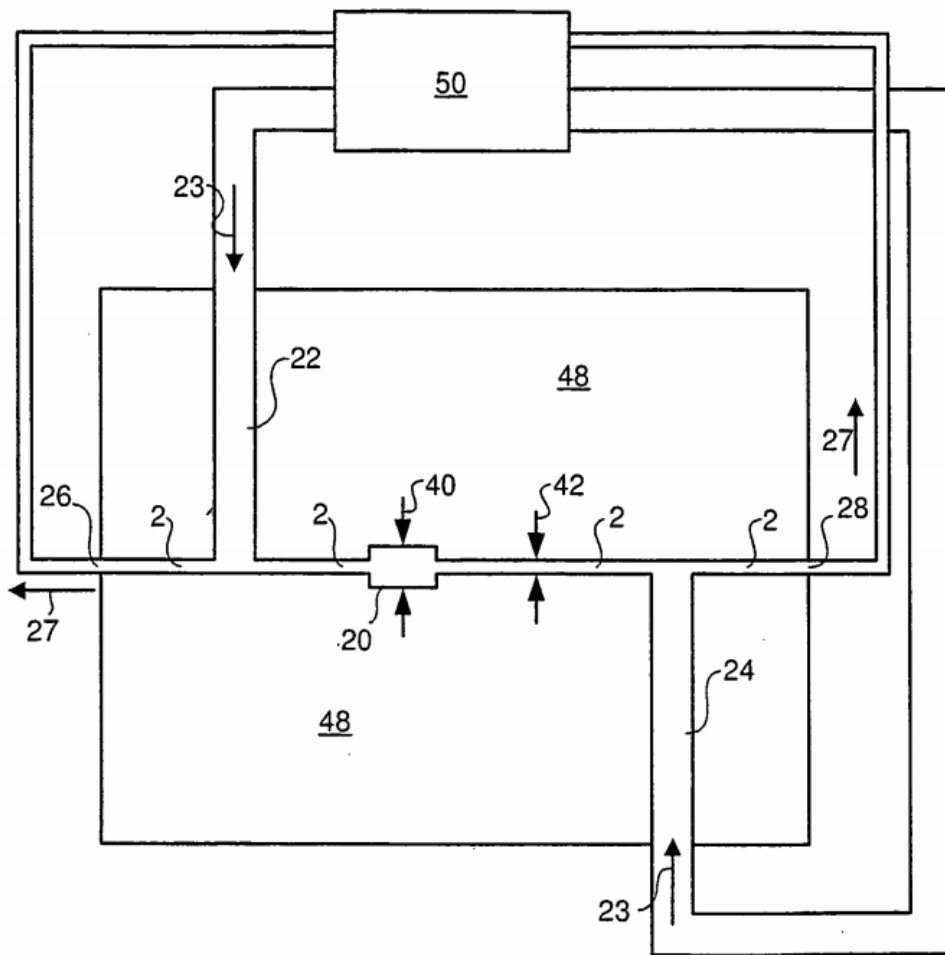


FIGURA 7

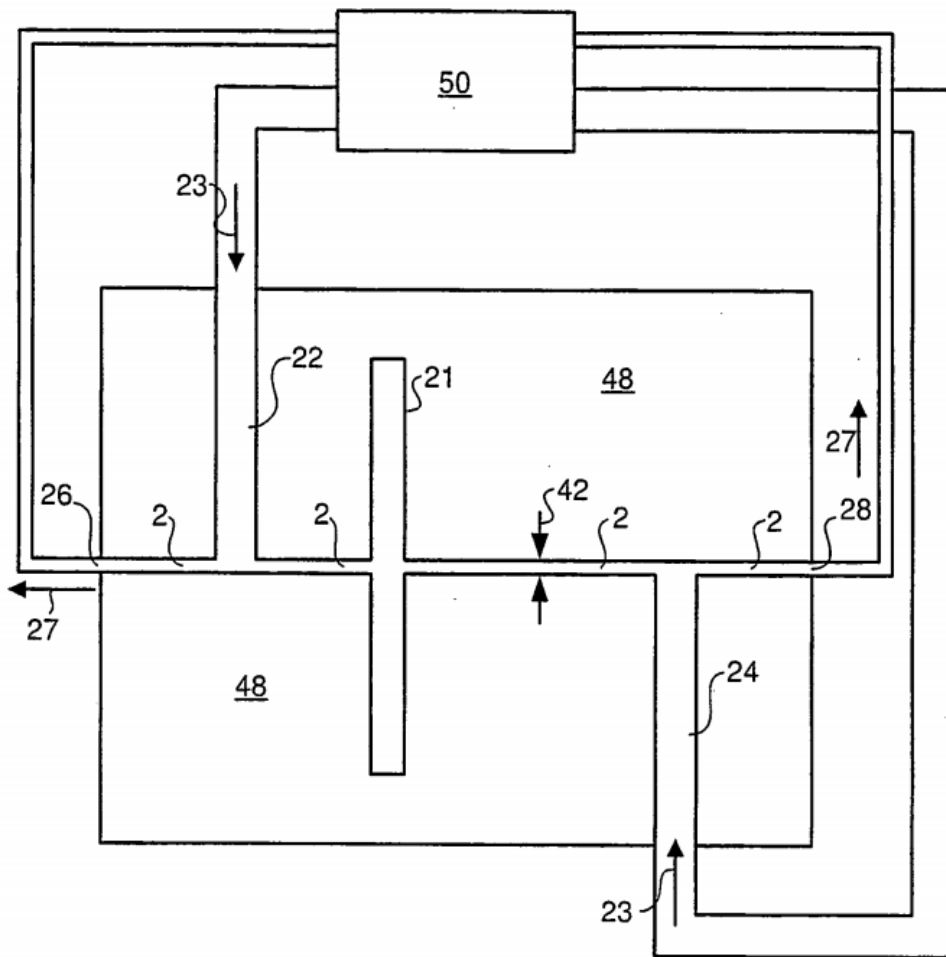




FIGURA 8

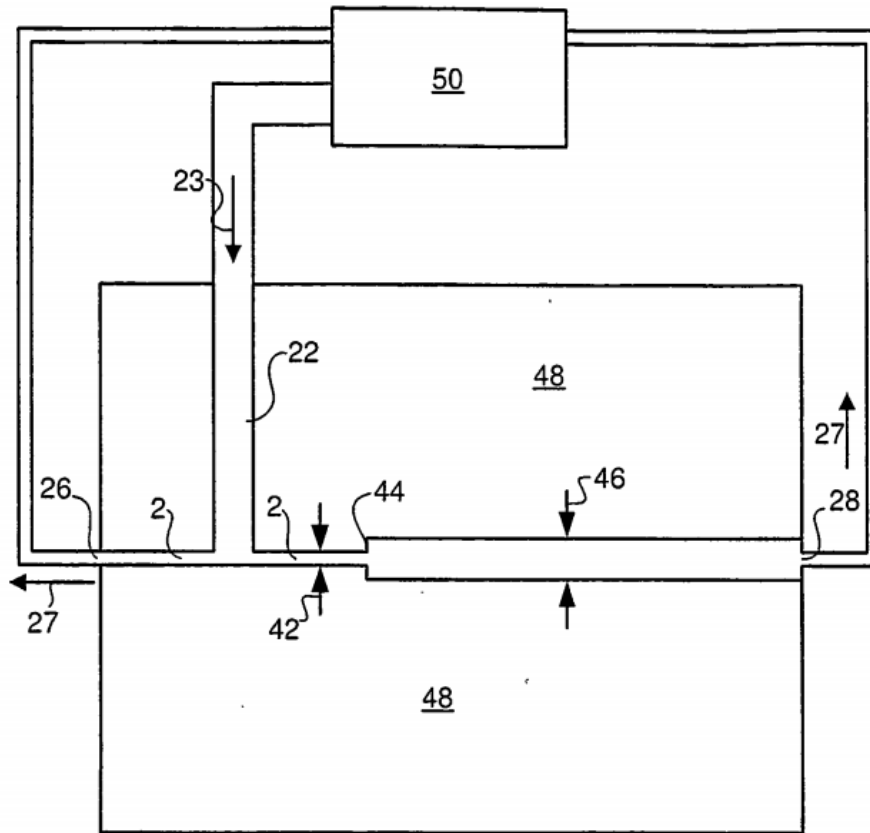


FIGURA 9

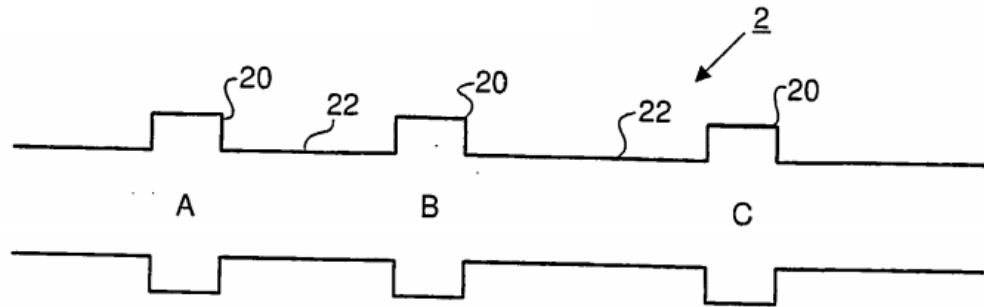


FIGURA 10

