

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 801 976**

51 Int. Cl.:

H01J 49/16 (2006.01)

G21G 1/10 (2006.01)

H01J 27/24 (2006.01)

H05H 6/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.12.2009 PCT/IL2009/001201**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.06.2010 WO10070648**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.12.2009 E 09796829 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.04.2020 EP 2377143**

54 Título: **Sistema para la generación de iones rápidos y procedimiento para el mismo**

30 Prioridad:

18.12.2008 US 138533 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.01.2021

73 Titular/es:

**YISSUM RESEARCH DEVELOPMENT COMPANY
OF THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM,
LTD. (100.0%)
Hi Tech Park Edmond Safra Campus Givat Ram
Jerusalem 91390, IL**

72 Inventor/es:

**ZIGLER, ARIE;
EISENMANN, SHMUEL y
PALCHAN, TALA**

74 Agente/Representante:

CONTRERAS PÉREZ, Yahel

ES 2 801 976 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

Sistema para la generación de iones rápidos y procedimiento para el mismo

5 CAMPO DE LA INVENCION

Esta invención se refiere a un sistema para generar iones rápidos y a su procedimiento.

10 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Los haces de iones rápidos son de interés para diversas aplicaciones, incluyendo la producción de isótopos radiactivos, producción de neutrones, radiografía, fusión, y diversas formas de radioterapia.

15 Los haces de iones rápidos se producen típicamente en aceleradores de varias configuraciones, tales como ciclotrones o sincrotrones. Los aceleradores son máquinas relativamente grandes y caras las cuales son costosas de hacer funcionar y mantener. El desarrollo de láseres que son capaces de proporcionar intensidades y campos eléctricos extremadamente elevados ha estimulado la investigación en la exposición de materia a campos eléctricos de luz láser para generar iones rápidos e interés en utilizar láseres para proporcionar fuentes de iones rápidos relativamente económicos.

20 US 6.906.338 describe el uso de pulsos láser "que tienen una longitud de pulso entre aproximadamente 1 y 500 femtosegundos (fs)" concentrados a unas densidades de energía de entre aproximadamente 10^{18} y aproximadamente 10^{23} Vatios/cm² (W/cm²) para producir un elevado flujo de iones energéticos, tales como protones, que pueden utilizarse con fines médicos. Los pulsos son dirigidos para interactuar con objetivos de varios diseños y proporcionar componentes de radiación que "incluyen diferentes especies de iones (por ejemplo, protones), rayos X, electrones, restos del pulso 102 y diferentes componentes de energía (por ejemplo, unidades de MeV, decenas de MeV, y centenas de MeV dentro de una determinada banda o ventana de energía)". Los objetivos pueden comprender una capa de lámina delgada para absorber energía de prepulso de los pulsos. Un sistema de transporte de haz permite que iones, tales como protones, producidos en el objetivo y que tienen una emisividad de haz y energía predeterminadas se propaguen a un "campo de tratamiento" para aplicaciones terapéuticas. La patente describe objetivos que son cóncavos en un lado del objetivo curso abajo respecto a una dirección de propagación de los pulsos láser y pueden formarse presentando ranuras, o que comprendan fibras, clústeres, o espumas. "El tamaño de las ranuras, 402, las fibras 404, los clústeres 406 o las espumas 408 puede diseñarse para que sea más corto que el desplazamiento de los electrones en el campo del pulso (menor de aproximadamente 1 micra)".

35 US 2002/090194 A1 describe, de manera similar, la generación de iones rápidos dirigiendo un láser a una superficie nano-estructurada aleatoriamente.

40 El artículo "*Fast ion beams from intense, femtosecond laser irradiated nanostructured surfaces*"; de Bagchi y otros, Applied Physics B 88, 167-173 (2007) también describe esta cuestión y, además, el rendimiento de iones a partir de la irradiación de un sustrato recién pulido.

DESCRIPCIÓN GENERAL

45 Un artículo, "*Efficient Coupling of High Intensity Short Laser Pulses into Snow Clusters*"; de T. Palchan y otros; Applied Physics Letters 90, 041501 (2007); publicado en línea el 24 de enero de 2007 por algunos de los mismos inventores de la presente invención, cuya descripción se incorpora aquí por referencia, describe el acoplamiento de luz láser intensa a un objetivo que comprende "copos de nieve alargados de menor diámetro que la longitud de onda del láser". Los copos de nieve se forman en un sustrato de zafiro (Al₂O₃) situado en una cámara de vacío y enfriado a menos de -70° C. Los inventores encontraron que aproximadamente un 94% de la energía en pulsos de luz láser de longitud de onda a 800 nm concentrada en los copos de nieve a unas intensidades de entre aproximadamente 1×10^{15} W/cm² y aproximadamente 2×10^{16} W/cm² era absorbida por los copos de nieve. Los pulsos tenían un ancho de pulso de aproximadamente 150 fs y una relación de contraste de aproximadamente 10^{-3} .

55 Otro artículo "*Generation of Fast Ions by an Efficient Coupling of High Power Laser Into Snow Nanotubes*"; de T. Palchan y otros; Applied Physics Letters 91, 251501 (2007); publicado en línea el 18 de diciembre de 2007 por algunos de los mismos inventores que los inventores de la presente invención, describe la "generación de iones rápidos durante la interacción de un pulso láser corto a intensidad moderada, $I \sim 10^{16} - 10^{17}$ W/cm², con nanotubos de nieve". El artículo, cuya descripción se incorpora aquí por referencia, señala que en la interacción se generó oxígeno de tipo H y tipo He con una energía cinética de hasta 100 keV. El objetivo de los nanotubos de nieve "eran clústeres de nieve ... que se formaron depositando vapor de H₂O al vacío sobre una placa de zafiro (Al₂O₃) de 1 mm de grosor a una temperatura de 100 K. Los clústeres de nieve se depositaron aleatoriamente para formar una capa

sobre el sustrato de zafiro de aproximadamente 100 micras de grosor y comprendían un "clúster alargado con un tamaño característico en el intervalo de 0,01 – 0,1 μm ".

5 Los inventores han encontrado que, para una intensidad de radiación electromagnética coherente de alta potencia determinada, un objetivo no orientado (T) tal como se describe en los artículos mencionados anteriormente, la interacción con el haz de radiación tiende a producir flujos relativamente grandes de iones de energía relativamente elevada.

10 Los inventores han creado ahora objetivos con patrones orientados (OPT) y han investigado la interacción de dicho objetivo con patrones orientados (OPT) y con radiación electromagnética incidente. El patrón en una superficie del sustrato objetivo tiene características de patrón (denominadas "características alargadas") que tienen ciertos ejes longitudinales que están orientados de manera uniforme a lo largo de cierto eje común. Dichas características de patrón del OPT pueden estar constituidas por elementos similares a hilos, por ejemplo, nano-hilos, filamentos, etc. Estas características de patrón orientado presentan una rugosidad en la superficie del OPT, cuya rugosidad puede implementarse o no como un relieve de superficie continuo.

15 El uso de dicho OPT permite optimizar un(os) parámetro(s) de la radiación electromagnética incidente para mejorar la eficiencia del acoplamiento de radiación en el OPT contribuyendo a la creación de iones rápidos con una elevada energía cinética. Dichos parámetros optimizables incluyen un ángulo de incidencia de un haz de radiación electromagnética sobre la superficie del OPT y/o la polarización del haz incidente. Tal como se describirá más adelante, el ángulo de incidencia es un denominado "ángulo rasante", es decir, un ángulo menor de 45° entre el eje de propagación del haz y la superficie del OPT (o mayor de 45° en el significado de "ángulo incidente" siendo un ángulo entre el eje de propagación del haz y el normal a la superficie del OPT). Debe entenderse que el valor óptimo del ángulo rasante (magnitud, así como acimut y elevación) debe seleccionarse adecuadamente y/o variarse gradualmente, de acuerdo con las dimensiones críticas del patrón (incluyendo la profundidad de las ranuras), así como la dirección de orientación, para lograr la generación de un haz de iones rápido óptimo.

20 En cuanto a la radiación electromagnética polarizada, por ejemplo, luz polarizada lineal, debe entenderse que ésta se refiere a luz que tiene una dirección de polarización preferida predeterminada. La dirección de polarización se ha seleccionado relativamente al eje de orientación del OPT, y los flujos y la energía de los iones parecen mejorar en comparación con los objetivos no orientados (T). Por lo tanto, utilizar un objetivo OPT es más eficiente que utilizar objetivos T para producir iones relativamente rápidos a flujos relativamente grandes.

25 Debe entenderse que un objetivo que comprende filamentos orientados aleatoriamente se denomina "objetivo (T)", y que un objetivo que tiene un patrón de superficie que presenta una dirección de orientación preferida se denomina "objetivo con patrón orientado (OPT)".

30 En particular, un pulso láser que tiene una intensidad entre aproximadamente 5×10^{19} W/cm² y aproximadamente 5×10^{20} W/cm² que interactúa con un objetivo OPT produciría una explosión de protones con una energía entre aproximadamente 20 y 200 MeV. La explosión puede comprender más de 10^6 protones, más de 10^7 protones, más de 10^8 protones, más de 10^9 protones o incluso 10^{10} protones.

Por lo tanto, la presente invención presenta un nuevo sistema de acuerdo con la reivindicación 1.

35 En algunas realizaciones, la unidad de haz está adaptada para dirigir el haz de radiación electromagnética sobre la superficie con patrón del sustrato objetivo con un ángulo rasante predeterminado. El ángulo rasante se selecciona de acuerdo con el patrón de manera que la interacción proporcione un acoplamiento eficiente entre el haz de radiación y el sustrato permitiendo la creación de iones rápidos de energía cinética deseablemente elevada.

40 Cabe señalar que, en general, el ángulo rasante se refiere al ángulo entre el haz y la superficie, es decir, 90° menos el ángulo de incidencia. En algunas realizaciones, el ángulo rasante es menor de 45°. En algunas realizaciones, el ángulo rasante se encuentra en el intervalo de aproximadamente 20°-40° (es decir, ángulo de incidencia 50°-70°).

45 El haz electromagnético tiene una dirección de polarización predefinida que define un cierto ángulo entre la dirección de polarización y el eje de orientación de las características del patrón del sustrato objetivo se selecciona de manera que la interacción proporciona un acoplamiento eficiente entre el haz de radiación y el sustrato permitiendo la creación de iones rápidos que tienen una energía cinética deseablemente elevada.

50 Por lo tanto, se selecciona un ángulo entre una dirección de polarización del haz de radiación electromagnética y el eje de orientación de las características del patrón del sustrato objetivo, y el ángulo rasante de manera que la interacción entre el haz de radiación y el sustrato proporcione un acoplamiento eficiente entre la radiación haz y el sustrato que permita la creación de iones rápidos. Con ello, la invención permite proporcionar fuentes de iones que

producen iones en cantidades relativamente grandes. En algunas realizaciones, el ángulo entre la dirección de polarización y el eje de orientación se encuentra en un intervalo de 0° - 30°.

5 El sistema de la presente invención proporciona iones rápidos que tienen energía cinética aproximadamente igual o mayor que por lo menos uno de 5 MeV; 50 MeV; 100 MeV; 150 MeV; 200 MeV.

En algunas realizaciones de la invención, los iones comprenden protones. En algunas realizaciones de la invención, los iones comprenden iones de oxígeno.

10 En algunas realizaciones de la invención, el sistema comprende una unidad de haz configurada y operable para ajustar selectivamente la dirección de polarización a diferentes ángulos respecto a la dirección de orientación del *OPT*.

15 De acuerdo con algunas realizaciones de la invención, el haz de radiación comprende un haz polarizado que tiene una dirección de polarización deseada respecto a la dirección de orientación del *OPT*. En algunas realizaciones, la dirección de polarización es sustancialmente paralela al eje de orientación.

20 En algunas realizaciones, la unidad de haz está configurada para orientar la dirección de polarización de modo que la dirección de polarización sea sustancialmente paralela a la dirección de orientación.

En otras realizaciones, la unidad de haz está configurada para orientar la dirección de polarización de modo que la dirección de polarización tenga un ángulo relativamente pequeño (0° - 30°) respecto a la dirección de orientación.

25 En algunas realizaciones de la invención, la unidad de haz está configurada y es operable para concentrar el haz de radiación a un tamaño de punto en el objetivo para el cual el haz tiene una intensidad máxima aproximadamente igual o mayor que por lo menos uno de 10¹⁶ W/cm²; 10¹⁷ W/cm²; 10¹⁸ W/cm²; 10¹⁹ W/cm²; 10²⁰ W/cm².

A este respecto, debe entenderse que, un campo eléctrico producido por un rayo láser con una intensidad $I \frac{W}{cm^2}$ es $E \approx 27\sqrt{I} \frac{V}{cm}$. Para un rayo láser potente corto de 10¹² vatios concentrado a un diámetro de punto de 5 micras, se genera un campo eléctrico en la región focal de aproximadamente 6 x 10¹⁰ V/cm. Este campo es mayor que el campo eléctrico que enlaza los electrones en el átomo de hidrógeno. Por lo tanto, mientras interactúan, los electrones se foto-ionizan a través de uno de los tres mecanismos. El proceso dominante dependería de la intensidad del láser y el potencial de ionización. El primer mecanismo es un mecanismo de ionización de fotones múltiples en el que una cantidad de fotones inciden en el átomo simultáneamente para superar el espacio energético necesario para la ionización (un fotón de haz de 800 nm tiene aproximadamente 1,5 eV). El segundo mecanismo es un mecanismo de ionización de túnel en el cual el campo eléctrico del átomo es distorsionado por el rayo láser y la probabilidad de que un electrón forme un túnel no es despreciable debido a la reducida barrera de potencial. El tercer mecanismo es un mecanismo de ionización sobre la barrera en la que el campo eléctrico del rayo láser es grande en comparación con el potencial de ionización en el que los electrones son esencialmente libres y obtienen

40 energía cinética del campo eléctrico del láser. El parámetro Keldysh que se define por $\gamma = \sqrt{\frac{I_p}{2E_p}}$ donde I_p es el potencial de ionización y $E_p = 9,33738 \times 10^{-8} I [TW/cm^2] \lambda [nm]$ es el potencial ponderomotriz. Si $\gamma \gg 1$ la ionización de fotones múltiples es el mecanismo dominante para la ionización. En la presente invención, el haz de radiación en el punto focal en el objetivo tiene una intensidad máxima aproximadamente igual o mayor que por lo menos uno de 10¹⁶ W/cm², 10¹⁷ W/cm², 10¹⁸ W/cm², 10¹⁹ W/cm², 10²⁰ W/cm², por lo tanto, $\gamma < 1$ y los mecanismos involucrados son el segundo y, en algunos casos, el tercer mecanismo. Por lo tanto, cuando el borde de ataque del haz de radiación alcanza el objetivo, ioniza los átomos, de modo que la interacción entre el haz de radiación y el *OPT* es esencialmente con plasma.

50 En algunas realizaciones, la superficie con patrón del sustrato objetivo es una superficie continua y el patrón comprende ranuras.

En algunas realizaciones, las características a nano-escala comprenden nano-estructuras discontinuas que pueden ser alargadas.

55 Por ejemplo, las características a nano-escala presentan una anchura característica menor o aproximadamente igual a por lo menos uno de 0,5λ; 0,25λ; 0,1λ; 0,05λ; 0,02λ y una longitud característica mayor o aproximadamente igual a por lo menos uno de λ; 2λ; 5λ; 10λ.

Los inventores creen que el patrón de superficie de los objetivos actúa como concentrador de campo para el campo eléctrico de la radiación electromagnética (por ejemplo, pulsos de luz) que interactúa con el objetivo.

5 En particular, de acuerdo con algunas realizaciones de la invención, el patrón de superficie comprende una capa de filamentos/nano-hilos caracterizados por una dirección de orientación sustancialmente uniforme. En este caso, los filamentos pueden actuar como agujas conductoras que concentran y amplifican el campo eléctrico del láser en sus extremos, como una aguja metálica macroscópica en un campo eléctrico genera un campo eléctrico intenso en su punto, o la mejora del campo local medida en resonancias de plasmón.

10 En alguna realización de la invención, el patrón de superficie comprende nano-estructuras con forma de media luna dispersas en el sustrato, todas alineadas en la misma dirección. En este caso, las nano-estructuras con forma de media luna pueden actuar como agujas conductoras curvadas que concentran y amplifican el campo eléctrico del láser en sus extremos.

15 En algunas realizaciones de la invención, los filamentos son filamentos de hielo. Cabe señalar que los términos "hielo", "nieve" y "vapor de H₂O" en el contexto de esta solicitud de patente se utilizan indistintamente para referirse a las características del patrón realizadas de vapor de agua.

20 En algunas realizaciones de la invención, la superficie con patrón tiene un grosor mayor o igual que por lo menos uno de 1 µm; 10 µm; 20 µm; 50 µm; 100 µm.

En algunas realizaciones, el sustrato objetivo está realizado en por lo menos uno de zafiro, silicio, carbono o material plástico.

25 En algunas realizaciones, el sustrato objetivo se realiza interactuando el sustrato con vapor de agua en una cámara de vacío mientras se encuentra bajo un campo eléctrico polarizante a través del sustrato creando, de este modo, características a nano-escala orientadas a lo largo del campo eléctrico.

30 En algunas realizaciones de la invención, el haz de radiación comprende por lo menos un pulso de luz láser. Opcionalmente, el pulso tiene una duración menor o igual a por lo menos uno de 1 ps; 0,5 ps; 0,2 ps; 0,1 ps; 0,03 ps.

En algunas realizaciones de la invención, la invención permite una nueva forma de emplear "prepulsos" para la producción de plasma. Un prepulso es un pulso de energía que precede al pulso principal productor de plasma. Cabe señalar que, en general, los prepulsos son un artefacto de la amplificación láser y suelen tener intensidades entre 10⁻³ y 10⁻⁶ de la de un pulso de luz láser que preceden. Los prepulsos generalmente interfieren con la interacción de los pulsos de luz láser con la materia en un objetivo. Un prepulso generalmente crea plasma en una superficie de un objetivo que refleja energía en el pulso de luz láser que incide en la superficie del objetivo después del prepulso y reduce, de este modo, la eficiencia con la que la energía en el siguiente pulso de luz se acopla al objetivo. Sin embargo, parece que los prepulsos que acompañan a los pulsos láser que interactúan con un objetivo *OPT*, de acuerdo con una realización de la invención, se disipan por extirpación e ionización de una parte de los objetivos. El plasma creado por un prepulso extirpando e ionizando una parte de un objetivo *OPT*, de acuerdo con una realización de la invención, es generalmente plasma de densidad subcrítica, que no interactúa fuertemente con energía en un pulso siguiente asociado a un prepulso y después del mismo. Como resultado, el pulso siguiente es capaz de interactuar de manera relativamente eficiente con partes restantes no extirpadas de los objetivos, sustancialmente sin interferencia de plasma generado por el prepulso.

45 Aunque se prefieren pulsos de energía en forma de pulsos láser, también son concebibles otros tipos de pulsos de energía, tales como pulsos de haz de electrones ultracortos. Sin embargo, en la siguiente descripción, los pulsos de energía en forma de pulsos láser se tomarán como el ejemplo preferido. La radiación electromagnética puede ser un pulso de luz láser que típicamente comprende un prepulso que precede al pulso principal. Sin embargo, el sistema de la presente invención también puede utilizarse con sistemas láser que alcanzan relaciones de contraste muy bajas (es decir, el prepulso tiene intensidades entre aproximadamente 10⁻¹⁴ del pulso principal). La fuente del haz puede controlarse de manera que el prepulso pueda preceder al pulso en un período igual o mayor que aproximadamente 10 ns. Además, o alternativamente, el patrón de superficie tiene una dimensión característica mayor o aproximadamente igual a la longitud de la trayectoria del haz en el patrón de superficie suficiente para absorber sustancialmente toda la energía en el prepulso.

50 De acuerdo con otro aspecto amplio de la presente invención, también se presenta un procedimiento para generar iones rápidos de acuerdo con la reivindicación 16.

60

En algunas realizaciones, el procedimiento comprende recibir el haz de radiación electromagnética polarizada coherente de alta potencia y dirigir el haz de radiación sobre la superficie del sustrato objetivo en un ángulo rasante deseado.

5 En algunas realizaciones, el procedimiento comprende fabricar el sustrato objetivo mediante la interacción de un sustrato con vapor de agua en una cámara de vacío mientras se encuentra bajo un campo eléctrico polarizante a través del sustrato creando, de este modo, un objetivo en forma de sustrato con patrón, presentando el patrón características a nano-escala orientadas en una dirección predeterminada sustancialmente homogénea a lo largo del campo eléctrico.

10

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para comprender la invención y ver cómo puede llevarse a cabo en la práctica, se describirán ahora unas realizaciones, sólo a modo de ejemplo no limitativo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

15

Las figuras 1A-1B muestran esquemáticamente un diagrama de bloques general del sistema para generar iones rápidos y de un procedimiento del mismo, de acuerdo con una realización de la invención;

La figura 2 muestra gráficamente la interacción de diferentes objetivos con el mismo haz de radiación;

20

Las figuras 3A-3C muestra la interacción de objetivos con un haz de radiación en diferentes ángulos rasantes;

La figura 4 muestra esquemáticamente un ejemplo del sistema para generar iones rápidos, de acuerdo con una realización de la invención;

La figura 5 muestra esquemáticamente otro ejemplo del sistema para generar iones rápidos, de acuerdo con otra realización de la invención;

25

Las figuras 6A-6C ilustran esquemáticamente la interacción de un haz de radiación polarizada con el objetivo que se muestra en figura 3, de acuerdo con una realización de la invención;

La figura 7 muestra esquemáticamente otra configuración de un sistema para generar iones rápidos de acuerdo con una realización de la invención.

30

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE REALIZACIONES

La figura 1A muestra esquemáticamente un sistema de diagrama de bloques para generar un haz de iones rápidos 20 que comprende un objetivo con patrón orientado (*OPT*) 40 interactuando con una radiación electromagnética 32, de acuerdo con una realización de la invención. El sustrato *OPT* 40 tiene un patrón de superficie con características a nano-escala sub-resonantes orientadas sustancialmente homogéneas a lo largo de un cierto eje indicado por 44 (es decir, que tiene una dirección de orientación predeterminada sustancialmente homogénea). El sistema 35 comprende una unidad de haz 90 para utilizarse con una fuente de radiación electromagnética coherente de alta potencia 92 configurada y operable para recibir un haz de radiación electromagnética coherente de alta potencia y para dirigir un haz de radiación que tiene una dirección de polarización predeterminada sobre la superficie del sustrato objetivo en un ángulo rasante deseado θ . Un ángulo entre una dirección de polarización del haz de radiación electromagnética y el eje de orientación de las características del patrón del sustrato objetivo, y el ángulo rasante se seleccionan de manera que la interacción entre el haz de radiación y el sustrato proporcione un acoplamiento eficiente entre el haz de radiación y el sustrato permitiendo la creación de iones rápidos. En particular, la dirección de polarización del haz de radiación se selecciona para que tenga una orientación predeterminada respecto al eje de orientación del sustrato de manera que la interacción entre el haz de radiación 32 y el sustrato 40 proporcione un acoplamiento eficiente entre el haz de radiación y el sustrato permitiendo la creación de iones rápidos. La energía de iones rápidos puede medirse mediante un detector por medio de mediciones de perfil de línea de los rayos X irradiados por el plasma creado (por ejemplo, a través de espectros de emisión de rayos X de iones de oxígeno de multicarga). El detector puede ser un espectrómetro FSSR esférico de alta luminosidad con un cristal de mica curvado (radio de curvatura $R = 150$ mm) que mide espectros de rayos X blandos en el intervalo de longitud de onda 1,85 – 1,90 nm. Los espectros de rayos X pueden registrarse mediante un CCD de rayos X con iluminación de fondo Andor con varios tiempos de exposición para cada experimento.

50

La figura 1B ilustra un diagrama de flujo del proceso utilizado de acuerdo con las enseñanzas de la presente invención. El procedimiento para generar iones rápidos comprende irradiar un *OPT* con un haz de radiación electromagnética coherente polarizada de alta potencia (por ejemplo, una fuente de láser de alta potencia con una potencia de por lo menos 1 TW) y optimizar una relación entre el patrón del *OPT* y por lo menos un parámetro de la radiación electromagnética seleccionando/controlando por lo menos uno de los ángulos entre una dirección de polarización del haz de radiación electromagnética y el eje de orientación del *OPT*, y un ángulo incidente (es decir, ángulo rasante) para el haz de radiación electromagnética, tal que la interacción entre el haz de radiación y la superficie con patrón del *OPT* proporcione un acoplamiento eficiente entre el haz de radiación y el sustrato, lo que resulta en la generación de un haz de iones rápidos.

60

La figura 2 representa gráficamente la interacción entre un haz de radiación y tres esquemas láser-objetivo diferentes, en los que las marcas cuadradas y triangulares son iones generados a partir de un objetivo macizo irradiado por pulsos láser cortos (> 100 fsec) y ultracortos (<100 fsec) respectivamente y los círculos rellenos son iones de un láser ultracorto y un objetivo *OPT*.

La región D de la figura representa el conocimiento común en el campo utilizando varias configuraciones de láser. La energía de protones se escala aproximadamente como la raíz cuadrada de la intensidad del láser (es decir, $E_{\text{protones}} \sim I^{0.6}$). Tal Como se aprecia claramente en la figura, el objetivo *OPT* (círculos rellenos) proporciona aproximadamente un orden de magnitud por encima de los resultados obtenidos por los otros objetivos (marcas cuadradas y triangulares).

En un ejemplo específico y no limitativo, el objetivo *OPT* está formado por nano-hilos de H_2O colocados sobre un sustrato de zafiro. El diámetro de los hilos es de aproximadamente 100 nm, mientras que su longitud es de unas pocas micras. Por lo tanto, los hilos son subresonantes, por ejemplo, el diámetro de los hilos es menor que la longitud de onda del campo eléctrico láser irradiado, que es de aproximadamente 0,8 μm . Los inventores han descubierto que, cuando se encuentra expuesto, el objetivo absorbe más de un 95% de la luz incidente. Además, tal como se detalla a continuación, el objetivo es menos susceptible al prepulso, que generalmente reduce el acoplamiento del haz de radiación al objetivo. El objetivo también mejora el campo eléctrico asociado a la interacción y la aceleración de partículas cargadas.

En algunas realizaciones, el patrón de superficie de los objetivos actúa como concentrador de campo para el campo eléctrico de la radiación electromagnética (por ejemplo, pulsos de luz) que interactúa con el objetivo. En particular, de acuerdo con algunas realizaciones de la invención, el patrón de superficie comprende una capa de filamentos/hilos caracterizados por una dirección de orientación. En este caso, los filamentos pueden actuar como agujas conductoras que concentran y amplifican el campo eléctrico del láser en sus extremos, como una aguja metálica macroscópica en un campo eléctrico genera un campo eléctrico intenso en su punto. Las dimensiones geométricas de las puntas estrechas en el extremo de los hilos generan una gran separación de carga cuando son irradiadas por el campo eléctrico. Tal como se ha indicado anteriormente, el pulso láser de alta intensidad ioniza los hilos. La separación de carga inducida por la geometría del hilo se añade localmente al campo eléctrico del láser que interactúa con las partículas individuales (electrones y protones).

El parámetro principal para calcular la mejora de campo es la relación geométrica, g , que es la relación entre el diámetro y la longitud de una característica a nano-escala.

El factor de mejora de campo (FEF) se escala con g linealmente,
$$FEF = \frac{E_{\text{enhanced}}}{E_{\text{laser}}} \propto g$$

Aquí E_{laser} es el campo eléctrico correspondiente al pulso láser irradiado y E_{enhanced} es el campo eléctrico efectivo que está involucrado en el proceso de aceleración de los iones.

Se hace referencia a las figuras 3A-3C que ilustran protones generados por la interacción de un *OPT* con un haz electromagnético incidente en diferentes ángulos de incidencia. En este ejemplo específico y no limitativo, las energías de los iones se miden mediante unas placas de CR39 cubiertas con unas láminas de aluminio que bloquean protones por debajo de cierta energía. Los puntos negros representan marcas de iones en el CR39. La figura 3A representa el nivel de fondo del sistema para referencia. La figura 3B representa la interacción entre el objetivo y un rayo incidente que incide en la superficie con patrón con un ángulo incidente de 45° . El corte de energía de protones es de 0,5 MeV. El ángulo sólido del haz de iones cubierto por las placas de CR39 es de aproximadamente 34° (perpendicular al objetivo). La figura 3C representa la interacción entre el objetivo y un haz incidente que incide en la superficie con patrón con un ángulo incidente de 60° (es decir, un ángulo rasante de 30°). El corte de energía de los protones es de 5 MeV. El ángulo sólido cubierto por las placas de CR39 es de aproximadamente 5° (perpendicular al objetivo). Por lo tanto, se muestra claramente que el uso de *OPT* permite optimizar un(os) parámetro(s) de la radiación electromagnética incidente, el ángulo incidente en el presente ejemplo, para mejorar la eficiencia del acoplamiento de radiación en el *OPT* (por ejemplo, corte de energía y ángulo sólido) contribuyendo a la creación de iones rápidos con una energía cinética elevada. Las figuras ilustran la optimización de la variación del ángulo rasante del haz electromagnético sobre la superficie del *OPT*. Por lo tanto, el ángulo incidente debe ser superior a 45° (ángulo rasante pequeño) que es un ángulo entre el eje de propagación del haz y el normal a la superficie del *OPT*. En este ejemplo específico, la irradiación del *OPT* en un ángulo rasante de aproximadamente 60° genera una cantidad de iones rápidos (por ejemplo, protones) en por lo menos un factor de 36. El haz de iones rápidos tiene una energía cinética mayor en por lo menos un factor de 10. De acuerdo con las enseñanzas de la presente invención, el ángulo óptimo puede determinarse variando gradualmente el ángulo rasante de manera apropiada y midiendo las propiedades de los haces de iones rápidos generados. Debe entenderse que el valor real del ángulo rasante depende, entre otros, de las características del patrón, por ejemplo, la altura de las ranuras.

La figura 4 muestra esquemáticamente un ejemplo de un sistema para generar iones rápidos 20 que comprende un objetivo con patrón orientado (OPT) 40 interactuando con una radiación electromagnética, de acuerdo con una realización de la invención.

5 El haz de radiación 32 se dirige hacia el objetivo 40 en un ángulo rasante θ deseado. El haz de radiación 32 tiene una dirección de polarización predeterminada indicada por una flecha 34. Por ejemplo, la unidad de haz 30 es controlable para proporcionar pulsos de rayos láser polarizados que se concentran en una región focal en OPT 40 indicado esquemáticamente por un círculo 60.

10 En este ejemplo específico y no limitativo, el patrón de superficie del OPT 40 comprende filamentos orientados formados y soportados por un pedestal objetivo 50. Una flecha 44 indica una dirección de orientación que caracteriza la orientación de las características a nano-escala 42 y OPT 40. En una realización de la invención, la dirección de polarización 34 es sustancialmente paralela a la dirección 44 de orientación del OPT 40.

15 El pedestal 50 puede comprender un sustrato de zafiro 51 acoplado a una unidad de refrigeración 52 configurada de acuerdo con cualquiera de las diversas técnicas conocidas en la técnica. Opcionalmente, la unidad de refrigeración 52 comprende un bloque intercambiador de calor de Cu 54 acoplado a un sistema de circulación de nitrógeno líquido (no mostrado) que bombea nitrógeno líquido a través del intercambiador de calor para eliminar el calor del sustrato de zafiro 51. El sustrato queda intercalado entre unos electrodos de polarización 56 que están conectados a una
20 fuente de alimentación 55. El OPT 40 y el pedestal 50 quedan dispuestos en una cámara de vacío (no mostrada).

Para producir un OPT 40, de acuerdo con una realización de la invención, la presión en la cámara de vacío se reduce a entre aproximadamente 5×10^{-4} mBar y aproximadamente 10^{-5} mBar y la unidad de refrigeración se acciona para enfriar el sustrato 51 a aproximadamente 80° K. La fuente de alimentación 55 se controla para aplicar
25 un potencial voltaje entre electrodos 56 que genera un campo eléctrico de polarización en el sustrato 51, que es paralelo a la dirección de orientación 44. Después se introduce vapor de agua en la cámara de vacío y se condensa en el sustrato 51 en forma de filamentos de hielo alargados 42. Dado que el agua es una molécula polar, a medida que las moléculas se condensan en el sustrato y producen filamentos de hielo. 42, las moléculas y los filamentos de
30 hielo tienden a orientarse paralelamente al campo de polarización eléctrico y, por lo tanto, a la dirección de orientación 44. Pueden utilizarse también otros materiales que tengan la capacidad de tener patrones, presentando el patrón características de patrón a nano-escala orientadas de manera sustancialmente uniforme a lo largo de un eje común, tales como silicio, carbono o plástico (es decir, compuestos de C-H) para formar el sustrato objetivo que tiene una dirección de orientación sustancialmente uniforme de acuerdo con las enseñanzas de la presente invención.

35 En algunas realizaciones, el haz de radiación 32 incluye un pulso de haz.

En una realización de la invención, en la cámara de vacío se introduce vapor de agua durante un período lo suficientemente largo como para formar la capa 41 del patrón de superficie a un grosor suficiente para absorber
40 sustancialmente toda la energía en el prepulso 33 y el pulso 32. Por lo tanto, la energía del prepulso 33 se disiparía extirpando e ionizando una parte de la capa 41 y dejar en lugar del material extirpado un plasma relativamente delgado, de densidad subcrítica, que se superpone a una parte restante de la capa 41 antes del pulso 32 que llega a la capa. El plasma de densidad subcrítica no interactúa fuertemente con la energía en el pulso 32 y, como resultado, la energía en el pulso 32 se acopla de manera eficiente a las características a nano-escala 42 en la parte restante de
45 la capa no extirpada 41.

Es evidente que la presencia del campo eléctrico generado en el sustrato 51 no provocaría que todas las funciones a nano-escala 42 que se condensan en el sustrato queden sustancialmente alineadas a lo largo de la dirección 44. Sin embargo, el campo eléctrico produce una densidad del patrón de superficie alineado (por ejemplo, filamentos de
50 hielo) que caracteriza la capa 41 y el OPT 40 con una dirección de orientación 44. Y se espera que la interacción del OPT 40 con el pulso 33 de haz polarizado en una dirección, por ejemplo, la dirección 34, paralela a la dirección de orientación del objetivo 44, de acuerdo con una realización de la invención, se mejore en relación con la interacción del pulso con un objetivo no orientado T. Se espera, por lo tanto, que flujos y energías iónicos debidos a la interacción del haz de radiación (por ejemplo, pulso de luz láser) con el OPT 40 mejoren flujos y energías relativos
55 debidos a la interacción del pulso de luz con un objetivo T.

Los inventores han realizado experimentos con un objetivo T que comprende una capa de filamentos de hielo no orientados que interactúan con intensos pulsos de luz láser de 800 nm de longitud de onda para producir iones
60 rápidos. En el artículo titulado "*Generation of Fast Ions by an Efficient Coupling of High Power Laser into Ice Nanotubes*", mencionado anteriormente, se indicó un experimento realizado por los inventores. Los experimentos indican que se producen flujos de protones de 150 KeV por pulso de luz láser que tienen un ancho de pulso menor de aproximadamente 0,1 ps y una intensidad "moderada" de aproximadamente 10^{16} W/cm² incidente en un objetivo de filamento de hielo T de 1 mm de grosor formado en un pedestal objetivo similar al pedestal 50. Para producir los

mismos protones de energía a partir de la interacción convencional de un pulso de luz láser y un objetivo sólido no filamentoso, el pulso láser generalmente requiere una intensidad de aproximadamente 10^{17} W/cm², que es aproximadamente un orden de magnitud mayor que el que se requiere utilizando un objetivo T.

5 En algunas realizaciones de la invención, unidad de haz 30 concentra la radiación del haz 32 (por ejemplo, pulso de luz láser) a una intensidad máxima aproximadamente igual o mayor que por lo menos uno de los siguientes: 10^{16} W/cm²; 10^{17} W/cm²; 10^{18} W/cm²; 10^{19} W/cm²; 10^{20} W/cm².

10 La figura 5 ilustra una configuración de un ejemplo del sistema de la presente invención en el que la unidad de haz comprende una disposición de espejos dieléctricos y de un espejo de parábola desalineado (por ejemplo, recubierto de oro) configurado y operable para concentrar el haz de radiación a una región focal.

15 Las figuras 6A-6C ilustran esquemáticamente un proceso de generación de protones rápidos, de acuerdo con una realización de la invención. En este ejemplo específico y no limitativo, el sistema 20 de la presente invención produce protones rápidos que tienen una energía de aproximadamente 50 MeV en el que se supone que un haz de radiación 32 (por ejemplo, pulso de luz láser) tiene una longitud de onda de 800 nm, un ancho de pulso de aproximadamente 0,1 ps y una intensidad de aproximadamente 5×10^{19} W/cm² en un plano focal (cuando se concentra en la región focal 60 del objetivo OPT 40). Suponiendo una relación de contraste (relación entre la intensidad del prepulso y la intensidad del pulso principal) de un máximo de 10^{-3} , cuando se enfoca a la región focal 60, el prepulso 33 tiene una intensidad igual al máximo 10^{16} W/cm². Por lo tanto, debe entenderse que la energía del prepulso y la posición del plano focal deben ajustarse adecuadamente para, por una parte, proporcionar interacción en la energía deseada del haz para un acoplamiento eficiente y, por otra parte, la energía del plano focal no debe ser demasiado elevada para no destruir las características del patrón.

25 La figura 6A muestra esquemáticamente el sistema 20 de la presente invención justo antes de la interacción entre el haz de radiación y el OPT 20.

30 La figura 6B muestra esquemáticamente el sistema 20 de la presente invención después de que el prepulso 33 se ha extirpado e ionizado, y se ha creado una capa de "quemado" que presenta características a nano-escala con patrón 42 en la región focal 60, dejando un plasma de densidad subcrítica, representado por una región sombreada 62. El plasma 62 se superpone a una región restante no extirpada 64 de características a nano-escala 42 en la región focal 60. En la figura, el pulso láser 32 acaba de entrar en la región focal 60. Dado que plasma 62 es subcrítico, no afecta sustancialmente al pulso láser 32.

35 La figura 6C muestra esquemáticamente un pulso láser 32 interactuando con funciones a nano-escala 42 en la región no extirpada 64 para producir un flujo de protones representados esquemáticamente por un grupo de flechas de puntos y rayas 68, de acuerdo con una realización de la invención.

40 Debido a que el patrón de superficie tiene características a nano-escala subresonantes 42, por ejemplo, la anchura del patrón de superficie es mucho menor que la longitud de onda de la luz en el pulso 32, el campo eléctrico del pulso en cualquier momento dado es sustancialmente constante dentro y cerca del patrón de superficie. Sin limitarse a ninguna teoría particular, tal como se ha mencionado anteriormente, los inventores creen que el patrón de superficie, por lo tanto, actúa de manera similar a una aguja conductora en un campo eléctrico y paralela al mismo, y concentra el campo en sus puntas, y que el campo concentrado de una pluralidad de características a nano-escala orientadas 42 es particularmente ventajoso para generar un flujo relativamente grande de protones rápidos. Un recuadro 70 muestra esquemáticamente características a nano-escala 42 en el campo eléctrico de una región localizada de pulso 32 más pequeña que una longitud de onda λ de luz en el pulso. Una flecha de bloque 72 representa el campo eléctrico del pulso de luz 32 cerca de la característica 42 y unas líneas de campo discontinuas 76 que convergen hacia una punta 74 de la característica representan esquemáticamente el campo concentrado en la punta.

50 El campo concentrado 76 genera una columna de electrones calientes, representada esquemáticamente por círculos 80, que dejan la característica 42 cerca de su punta 74 por la ionización de átomos de hidrógeno y oxígeno (no mostrados) en la característica. La columna de electrones y átomos ionizados en la característica 42 producen un intenso campo de doble capa (no mostrado) que acelera iones de hidrógeno en el filamento a energías relativamente elevadas produciendo el flujo de protones representado por un grupo de flechas 68.

55 Se observa que la eficacia con la que el pulso de luz 32 produce iones rápidos 68 interactuando con OPT 40 (figura 3) responde a la dirección 34 de polarización de luz en el pulso 32 respecto a la dirección 44 de orientación de características a nano-escala en el OPT 40. Por ejemplo, tal como se ha descrito anteriormente, el pulso de luz es particularmente efectivo para producir un flujo de iones rápidos, tales como protones, cuando la dirección 34 y la dirección 44 de orientación de la característica son paralelas o tienen un ángulo pequeño entre ellas. En algunas realizaciones de la invención, la magnitud y/o la energía de los iones producidos por el sistema de la invención 20 se

60

5 controla controlando el ángulo de dirección de polarización 34 respecto a la dirección de orientación de la característica. Mediante una polarización rotativa 34 alejándose del ángulo correcto entre la polarización 34 y la dirección 44 de la orientación del filamento, se espera que la energía de los protones disminuya. Por lo tanto, un ángulo entre la dirección de polarización y el eje de orientación del patrón puede ajustarse adecuadamente al valor óptimo.

La figura 7 muestra esquemáticamente la polarización del pulso 32 girado, de acuerdo con una realización de la invención, alejándose de la dirección 44 de orientación de características.

REIVINDICACIONES

1. Sistema para generar un haz de iones rápidos, comprendiendo el sistema:

- 5 un sustrato objetivo (40) que presenta una superficie con patrón, comprendiendo el patrón características de patrón a nano-escala (42) orientadas de manera sustancialmente uniforme a lo largo de un eje común; una unidad de haz (30) adaptada para recibir un haz de radiación electromagnética coherente de alta potencia (32) y proporcionar un haz de radiación electromagnética (32) que tiene un pulso principal y un prepulso, y concentrar dicho haz de radiación sobre la citada superficie con patrón del sustrato objetivo (40) para provocar una interacción entre dicho haz de radiación (32) y dicho sustrato (40), de modo que el prepulso extirpa e ioniza una parte del sustrato (40) creando plasma de baja densidad permitiendo que el pulso principal siguiente interactúe eficientemente con partes restantes, no extirpadas, del sustrato (40), permitiendo, de este modo, la creación de iones rápidos a partir de la interacción entre el pulso principal y el sustrato objetivo; y caracterizado porque:
- 15 dicho haz electromagnético tiene una dirección de polarización predefinida que define un cierto ángulo entre dicha dirección de polarización y dicho eje de orientación común (44) de las características del patrón (42) del sustrato objetivo (40) seleccionado de modo que la citada interacción proporciona un acoplamiento eficiente entre dicho haz de radiación y dicho sustrato permitiendo la creación de iones rápidos que tienen una energía cinética deseablemente elevada, en el que dicho ángulo entre la dirección de polarización y el eje de orientación se encuentre en un intervalo de 0° - 30° .
- 25 2. Sistema de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que dicha unidad de haz (30) está adaptada para dirigir el haz de radiación electromagnética (32) sobre la citada superficie con patrón del sustrato objetivo (40) con un ángulo rasante predeterminado; seleccionándose el ángulo rasante de acuerdo con dicho patrón de manera que la citada interacción proporciona un acoplamiento eficiente entre dicho haz de radiación y dicho sustrato permitiendo la creación de iones rápidos de energía cinética deseablemente elevada.
- 30 3. Sistema de acuerdo con la reivindicación 2, caracterizado por el hecho de que dicho ángulo rasante es inferior a 45° .
4. Sistema de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado por el hecho de que dicho ángulo rasante se encuentra en el intervalo de aproximadamente 20° - 40° .
- 35 5. Sistema de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que dicha dirección de polarización es sustancialmente paralela al eje de orientación (44).
6. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por el hecho de que la citada superficie con patrón del sustrato objetivo (40) es una superficie continua y dicho patrón comprende ranuras.
- 40 7. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por el hecho de que dichas características (42) comprenden estructuras discontinuas.
8. Sistema de la reivindicación 7, caracterizado por el hecho de que dichas estructuras son alargadas.
- 45 9. Sistema de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado por el hecho de que dichas estructuras son filamentos o hilos.
10. Sistema de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por el hecho de que dichos filamentos son filamentos de hielo.
- 50 11. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado por el hecho de que dicho sustrato objetivo (40) está realizado en por lo menos uno de zafiro, silicio, carbono o material plástico.
- 55 12. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, caracterizado por el hecho que de dicha unidad de haz está configurada y es operable para enfocar el haz de radiación (32) a un tamaño de punto en el objetivo para el cual el haz de radiación (32) tiene una intensidad máxima aproximadamente igual o mayor que por lo menos uno de 10^{16} W/cm², 10^{17} W/cm², 10^{18} W/cm², 10^{19} W/cm², 10^{20} W/cm².
- 60 13. Sistema de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 12, caracterizado por el hecho de que dichos iones rápidos tienen energía cinética aproximadamente igual o mayor que por lo menos uno de 5 MeV, 50 MeV, 100 MeV, 150 MeV, 200 MeV.

14. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, caracterizado por el hecho de que dichos iones rápidos comprenden protones.

5 15. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, caracterizado por el hecho de que dichos iones rápidos comprenden iones de oxígeno.

10 16. Procedimiento para generar iones rápidos, comprendiendo el procedimiento irradiar un sustrato objetivo (40) con un haz concentrado de radiación electromagnética coherente polarizada de alta potencia (32), en el que el sustrato objetivo (40) tiene una superficie con patrón con un patrón que comprende características de patrón a nano-escala (42) orientadas sustancialmente de manera uniforme a lo largo de un eje de orientación común (44); y en el que dicha irradiación comprende producir dicho haz de radiación (32) que tiene un pulso principal y un prepulso, y controlar el ángulo entre una dirección de polarización del haz de radiación electromagnética y el eje de orientación (44) en un intervalo de 0° - 30° , de modo que el prepulso extirpa e ioniza una parte del sustrato (40) creando plasma de baja densidad permitiendo que el pulso principal siguiente interactúe eficientemente con partes restantes, no extirpadas, del sustrato, proporcionando, de este modo, un acoplamiento eficiente entre dicho haz de radiación (32) y dicho sustrato dando como resultado la generación de un haz de iones rápidos.

15 17. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 16, caracterizado por el hecho de que comprende recibir el haz de radiación electromagnética polarizada coherente de alta potencia (32) y dirigir dicho haz de radiación (32) sobre la citada superficie de dicho sustrato objetivo (40) en un ángulo rasante deseado.

20 18. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 17, caracterizado por el hecho de dicho ángulo rasante es inferior a 45° entre un eje de propagación del haz y una superficie del sustrato (40), de manera que la citada interacción entre dicho haz de radiación (32) y dicho sustrato (40) permite la creación de los iones rápidos de energía cinética deseablemente elevada.

25

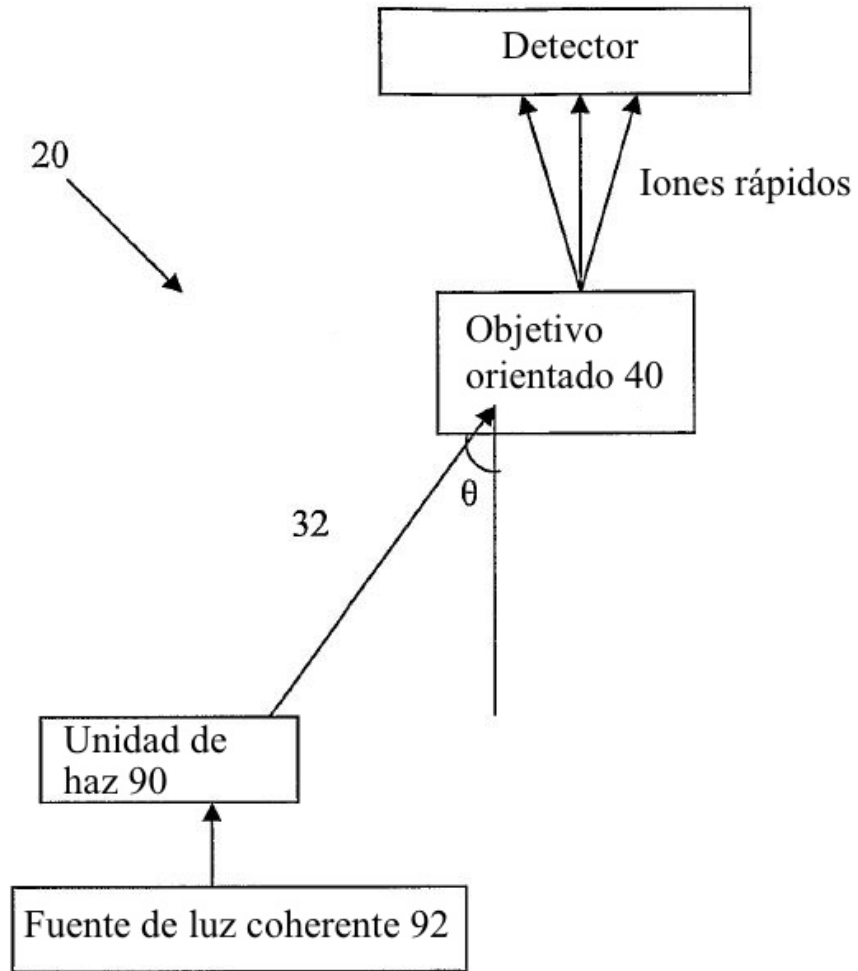


FIG. 1A

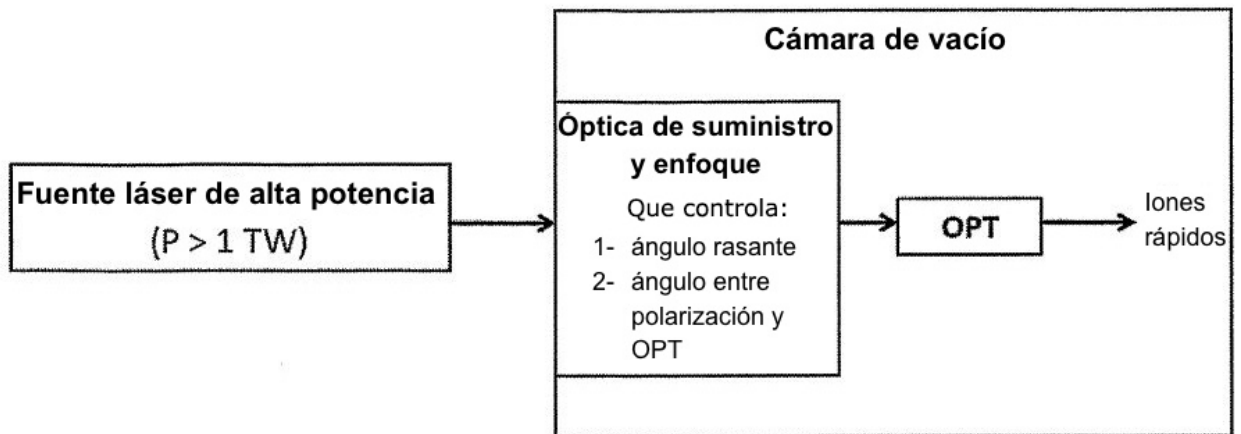


FIG 1B

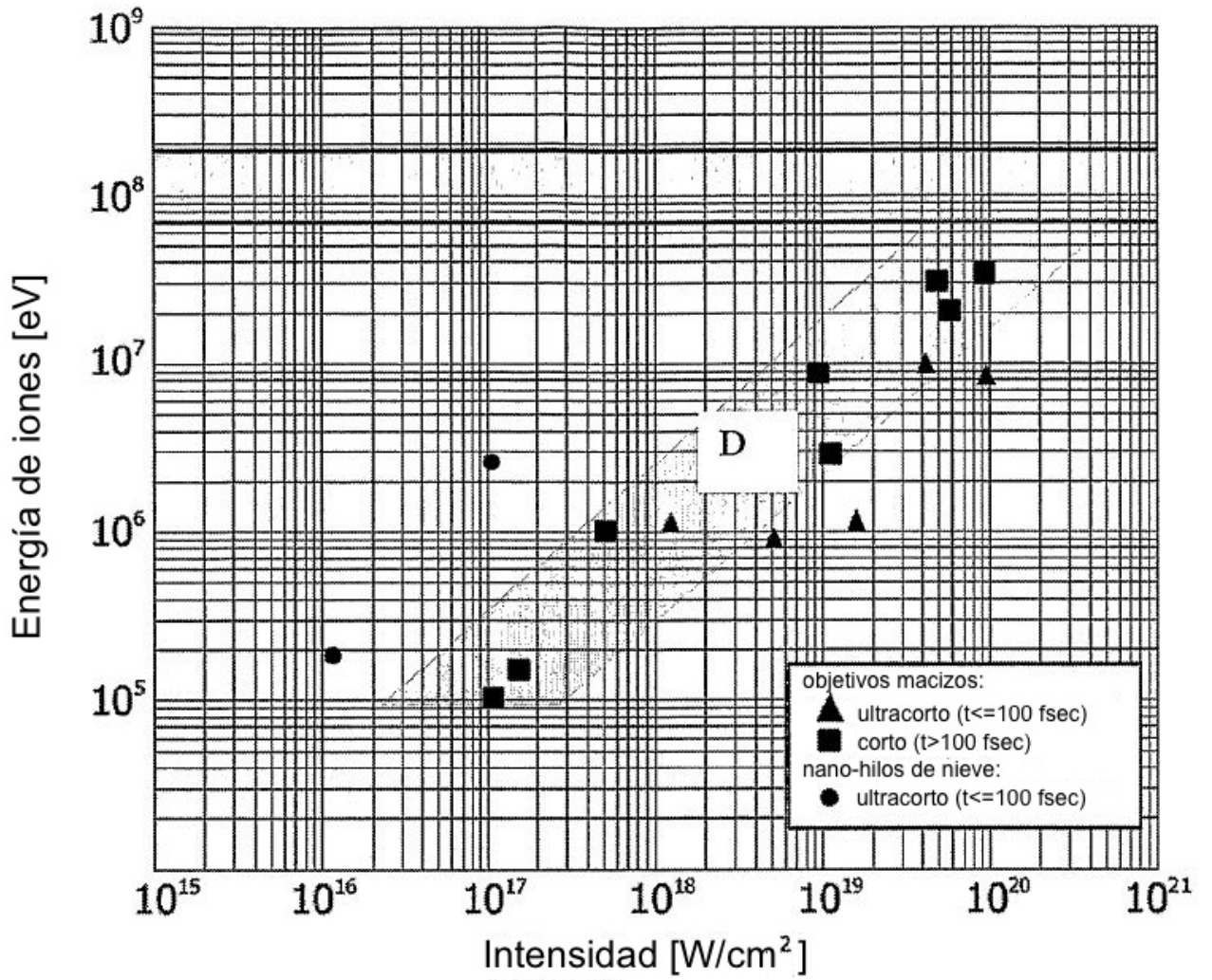


FIG 2

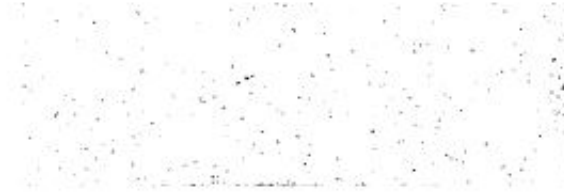


FIG 3A

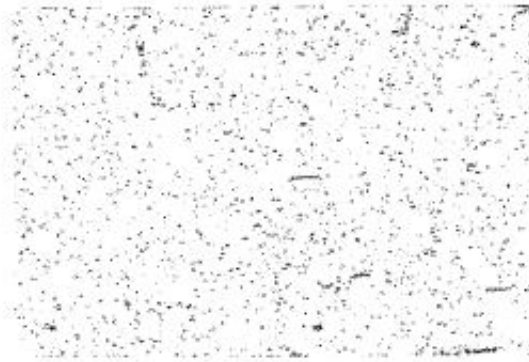


FIG 3B

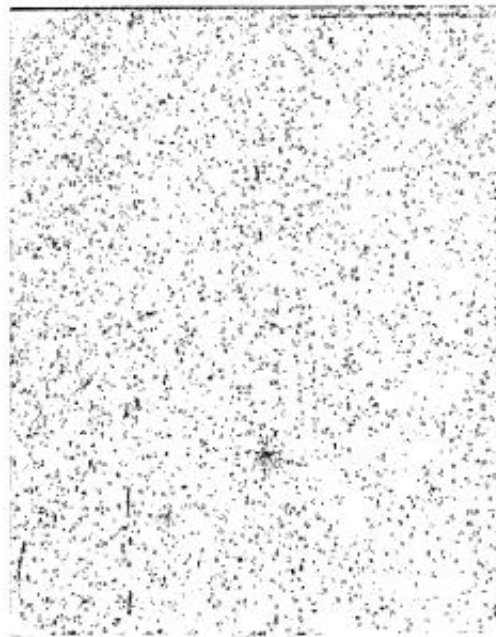


FIG 3C

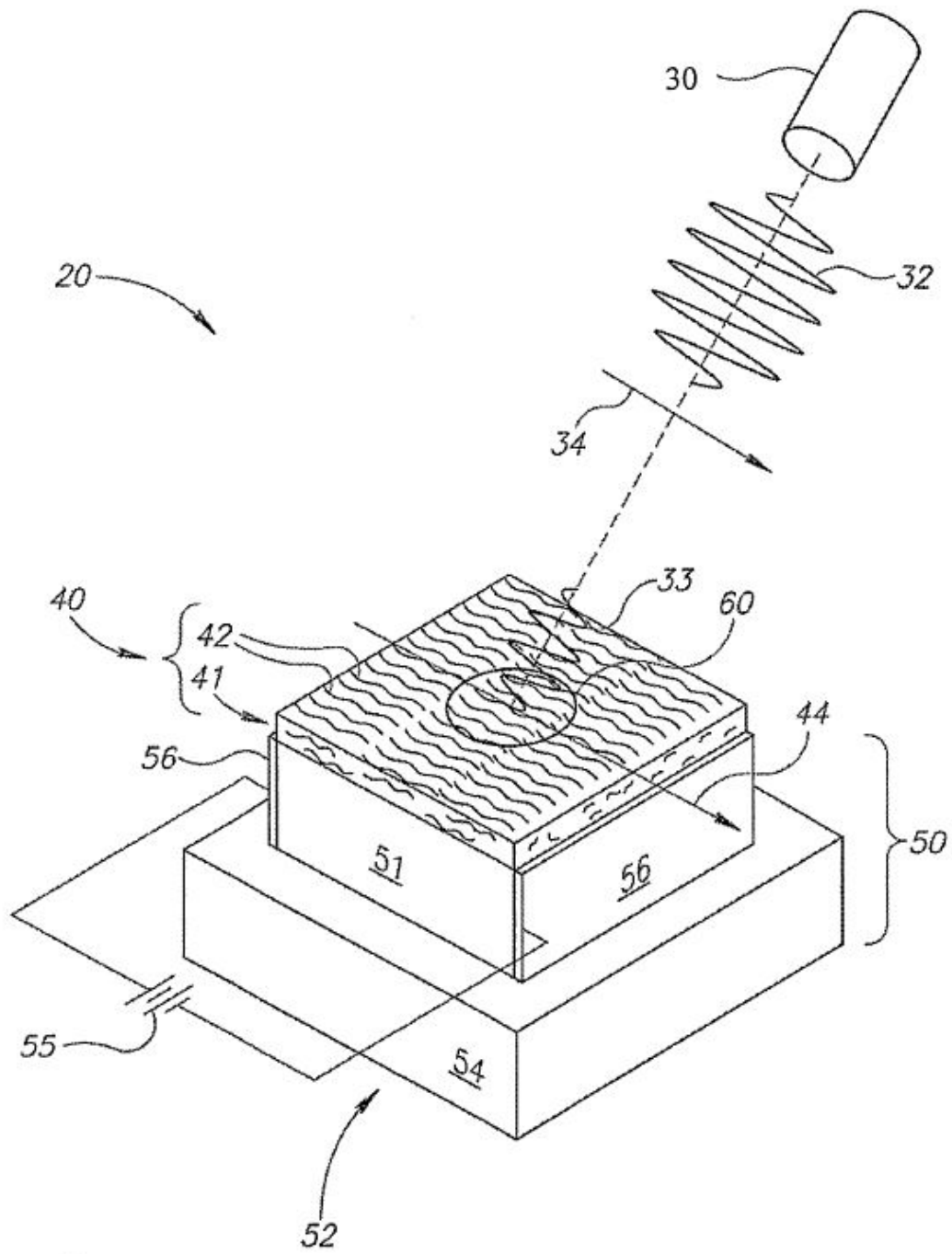


FIG 4

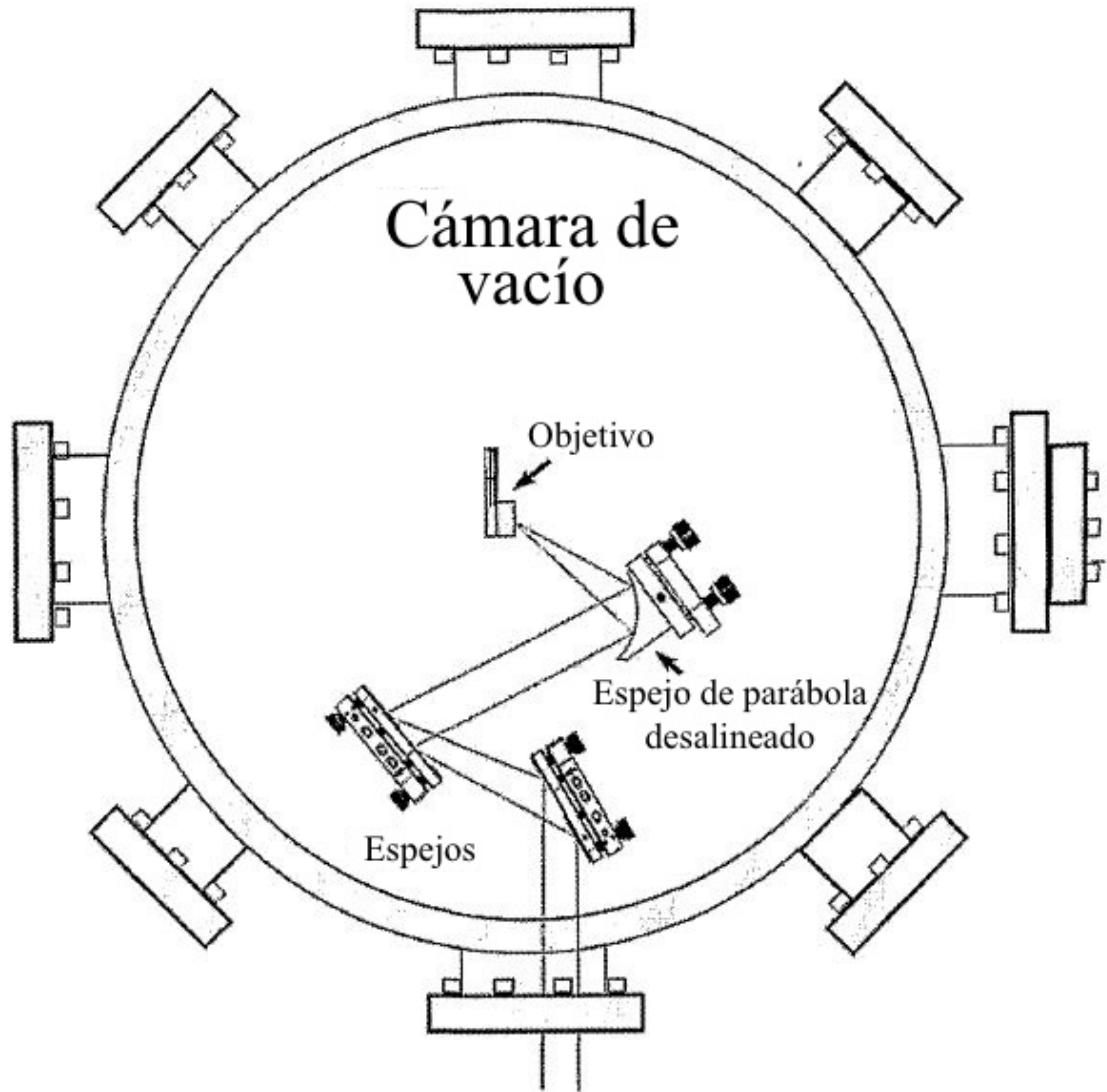


FIG 5

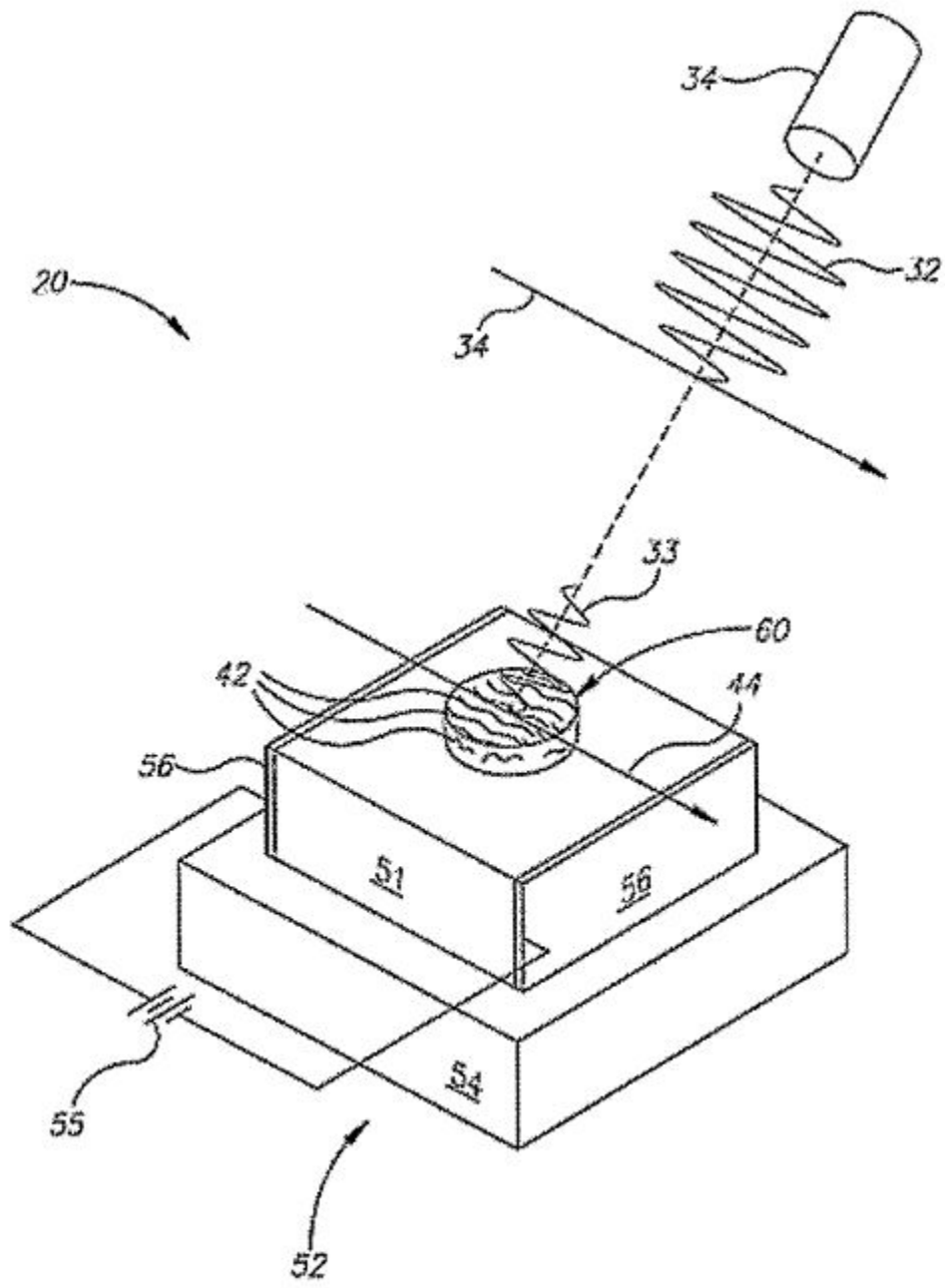


FIG. 6A

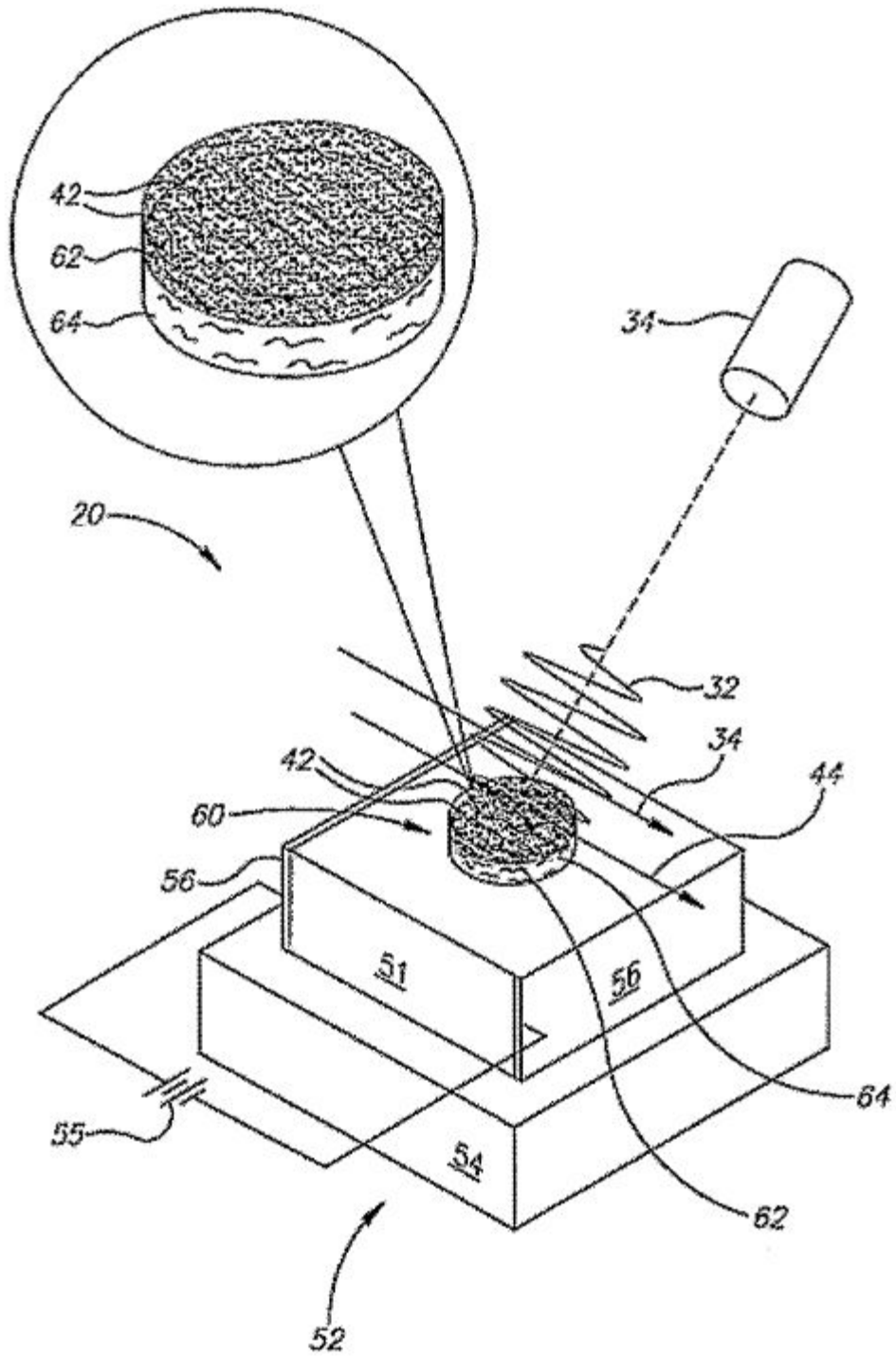


FIG. 6B

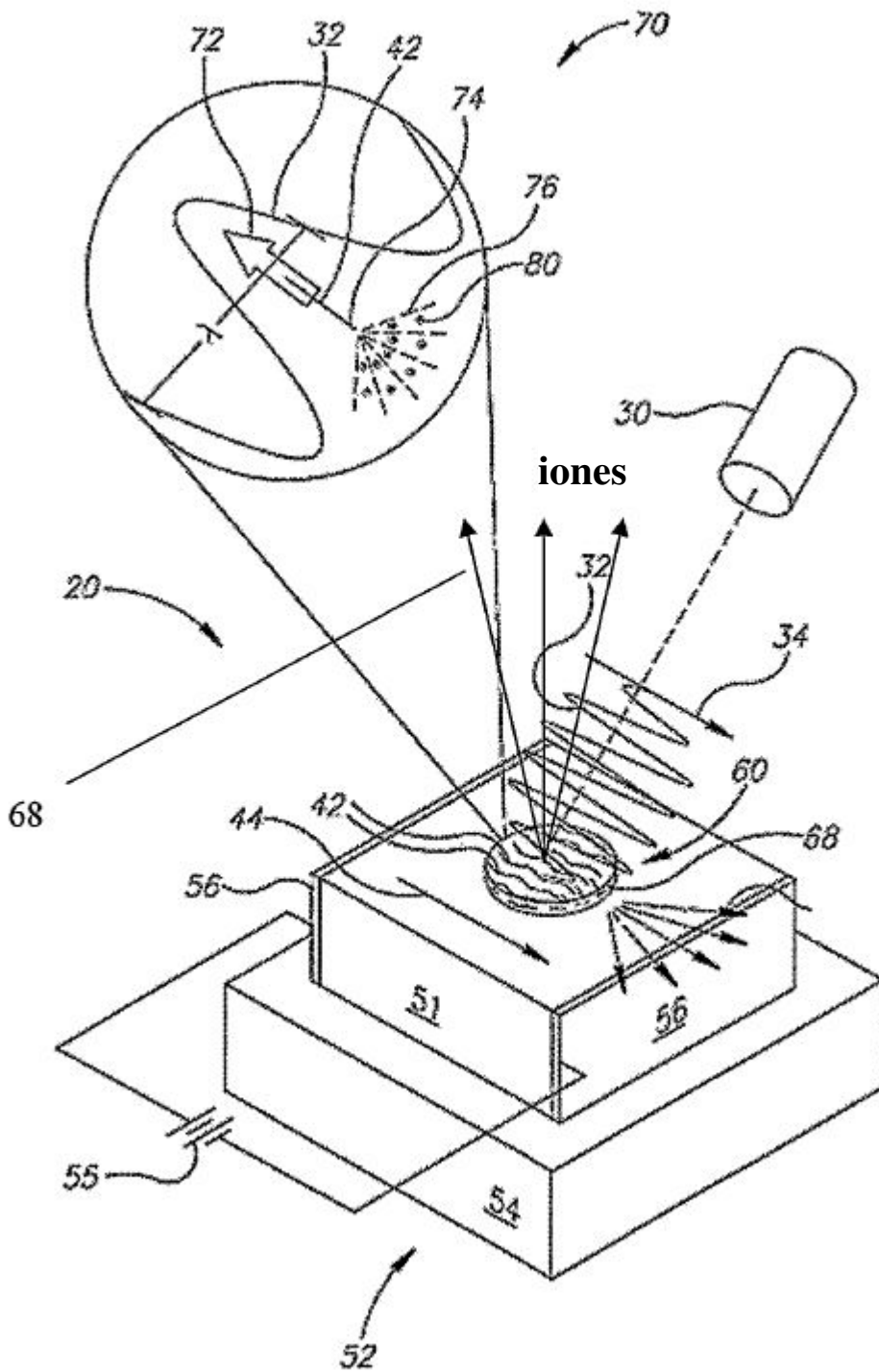


FIG. 6C

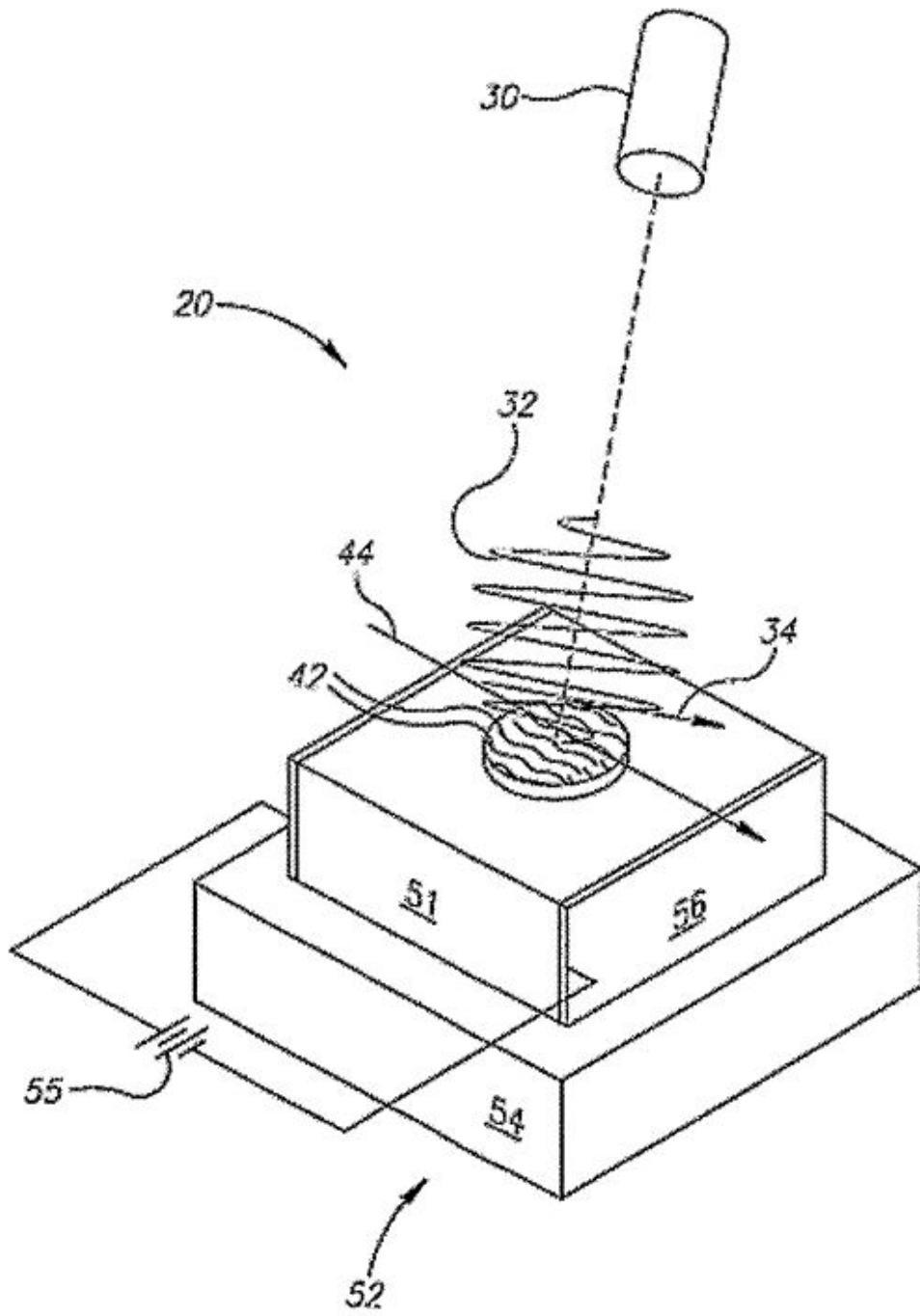


FIG. 7

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

5 *Esta lista de referencias citadas por el solicitante es únicamente para la comodidad del lector. No forma parte del documento de la patente europea. A pesar del cuidado tenido en la recopilación de las referencias, no se pueden excluir errores u omisiones y la EPO niega toda responsabilidad en este sentido.*

Documentos de patentes citados en la descripción

- 10 • US 6906338 B [0004] • US 2002090194 A1 [0005]

Literatura no de patentes citada en la descripción

- 15 • **BAGCHI**. Fast ion beams from intense, femtosecond laser irradiated nanostructured surfaces. *Applied Physics B*, 2007, vol. 88, 167-173 [0006]
- 20 • **T. PALCHAN et al.** Efficient Coupling of High Intensity Short Laser Pulses into Snow Clusters. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 90, 041501 [0007]
- **T. PALCHAN et al.** Generation of Fast Ions by an Efficient Coupling of High Power Laser Into Snow Nanotubes. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, 251501 [0008]
- Generation of Fast Ions by an Efficient Coupling of High Power Laser into Ice Nanotubes [0062]