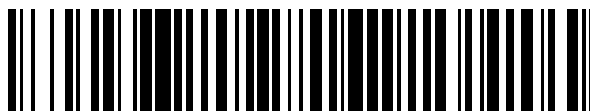


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 627 178**

51 Int. Cl.:

**H05H 7/10** (2006.01)

**A61N 5/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.10.2008** **E 08017747 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.04.2017** **EP 2059099**

54 Título: **Sistema de terapia por haz de partículas**

30 Prioridad:

**06.11.2007 JP 2007288002**

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

**27.07.2017**

73 Titular/es:

**HITACHI, LTD. (100.0%)**  
**6-6, Marunouchi 1-chome, Chiyoda-ku**  
**Tokyo 100-8280 , JP**

72 Inventor/es:

**SAITO, KAZUYOSHI y**  
**SAKURABATA, HIROAKI**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 627 178 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 de terapia por haz de partículas

5 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

## 1. Campo de la Invención:

La presente invención se refiere a un sistema de terapia por haz de partículas proporcionado con un sincrotrón y que es capaz de tratamiento de irradiación con precisión.

10

## 2. Descripción de la técnica relacionada:

Con el creciente envejecimiento de la sociedad, el tratamiento para el cáncer por medio de la radioterapia atrae la atención a causa de su naturaleza no invasiva y sus buenos efectos terapéuticos para los pacientes para mantener su alta calidad de vida tras el tratamiento. Entre los diversos sistemas de radioterapia, el sistema de terapia por haz de partículas, que emplea haces de iones o haces de partículas cargadas (tales como protones o átomos de carbono) acelerados por un acelerador, se considera particularmente prometedor a causa de su habilidad con los haces altamente concentrados a la parte afectada. El sistema de terapia por haz de partículas se compone de un acelerador, un sistema de transporte de haces y un dispositivo de irradiación. El primero es un sincrotrón o similar que acelera los haces de partículas cargadas emergentes de una fuente de iones hasta alcanzar aproximadamente la velocidad de la luz. El segundo transporta los haces de partículas cargadas que se han extraído del acelerador. El tercero irradia al paciente con haces de partículas cargadas de una manera específica de acuerdo con la posición y la forma de la parte afectada. (Véase Documento de Patente 1.)

15

20

25

30

El dispositivo de irradiación convencional unido al sistema de terapia por haz de partículas aumenta el diámetro del haz por medio de un dispersor y rebaña a continuación la periferia por medio de un colimador para formar los haces de partículas cargadas antes de la irradiación con los haces de partículas cargadas de acuerdo con la forma de la parte afectada. Desgraciadamente, el método de irradiación que emplea un dispersor necesita mejorar la disponibilidad del haz, para reducir la generación de neutrones y mejorar la conformidad entre la región de irradiación y la forma de la parte afectada. Esto ha suscitado recientemente la necesidad de un método de irradiación más preciso, llamado método de irradiación por exploración. Este método se realiza extrayendo finos haces de partículas cargadas de un acelerador, desviándolos por medio de electroimanes, y explorando la parte afectada con ellos de acuerdo con su forma.

35

40

El método de irradiación por exploración funciona para irradiar los puntos de irradiación SP definidos por división de la parte afectada tridimensionalmente en capas y dividiendo posteriormente cada capa en pequeños segmentos. Las capas en el sentido en profundidad se irradian selectivamente con los haces de partículas cargadas cuyo nivel energético se ajusta adecuadamente. Los puntos en cada capa se irradian con los haces de partículas cargadas a la dosis deseada por medio de la exploración en dos dimensiones con los electroimanes. Los haces de irradiación se pueden mantener conectados o desconectados durante el movimiento desde un punto de irradiación SP a otro. Estos procedimientos se denominan exploración por tramas y exploración por puntos, respectivamente. Este último se describe en el Documento de Patente 2.

45

50

El método convencional de exploración por puntos se describirá a continuación con referencia a la figura 8. La figura 8 muestra el periodo de preparación de la extracción que sigue a la finalización de la aceleración y el diagrama de tiempos inmediatamente tras el inicio de la extracción, los cuales están implicados en la secuencia de funcionamiento del sistema de terapia por haz de partículas que emplea el método de exploración por puntos. El método de exploración por puntos se realiza irradiando los puntos de radiación secuencialmente uno tras otro. Mientras un punto está siendo irradiado según una dosis prescrita, la exploración del haz se suspende. La exploración se reanuda, con los haces de partículas cargadas desconectados y se irradia el punto contiguo. El movimiento de un punto a otro se realiza ajustando la magnitud de la excitación para el electroimán de exploración. La irradiación de este modo determina la dosis total a la parte afectada (o el campo de irradiación) en términos de la superposición de dosis individuales a los puntos de irradiación individuales SP.

55

60

Los haces de partículas cargadas se extraen del sincrotrón por medio de la técnica descrita en el Documento de Patente 3. Esta técnica se realiza aplicando ondas de alta frecuencia a los haces circulantes (aquellos haces de partículas cargadas que circulan en el sincrotrón), aumentando por ello su amplitud de oscilación del betatrón, y extrayendo del sincrotrón aquellas partículas con gran amplitud de oscilación del betatrón que excedan el límite de estabilidad. Esta técnica mantiene constante durante la extracción los parámetros para el funcionamiento del aparato relativos a la extracción del sincrotrón, dando lugar a una alta estabilidad de la órbita para los haces de partículas cargadas que están siendo extraídos del sincrotrón y a una mayor precisión de la posición para los haces de irradiación.

65

Documento de Patente 1: Patente Japonesa número 2833602

Documento de Patente 2: Patente Japonesa número 3874766

Documento de Patente 3: Patente Japonesa número 2596292

El documento US 2005/0231138 A1 describe un sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1.

5 Es esencial para la técnica de exploración por puntos lograr precisión en la irradiación para posicionar con precisión los haces de las partículas cargadas y para controlar con exactitud el tamaño del haz. Teniendo esto en cuenta, los inventores actuales llevaron a cabo experimentos para realizar un método de irradiación con precisión para el tratamiento por medio del sistema de terapia de haz de partículas con un sincrotrón. Los resultados de los experimentos revelaron que los haces de partículas cargadas extraídas últimamente del sincrotrón son pobres en la reproductibilidad del tamaño del haz y también son pobres en la estabilidad de la órbita del haz. Los resultados precedentes se describirán a continuación.

15 En el funcionamiento real de un sincrotrón, los haces de partículas cargadas que se han introducido procedentes de un preacelerador resultan inestables en el transcurso de la aceleración hacia un nivel de energía prescrito. Tal inestabilidad del haz ocurre fácilmente cuando las partículas cargadas se encuentran en un bajo nivel de energía inmediatamente tras su inyección dentro del sincrotrón, sobre el conteo de repulsiones (efecto de carga de espacio) entre las partículas que constituyen los haces de partículas cargadas. Como resultado de la inestabilidad del haz, parte de las partículas cargadas aumentan drásticamente la amplitud de la oscilación (oscilación del betatrón) con respecto a la órbita diseñada mientras están circulando en el sincrotrón. Estas partículas se pierden por la colisión con las paredes del conducto de vacío y de los equipos auxiliares.

20 Tras la aceleración a un nivel prescrito de energía bajo la influencia de la inestabilidad del haz, los haces de partículas cargadas tienen la distribución de partículas en el espacio de fase como se muestra en la figura 10. Las partículas del haz circulan con la oscilación del betatrón en los sentidos horizontal y vertical alrededor de la órbita diseñada. La figura 10(A) muestra el espacio de fase en sentido horizontal tras la finalización de la aceleración y la figura 10(B) muestra el espacio de fase en el sentido vertical tras la finalización de la aceleración. El eje de abscisas en la figura 10 representa la desviación (posición P) de la órbita diseñada y el eje de ordenadas en la figura 10 representa la inclinación (ángulo  $\theta$ ) hacia la órbita diseñada. La distribución de las partículas en los haces de partículas cargadas que han experimentado la aceleración tiene la parte principal en el centro y a la parte periférica se le denomina halo. El halo está formado por aquellas partículas que han aumentado la amplitud de la oscilación (emitancia) en los sentidos horizontal y vertical bajo la influencia de la inestabilidad del halo. El grado de la formación del halo no tiene reproducibilidad ya que el grado de inestabilidad del haz no tiene reproducibilidad.

35 La eyección de partículas del sincrotrón empieza con aquellas partículas del haz que tienen una gran amplitud de oscilación del betatrón (emitancia) y que han excedido el límite de la estabilidad. Esto sugiere que las partículas del haz que forman halos (o partículas del halo del haz) se extraen primero fuera de las partículas del haz que circulan en el sincrotrón. Esto es una razón probable por la cual los haces extraídos (o los haces de partículas cargadas extraídas del sincrotrón) carecen de buena reproducibilidad en emitancia inmediatamente después de la extracción, y por consiguiente son pobres la reproducibilidad del tamaño del haz y la estabilidad de la órbita del haz en el aparato de irradiación inmediatamente después de iniciarse la extracción del sincrotrón. Los resultados de los experimentos actuales de los inventores revelan que las partículas del haz extraídas del sincrotrón disminuyen rápidamente en emitancia con el transcurso del tiempo. Una probable razón para esto es que los haces extraídos disminuyen rápidamente en emitancia según se realiza la extracción de las partículas del halo del haz.

#### 45 OBJETIVO Y SUMARIO DE LA INVENCION

Es un objetivo de la presente invención proporcionar un sistema de terapia por haz de partículas con un sincrotrón, que produce haces de irradiación adecuados para la terapia por haz de partículas de alta precisión, con los haces de irradiación controlados con precisión para el posicionamiento y tamaño del haz.

50 El sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con el aspecto de la presente invención como se define en la reivindicación 1, permite el posicionamiento y el tamaño del haz precisos de los haces de irradiación y la producción de haces de irradiación adecuados para la terapia por haz de partículas precisa. La invención se define en la reivindicación 1. Las realizaciones preferidas se definen en las reivindicaciones dependientes.

#### 55 BREVE DESCRIPCION DE LOS DIBUJOS

La(s) realización(es) de la presente invención se describirá(n) detalladamente basándose en las siguientes figuras, en las que:

60 La figura 1 es un diagrama que muestra la construcción del sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con el Ejemplo 1;  
La figura 2 es un diagrama de tiempos que muestra la secuencia de funcionamiento del sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con el Ejemplo 1;  
La figura 3 es un diagrama que muestra el principio del método para eliminar las partículas del halo del haz de acuerdo con el Ejemplo 1;  
65 La figura 4 es un diagrama de tiempos que muestra la secuencia de funcionamiento del sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con el Ejemplo 2;

La figura 5 es un diagrama que muestra el principio del método para eliminar las partículas del halo del haz de acuerdo con el Ejemplo 2;

La figura 6 es un diagrama de tiempos que muestra la secuencia de funcionamiento del sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con el Ejemplo 3;

5 La figura 7 es un diagrama de tiempos que muestra la secuencia de funcionamiento del sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con el Ejemplo 4;

La figura 8 es un diagrama de tiempos que muestra la secuencia de funcionamiento de un sistema de terapia por haz de partículas convencional;

10 La figura 9 es un diagrama que ilustra el método para la irradiación de exploración por puntos. La parte (A) es un diagrama que muestra una capa de la parte afectada dividida en el sentido de profundidad, como se ve desde el lado aguas arriba del haz de irradiación. La parte (B) es una vista frontal que muestra la construcción del dispositivo de irradiación unido al sistema de terapia por haz de partículas; y

La figura 10 es un diagrama que muestra el espacio de fase de los haces circulantes en el momento de completarse la aceleración del sincrotrón.

15

#### DESCRIPCIÓN DE LAS REALIZACIONES PREFERIDAS

El sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con la presente invención se realiza por medio de la realización que se describirá a continuación con referencia a los dibujos que se adjuntan.

#### 20 Ejemplo 1

Este ejemplo demuestra el sistema de terapia por haz de partículas construido como se muestra en la figura 1.

25 El sistema de terapia por haz de partículas 100 está compuesto por un sincrotrón 200, un sistema de transporte de haces 300, una sala de tratamiento 400, un dispositivo de irradiación 500 y una unidad de control 600. El sincrotrón 200 recibe haces de partículas cargadas que han sido preaceleradas por medio de un preacelerador 11 tal como un linac 11, que las expulsa tras la aceleración a un cierto nivel de energía. El sistema de transporte de haces 300 transporta los haces salientes del sincrotrón 200 a la sala de tratamiento 400. El dispositivo de irradiación 500 dirige los haces de partículas cargadas a la parte afectada de un paciente 41.

30 El sincrotrón 200 se compone de los siguientes elementos.

- Un inyector 24 para inyectar los haces de partículas cargadas que han sido preaceleradas por el preacelerador 11.

35 - Electroimanes de desviación 21 para desviar los haces de partículas cargadas y hacerlos circular a lo largo de una órbita predeterminada.

- Electroimanes en montaje cuadrupolar 22 de tipo convergencia/divergencia para hacer converger los haces de partículas cargadas en los sentidos horizontal/vertical, evitando por ello que se dispersen.

- Una fuente de alimentación 22A para excitar los electroimanes 22 en montaje cuadrupolar.

40 - Una cavidad de aceleración 25 para acelerar los haces de partículas cargadas a un nivel predeterminado de energía por medio de una tensión de aceleración de RF

- Electroimanes 23 en montaje hexapolar para establecer el límite de estabilidad para la amplitud de oscilación de los haces circulantes de partículas cargadas.

- Una fuente de alimentación 23A para excitar los electroimanes en montaje hexapolar 23.

45 - Un dispositivo de extracción 26 para producir un campo electromagnético de RF para aumentar la amplitud de la oscilación de los haces de partículas cargadas y hacer que excedan el límite de estabilidad.

- Una fuente de alimentación de RF 26A para alimentar el dispositivo de extracción 26 con una energía eléctrica de RF para la extracción.

- Un dispositivo de detección para la extracción 27 para generar un campo electrostático y un campo magnetoestático para desviar los haces de partículas cargadas, que hayan excedido el límite de estabilidad y hacer que sean extraídos de sincrotrón 200.

50

- Una fuente alimentación de alta tensión 27A para excitar el dispositivo de desviación para la extracción 27.

El sistema de transporte de haces 300 se compone de los siguientes componentes.

55 - Un electroimán de desvío 31 para generar un campo magnético para desviar y conducir los haces salientes del sincrotrón 200 a la sala de tratamiento 400 a lo largo de una órbita predeterminada.

- Unos electroimanes en montaje cuadrupolar 32 del tipo convergencia/divergencia para hacer converger los haces de partículas cargadas en los sentidos horizontal/vertical, evitando por ello su dispersión durante el transporte.

60 - Un electroimán de apantallamiento de haces 33 para conectar y desconectar la alimentación de los haces de partículas cargadas al dispositivo de irradiación 500 en la sala de tratamiento.

- Una fuente de alimentación 33A para excitar el electroimán de apantallamiento de haces 33.

- Un descargador de haces 34 para descartar los componentes de haces eliminados por medio del electroimán de apantallamiento de haces.

65

El electroimán de apantallamiento de haces 33 es un electroimán de desvío para generar un campo magnético bipolar. Actúa para que el campo magnético bipolar excitado haga desviar los componentes innecesarios del haz y que el descargador de haces 34 los descarte. Alternativamente, desvía los haces por medio del campo magnético bipolar excitado y suministra sólo los componentes del haz desviado al dispositivo de irradiación 500. El procedimiento anterior simplemente necesita un simple ajuste para el sistema de transporte de haces y el último procedimiento asegura la seguridad ya que la alimentación de los haces de partículas cargadas al dispositivo de irradiación 500 se interrumpe cuando ocurre una anomalía en el equipo.

El dispositivo de irradiación 500 se compone de los siguientes componentes como se muestra en la figura 9(B).

- Electroimanes de exploración 51a y 51b para desviar en los sentidos horizontal y vertical los haces de partículas cargadas, que han sido introducidas por el sistema de transporte de haces 300, y para explorarlos según dos dimensiones de acuerdo con la sección transversal de la parte afectada 42.
- Una fuente de alimentación 500A para excitar los electroimanes de exploración 51a y 51b.
- Monitores 52a y 52b para supervisar la posición, tamaño (forma) y dosis de los haces de partículas cargadas.

La unidad de control 600 está conectada a la fuente de alimentación 22A para los electroimanes en montaje cuadripolar 22, la fuente alimentación de RF 26A para alimentar el dispositivo de extracción 26 con una energía eléctrica de RF para la extracción, la fuente alimentación de alta tensión 27A para el dispositivo de desviación de la extracción 27, la fuente de alimentación 33A para el electroimán de apantallamiento de haces 33 y la fuente de alimentación 500A para los electroimanes de exploración 51a y 51b, para su control.

El sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con este ejemplo utiliza el método de exploración por puntos para la irradiación. Este método se describirá más adelante con referencia a las figuras 9(A) y 9(B). La figura 9(A) muestra una capa de la parte afectada que ha sido dividida en profundidad, como se ve desde el lado aguas arriba de los haces de partículas cargadas para la irradiación. Los puntos para la irradiación (SP) se definen dividiendo la parte afectada tridimensionalmente en profundidad en capas y dividiendo posteriormente cada capa en dos dimensiones. Se selecciona cada capa para la irradiación ajustando la energía de los haces de irradiación o la energía de los haces extraídos del sincrotrón 200. A continuación, cada capa se explora en dos dimensiones con los haces de irradiación por medio de los electroimanes de exploración 51 de modo que a cada punto de irradiación (SP) se le proporciona una dosis predeterminada, como se muestra en la figura 9 (A). Tan pronto como un punto de irradiación (SP) ha recibido una dosis predeterminada, se cortan rápidamente los haces de irradiación y se traslada el sentido de irradiación al siguiente punto de irradiación (SP) con los haces de irradiación cortados. La irradiación se reanuda y se repite del mismo modo mencionado anteriormente.

El sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo por este ejemplo se ejecuta de acuerdo con la secuencia de funcionamiento que se describirá más adelante con referencia a la figura 2. La figura 2 muestra el periodo de preparación de la extracción que sigue a la finalización de la aceleración del sincrotrón y el diagrama de tiempos inmediatamente después de iniciarse la extracción (o la irradiación).

En la figura 2, el eje de abscisas representa el tiempo (t). En la figura 2(A), el eje de ordenadas representa la corriente de excitación a suministrar al electroimán de exploración 51 procedente de la fuente alimentación de la excitación 500A en respuesta a la señal de instrucción de la exploración que se transmite desde la unidad de control 600 a la fuente de alimentación de la excitación 500A para el electroimán de exploración 51. En la figura 2(B), el eje de ordenadas representa la energía eléctrica de RF para la extracción a suministrar al dispositivo de extracción 26 procedente de la fuente alimentación de RF 26A en respuesta a las señales de control de RF para la extracción que se transmiten a la fuente de alimentación de RF 26A para el dispositivo de extracción 26 procedentes de la unidad de control 600. En las figuras 2(C) y 2(D), el eje de ordenadas representa la corriente de excitación a suministrar al electroimán en montaje cuadripolar 22 procedente de la fuente alimentación de la excitación 22A en respuesta a las señales de control de la corriente de excitación suministradas a la fuente de alimentación de la excitación 22A para el electroimán en montaje cuadripolar 22 procedentes de la unidad de control 600. De modo semejante, también representa la corriente de excitación a suministrar al electroimán en montaje hexapolar 23 procedente de la fuente de alimentación de la excitación 23A. En la figura 2(E) el eje de ordenadas representa la magnitud de los haces de partículas cargadas que se extraen del sincrotrón. En la figura 2(F), el eje de ordenadas representa la corriente de excitación o la tensión aplicada a suministrar al dispositivo de desviación de la extracción 27 procedente de la fuente de alimentación de la excitación 27A en respuesta a las señales de control que se transmiten a la fuente alimentación de la excitación (o a la fuente de alimentación de alta tensión) para el dispositivo de desviación de la extracción 27 procedentes de la unidad de control 600. En la figura 2(G), el eje de ordenadas representa la secuencia según la cual se conecta y se desconecta el electroimán de apantallamiento de haces 33 en respuesta a las señales de control que se transmiten a la fuente alimentación de la excitación 33A para el electroimán de apantallamiento de haces 23 procedentes de la unidad de control 600. En la figura 2(H), el eje de ordenadas representa la secuencia según la cual se conectan y desconectan los haces de irradiación (procedentes del dispositivo de irradiación 500). Los haces de irradiación forman secuencialmente el punto S1, punto S2, punto S3, punto S4.....según se van conectando.

Como se muestra en la figura 2(A), la corriente de excitación suministrada a los electroimanes de exploración 51 procedente de la fuente alimentación de excitación 500A se aumenta para que los haces de irradiación exploren las posiciones de irradiación. La corriente de exploración suministrada a los electroimanes de exploración 51 procedente de la fuente de alimentación de excitación 500A se mantiene constante para que los haces de irradiación permanezcan en una posición de irradiación fija. El método de exploración por puntos se aplica de tal forma que un punto de irradiación (SP) se irradia según una dosis prescrita, con el electroimán de exploración 51 excitado según un nivel prescrito y la exploración de los haces de partículas cargadas suspendida, y a continuación se irradia el punto contiguo de irradiación (SP), con los haces de irradiación desconectados y el electroimán de exploración 51 excitado a un nivel diferente como se muestra en las figuras 2(A) y 2(H).

Tras el inicio de la extracción (o irradiación), el campo electromagnético de RF a aplicar al dispositivo de extracción 26 se conecta en el momento de la irradiación del punto durante el cual se suministran los haces de partículas cargadas al dispositivo de irradiación 500, y el campo electromagnético de RF a aplicar al dispositivo de extracción 26 se desconecta en el momento del movimiento desde un punto al otro durante el cual alimentación de los haces de partículas cargadas al dispositivo de irradiación 500 se interrumpe, como se muestra en la figura 2(B). Al mismo tiempo que se interrumpe la alimentación de los haces de partículas cargadas al dispositivo de irradiación 500, el electroimán de apantallamiento 33 acoplado al dispositivo de irradiación 500 se conecta para interrumpir la alimentación de los haces de partículas cargadas, como se muestra en la figura 2(G).

El procedimiento en este ejemplo se lleva a cabo de tal manera que las partículas del haz que circulan en el sincrotrón 200 son rectificadas mediante la eliminación de las partículas del halo del haz (o aquellas partículas del haz que forman halos) en el periodo de preparación de la extracción. Para ser exactos, los electroimanes en montaje cuadrupolar 22 o los electroimanes en montaje hexapolar 23 en el sincrotrón 200 son excitados en el periodo de preparación de la extracción como se muestra en las figuras 2(C) y 2(D). Mediante el control de los electroimanes multipolo (electroimanes en montaje cuadrupolar 22 o electroimanes en montaje hexapolar 23) se altera el límite de estabilidad. Al aumentar la magnitud de la excitación de los electroimanes en montaje cuadrupolar 22 o de los electroimanes en montaje hexapolar 23 se reduce el límite de estabilidad, creando por lo tanto una situación en la cual aquellas partículas del haz que circulan en el sincrotrón 200 que tienen una gran amplitud de oscilación en el betatrón exceden el límite de estabilidad. Las partículas del halo del haz que tienen una mayor amplitud de oscilación del betatrón exceden el límite de estabilidad. El dispositivo de desvío de la extracción 27 es excitado en el periodo de preparación de la extracción como se muestra mediante la línea sólida en la figura 2(F), y aplica el campo electrostático y el campo magnetoestático y hace que aquellas partículas del haz que hayan excedido el límite de estabilidad sean extraídas de sincrotrón 200 y conducidas al sistema de transporte de haces 300. Dado que el electroimán de apantallamiento de haces 33 es excitado en el periodo de preparación de la extracción como se muestra en la figura 2(G), las partículas del haz que han sido conducidas dentro del sistema de transporte de haces 300 se desvían de la órbita de diseño y se eliminan como resultado de la colisión con la descarga de haces 34. Dado que las partículas del haz que han sido extraídas del sincrotrón 200 en el periodo de preparación de la extracción se eliminan en el sistema de transporte de haces 300, no se aportan al dispositivo de irradiación 500 y por lo tanto ningún haz se expulsa del dispositivo de irradiación 500 como se muestra en la figura 2(H).

Al ser pequeñas en magnitud, las partículas del haz se pueden eliminar dentro del sincrotrón 200 si los campos electrostáticos y electromagnéticos a aplicar al dispositivo de desvío de la extracción 27 se desconectan en el periodo de preparación de la extracción, como se indica por medio de la línea a trazos en la figura 2(F). El eliminar los haces de partículas cargadas dentro del sistema de transporte de haces ofrece la ventaja de evitar que el aparato se pueda hacer radioactivo. El eliminar los haces de partículas cargadas dentro del sincrotrón 200 ofrece la ventaja de mejorar la seguridad en esos haces innecesarios que no se aportan al dispositivo de irradiación 500 porque el dispositivo de desvío de la extracción 27 está desconectado al mismo tiempo.

La eliminación de las partículas del haz dentro del sistema de transporte de haces en el periodo de preparación de la extracción se realiza basándose en el principio que se describe más adelante con referencia a la figura 3. Las partículas individuales del haz constituyen los haces de partículas cargadas que circulan (en la forma de haces circulantes BM) alrededor del centro de la órbita de diseño, con la oscilación del betatrón en los sentidos horizontal y vertical. La figura 3 muestra el estado de los haces de partículas cargadas que circulan dentro del sincrotrón 200, en el espacio en fase horizontal (con relación a la extracción) y en el espacio en fase vertical (perpendicular al sentido horizontal). El eje de abscisas representa la desviación (posición P) de la órbita de diseño, y el eje de ordenadas representa el gradiente (ángulo  $\theta$ ) con respecto a la órbita de diseño.

La figura 3(A) muestra el espacio de fase en el sentido horizontal antes de la eliminación de las partículas del halo del haz, y la figura 3(B) muestra el espacio de fase en sentido vertical antes de la eliminación de las partículas del halo del haz. El electroimán en montaje hexapolar 23 en su estado excitado forma la región triangular estable SA en el espacio de fase en el sentido horizontal como se muestra en la figura 3(A). En el espacio de fase para los haces de partículas cargadas están distribuidos los haces BMC formando el núcleo en el centro y están también distribuidos los haces circulantes BMH que consisten en partículas del halo del haz alrededor del núcleo. Las partículas del haz dentro de la región estable continúan circulando fijas dentro del sincrotrón 200. Al contrario, las

partículas de fuera de la región estable aumentan escalonadamente la amplitud de la oscilación del betatrón a lo largo de la rama de extracción, y eventualmente introducen la apertura OP del dispositivo de desvío de la extracción 27 para la extracción desde el sincrotrón 200. Antes de eliminar las partículas del halo del haz, el tamaño de la región estable SA se estabiliza tanto como mayor sea la emitancia (área ocupada en el espacio de fase) de las partículas del haz. Las partículas circulantes BMC que forman el núcleo y las partículas circulantes BMH que consisten en partículas del halo del haz, que están dentro la región estable SA, circulan de manera estable dentro del sincrotrón 200.

El tamaño de la región estable SA se determina por medio de la magnitud de la excitación para los electroimanes en montaje cuadrupolar 22 y para los electroimanes en montaje hexapolar 23. Con la excitación aumentada, la región estable SA se reduce como se muestra en la figura 3(C). La figura 3(C) muestra el espacio de fase (en el sentido horizontal) durante la eliminación de las partículas del halo del haz, y la figura 3(D) muestra en espacio de fase (en el sentido vertical) durante la eliminación de las partículas del halo del haz. La magnitud de la excitación para los electroimanes en montaje cuadrupolar 22 y para los electroimanes en montaje hexapolar 23 se ajusta para reducir el límite de estabilidad, expulsando por ello las partículas del halo del haz de la región de estabilidad SA. Aquellas partículas del halo del haz que hayan excedido el límite de estabilidad se extraen del sincrotrón 200. Los haces B así extraídos se eliminan por medio del sistema de transporte de haces 300.

Tras la eliminación de las partículas del halo del haz, la magnitud de la excitación de los electroimanes en montaje cuadrupolar 22 y la de los electroimanes en montaje hexapolar 23 se ajusta de nuevo de manera de aumentar el límite de estabilidad todo lo necesario, como se muestra en la figura 3(E). En la región de estabilidad SA permanecen los haces circulantes BMC.

Tras el inicio de la extracción (irradiación), se aplica un campo electromagnético de RF para la extracción al dispositivo de extracción 26, como se muestra en la figura 2(B). La aplicación de un campo electromagnético de RF para la extracción hace que los haces circulantes BMC dentro de la región estable SA aumenten su emitancia en el sentido horizontal (lo que da lugar a un aumento de la amplitud de la oscilación de las partículas del haz). Dado que el dispositivo de desvío de la extracción 27 está activado, aquellas partículas del haz que excedan el límite de estabilidad se extraen del sincrotrón 200 y se conducen al sistema de transporte de haces 300. Dado que el electroimán de apantallamiento de haces está desconectado, aquellas partículas del haz extraídas del sincrotrón 200 siguen a lo largo del sistema de transporte de haces 300 y alcanzan el dispositivo de irradiación 500. Como el campo electromagnético de RF aplicado al dispositivo de extracción 26 está desconectado, se suspende la extracción de las partículas del haz del sincrotrón 200. Es decir, la conexión y desconexión del campo electromagnético de RF para el dispositivo de extracción 26 controla la extracción de las partículas del haz del sincrotrón 200, y la conexión y desconexión del electroimán de apantallamiento de haces 33 controla los haces de irradiación del dispositivo de irradiación 500.

Este ejemplo produce los siguientes efectos. El sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con este ejemplo elimina las partículas del halo del haz (como parte de los haces de partículas cargadas que circulan alrededor del sincrotrón) antes del inicio de la irradiación, lo que mejora la reproducibilidad del tamaño del haz inmediatamente después del inicio de la irradiación y la estabilidad de la órbita del haz. Esto por su parte lleva al posicionamiento y al tamaño del haz precisos de los haces de irradiación y a la producción de haces de irradiación adecuados para la terapia precisa de haz de partículas tal como la exploración por puntos aplicable a las partes afectadas de forma compleja.

#### Ejemplo 2

Este ejemplo demuestra otro caso del sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con la presente invención. El sistema de terapia por haz de partículas es en este ejemplo idéntico en construcción al del ejemplo 1 como se muestra en la figura 1 pero es diferente en la secuencia de funcionamiento de la del ejemplo 1.

El sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con este ejemplo se ejecuta de acuerdo con la secuencia de funcionamiento que se describe a continuación con referencia a la figura 4. La figura 4 muestra el periodo de preparación de la extracción que sigue a la finalización de la aceleración del sincrotrón y el gráfico de tiempos inmediatamente después del inicio de la extracción, que son aplicables al método de exploración por puntos para la irradiación.

La diferencia con el ejemplo 1 es el método para eliminar las partículas del halo del haz en la distribución de los haces de partículas cargadas tras la finalización de la aceleración. En la figura 4, el eje de abscisas representa el tiempo (t). El eje de ordenadas en las figuras 4(A) a 4(H) son respectivamente idénticas a las correspondientes en las figuras 2(A) a 2(H).

En este ejemplo, el sistema de terapia por haz de partículas se ejecuta de tal manera que los electroimanes en montaje cuadrupolar 22 y los electroimanes en montaje hexapolar 23 para el sincrotrón 200 se excitan a un nivel sustancialmente constante en el periodo de preparación de la extracción, tal como se muestra en las figuras 4(C) y 4(D). De esta manera la excitación mantiene el nivel de estabilidad constante. Por el contrario, la aplicación de un

campo electromagnético de RF al dispositivo de extracción 26 en el periodo de preparación de la extracción mostrado en la figura 4(B) (que aumenta la amplitud de la oscilación del betatrón de las partículas están circulantes en el sentido horizontal) hace que las partículas del halo del haz (con una amplitud aumentada de la oscilación del betatrón en sentido horizontal) excedan el nivel de estabilidad. Como en el ejemplo 1, aquellas partículas del halo del haz que hayan excedido el límite de estabilidad se eliminan del sincrotrón 200 y se conducen al sistema de transporte de haces 300 por medio del dispositivo de desvío de la extracción 27 y se eliminan a continuación por medio del electroimán de apantallamiento del haz. Las partículas del halo del haz, que son pequeñas en magnitud, se pueden hacer desaparecer en el sincrotrón 200 desconectando los campos electrostático y magnetoestático para el dispositivo de desvío de la extracción 27, como se indica por medio de la línea de puntos en la figura 4(F).

La eliminación de las partículas del halo del haz en el periodo de preparación de la extracción se realiza basándose en el principio que se describe más adelante con referencia a la figura 5. La figura 5(A) muestra el espacio de fase en el sentido horizontal antes de la eliminación de las partículas del halo del haz, y la figura 5(B) muestra el espacio de fase en sentido vertical antes de la eliminación de las partículas del halo del haz. En el espacio de fase tras la finalización de la aceleración, los haces circulantes BMC que forman el núcleo están distribuidos en el centro, y los haces circulantes BMH que consisten en partículas del halo del haz están distribuidos en la región periférica. La magnitud de la excitación para los electroimanes en montaje cuadripolar 22 y para los electroimanes en montaje hexapolar 23 se establece de tal manera que la región estable SA es mayor que la emitancia (área ocupada en el espacio de fase) de los haces de partículas cargadas antes de la eliminación de las partículas del halo del haz. Dado que los haces circulantes BMC y los haces circulantes BMH están distribuidos dentro de la región estable SA como se muestra en la figura 5(A), circulan de manera estable dentro del sincrotrón 200.

Las partículas del halo del haz se eliminan por medio de la aplicación de un campo electromagnético de RF al dispositivo de extracción 26 para que las partículas del haz aumenten en emitancia (amplitud de la oscilación del betatrón) en el sentido horizontal. La figura 5(C) muestra el espacio de fase en el sentido horizontal durante la eliminación de las partículas del halo del haz y la figura 5(D) muestra el espacio de fase en el sentido vertical durante la eliminación de las partículas del halo del haz. Aquellas partículas del halo del haz que hayan excedido el límite de estabilidad se extraen del sincrotrón y se eliminan por medio del sistema de transporte de haces 300.

La figura 5(E) muestra en espacio de fase en el sentido horizontal tras la eliminación de las partículas del halo del haz y la figura 5(F) muestra el espacio de fase en sentido vertical tras la eliminación de las partículas del halo del haz. Tras la eliminación de las partículas del halo del haz, los haces circulantes BMC se distribuyen dentro de la región estable SA. En otras palabras, circulan establemente dentro del sincrotrón 200.

Tras el inicio de la extracción (irradiación), se lleva a cabo el mismo control que en el ejemplo 1. Es decir, los haces circulantes BMC se extraen del sincrotrón 200 y los haces de irradiación del dispositivo de irradiación 500 se conectan y desconectan. Este ejemplo produce el mismo efecto que el del ejemplo 1.

### Ejemplo 3

Este ejemplo demuestra otro caso del sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con la presente invención. El sistema de terapia por haz de partículas en este ejemplo emplea el método para la irradiación de exploración por tramas. Es idéntico en construcción que el del ejemplo 1 como se muestra en la figura 1. La secuencia de funcionamiento utilizada en este ejemplo se describe más adelante con referencia a la figura 6. La figura 6 muestra el periodo de preparación de la extracción que sigue a la finalización de la aceleración del sincrotrón y el diagrama de tiempos inmediatamente después del inicio de la extracción. Se utiliza en este ejemplo el mismo método que en el ejemplo 1 (para la exploración por puntos) para eliminar la distribución de las partículas del halo del haz en los haces de partículas cargadas tras la finalización de la aceleración. En la figura 6, el eje de abscisas representa el tiempo (t). Las ordenadas en las figuras 6(A) a 6(H) son respectivamente idénticas a las correspondientes en las figuras 2(A) a 2(H).

En este ejemplo, el sistema de terapia por haz de partículas se ejecuta de tal manera que los electroimanes en montaje cuadripolar 22 y los electroimanes en montaje hexapolar 23 para el sincrotrón 200 se excitan según diversas magnitudes en el periodo de preparación de la extracción, como se muestra en las figuras 4(C) y 4(D). La excitación de este modo reduce el límite de estabilidad, de modo que la distribución de las partículas del halo del haz en los haces de partículas cargadas con una gran amplitud de oscilación del betatrón exceden el límite de estabilidad. Y aquellas partículas de haces que exceden el límite de estabilidad se extraen del sincrotrón 200 por medio del dispositivo de desvío de la extracción 27 y a continuación se conducen al sistema de transporte de haces 300 para la eliminación por medio del electroimán de apantallamiento de haces 33.

De manera incidental, las partículas del halo del haz, pequeñas en magnitud, se les puede hacer desaparecer en el sincrotrón 200 desconectando los campos electrostático y electromagnético para el dispositivo de desvío de la extracción 27, como se indica por medio de la línea de trazos en la figura 6(F).

Se describe a continuación el método de exploración por tramas. Es similar al método de exploración por puntos (mostrado en la figura 9) en que la parte afectada tridimensionalmente se divide en diversas capas en el sentido de



profundidad y cada capa se divide adicionalmente bidimensionalmente en regiones pequeñas a1, a2, a3, a4, ..... (que corresponden a los puntos de irradiación). Cada capa (en el sentido de profundidad) se irradia selectivamente ajustando la energía de los haces extraídos del sincrotrón 200 (o la energía de los haces de irradiación). En cada capa, la regiones pequeñas a1, a1, a3, a4,..... se exploran secuencialmente y bidimensionalmente con el haz de irradiación (en una dosis deseada) dirigidos por el electroimán de exploración 51. El método de exploración por tramas se caracteriza porque el haz de irradiación se mantiene conectado mientras se mueve desde una región pequeña a otra. Es decir, la magnitud de excitación para el electroimán de exploración 51 se cambia continuamente tras el inicio de la extracción (o de la extracción), como se muestra en la figura 6(A), y un campo electromagnético de RF se aplica continuamente al dispositivo de extracción 26, de manera que se lleva a cabo la de irradiación continua con los haces extraídos del sincrotrón 200. Esta es la diferencia en la secuencia de funcionamiento entre el método de exploración por tramas y el método de exploración por puntos.

El método de exploración por tramas de este ejemplo también produce el mismo efecto que el del ejemplo 1. Es decir, lo mismo que en el método de exploración por puntos, elimina las partículas del halo del haz en el periodo de preparación de la extracción, lo que mejora la reproductibilidad y la estabilidad del tamaño del haz inmediatamente después del inicio de la irradiación y también mejora la precisión de la irradiación.

Ejemplo 4

Este ejemplo demuestra otro caso adicional del sistema de terapia por haz de partículas de acuerdo con la presente invención. El sistema de terapia por haz de partículas en este ejemplo emplea para la irradiación el método de exploración por tramas. Es idéntico en su construcción al del ejemplo 1 como se muestra en la figura 1. La secuencia de funcionamiento utilizada en este ejemplo se describe más adelante con referencia a la figura 7. La figura 7 muestra el periodo de preparación de la extracción que sigue a la finalización de la aceleración del sincrotrón y el diagrama de tiempos inmediatamente después del inicio de la extracción. Se utiliza en este ejemplo el mismo método que en el ejemplo 2 (para la exploración por puntos) para eliminar la distribución de partículas del halo del haz tras la finalización de la aceleración. En la figura 7, el eje de abscisas representa el tiempo (t). Las ordenadas en la figura 7(A) a la figura 7(H) son idénticas respectivamente a las correspondientes en la figura 2(A) a la figura 2(H).

En este ejemplo, el sistema de terapia por haz de partículas se ejecuta de tal manera que se excitan los electroimanes en montaje cuadrupolar 22 y los electroimanes en montaje hexapolar 23 para el sincrotrón 200 a un nivel constante (de modo que el límite de estabilidad se mantiene constante) en el periodo de preparación de la extracción, como se muestra en las figuras 7(C) y 7(D). Por otra parte, se aplica un campo electromagnético de RF al dispositivo de extracción 26 en el periodo de preparación de la extracción, como se muestra en la figura 7(B), así como para aumentar la amplitud de la oscilación del betatrón de los haces circulantes en el sentido horizontal. Las partículas del halo del haz (con una amplitud aumentada de la oscilación del betatrón en el sentido horizontal) exceden el límite de estabilidad. Como en el ejemplo 1, aquellas partículas del halo del haz que hayan excedido el límite de estabilidad se eliminan del sincrotrón 200 y se conducen al sistema de transporte de haces 300 por medio del dispositivo de desvío de la extracción 27 y se eliminan a continuación por medio del electroimán de apantallamiento de haces 33.

Las partículas del halo del haz, que son pequeñas en magnitud, se pueden hacer desaparecer en el sincrotrón 200 desconectando los campos electrostático y electromagnético para el dispositivo de desvío de la extracción 27, como se indica por medio de la línea a trazos en la figura 7(F).

Este ejemplo produce el mismo efecto que el del ejemplo 1.

La presente descripción se puede aplicar no sólo al sistema de terapia por haz de partículas para el tratamiento del cáncer sino también para investigaciones físicas que impliquen la irradiación de un objetivo con haces de partículas cargadas de alta energía aceleradas por un sincrotrón que necesite una alta precisión y una distribución de la intensidad deseadas.

Los expertos en la técnica comprenderán que se pueden hacer diversas modificaciones, combinaciones, sub combinaciones y alteraciones dependiendo de los requisitos del diseño y otros factores en la medida en que caigan dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema de terapia por haz de partículas (100) que comprende:

5 Un sincrotrón (200) adaptado para acelerar haces de partículas cargadas a un nivel deseado de energía y permitir la extracción de dichos haces de partículas cargadas que excedan un límite de estabilidad para la amplitud de la oscilación de los haces circulantes de partículas cargadas, un dispositivo de irradiación (500) adaptado para irradiar un objetivo con dichos haces de partículas cargadas, y

10 un sistema de transporte de haces (300) adaptado para conducir dichos haces de partículas cargadas extraídas de dicho sincrotrón (200) a dicho dispositivo de irradiación (500), **caracterizado por** una unidad de control (600) adaptada para controlar el sincrotrón y el sistema de transporte de haces para eliminar parte de dichos haces de partículas cargadas que circulan en dicho sincrotrón (200) de dentro del sincrotrón o del sistema de transporte de haces en un periodo de preparación de la extracción entre la finalización de la aceleración del sincrotrón y el inicio de la irradiación y

15 permitir que el resto de dichos haces circulantes de partículas cargadas sean extraídos de dicho sincrotrón (200) y conducidos a dicho dispositivo de irradiación (500) en un periodo de irradiación posterior.

20 2. El sistema de terapia por haz de partículas (100) de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicho sincrotrón (200) tiene electroimanes multipolo (22, 23) y en el que dicha unidad de control (600) está adaptada, en el periodo de preparación de la extracción,

25 para controlar dichos electroimanes multipolo (22, 23) así como para reducir dicho límite de estabilidad y para controlar el sincrotrón para eliminar parte de los haces de partículas cargadas que hayan excedido dicho límite de estabilidad reducido dentro del propio sincrotrón (200) o para controlar el sincrotrón y el sistema de transporte de haces (300) para extraer la parte de los haces de partículas cargadas que hayan excedido el límite de estabilidad reducido del sincrotrón, conduciéndolos al sistema de transporte de haces y eliminándolos de dentro del sistema de transporte de haces.

30

3. El sistema de terapia por haz de partículas (100) de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicho sincrotrón (200) tiene un dispositivo de extracción (26) para alterar la amplitud de la oscilación del betatrón de dichos haces de partículas cargadas, y

35 en el que dicha unidad de control (600) está adaptada, en el periodo de preparación de la extracción,

para controlar dicho dispositivo de extracción (26) así como para aumentar la amplitud de dicha oscilación del betatrón y

40 para controlar el sincrotrón para eliminar parte de los haces de partículas cargadas que hayan excedido dicho límite de estabilidad dentro del propio sincrotrón (200) o para controlar el sincrotrón y el sistema de transporte de haces (300) para extraer la parte de los haces de partículas cargadas que hayan excedido el límite de estabilidad del sincrotrón, conduciéndolos al sistema de transporte de haces y eliminándolos de dentro del sistema de transporte de haces.

4. El sistema de terapia por haz de partículas (100) de acuerdo con la reivindicación 2 o con la reivindicación 3, en el que dicho sistema de transporte de haces (300) tiene un electroimán de desvío (33) para generar un campo magnético bipolar y,

45 en el caso en el que dichos haces de partículas cargadas extraídas de sincrotrón (200) tengan que ser eliminadas dentro del sistema de transporte de haces (300) en el periodo de preparación de la extracción, dicho electroimán de desvío (33) está adaptado para generar el campo eléctrico bipolar como para desviar los haces de partículas cargadas extraídos del sincrotrón con objeto de eliminarlos.

50

FIG. 1

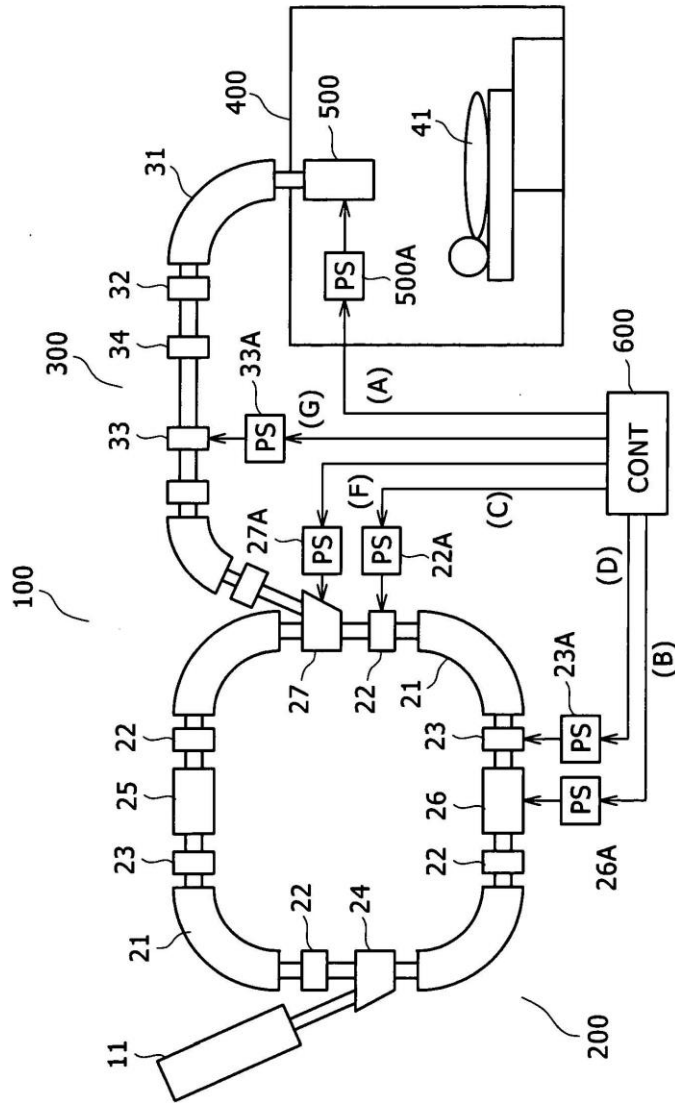


FIG. 2

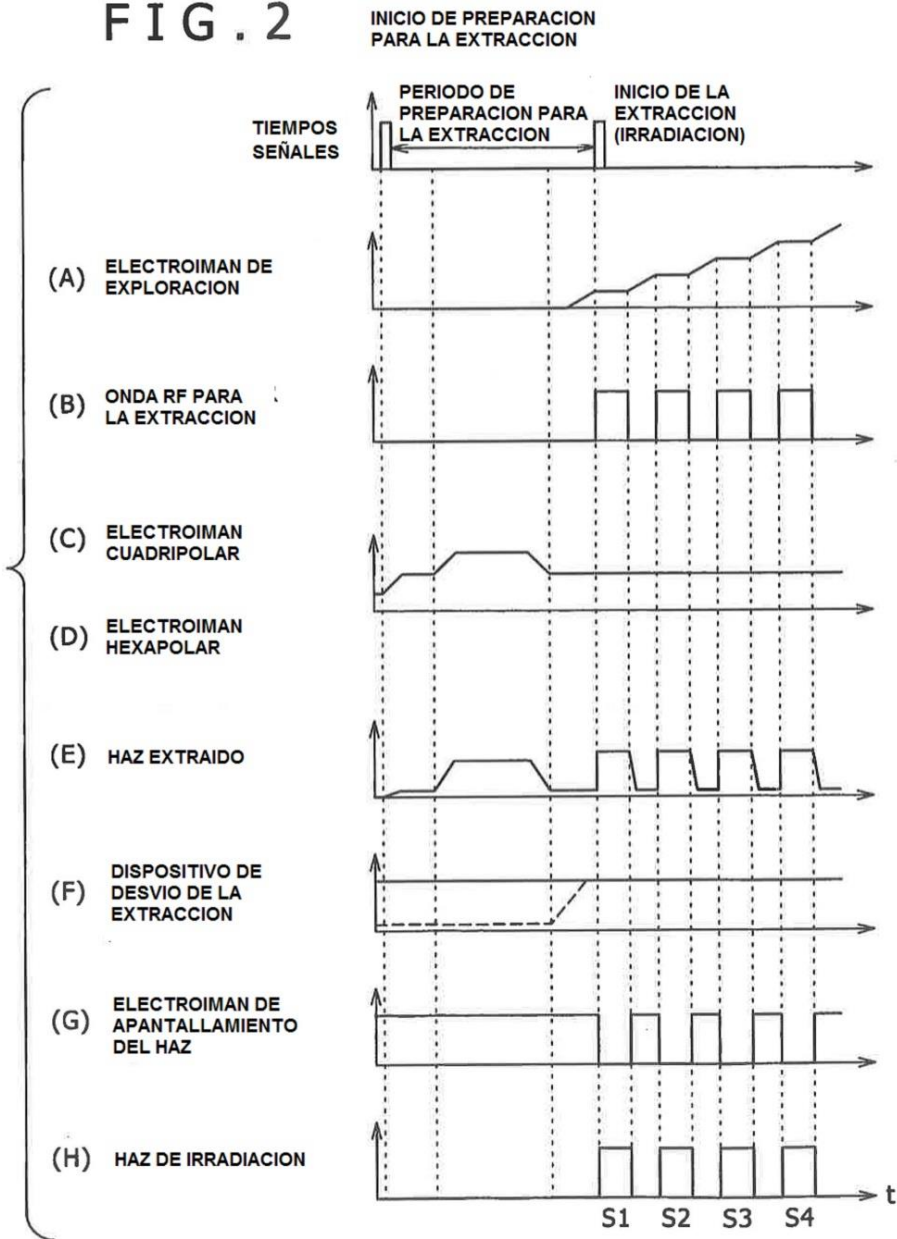


FIG. 3

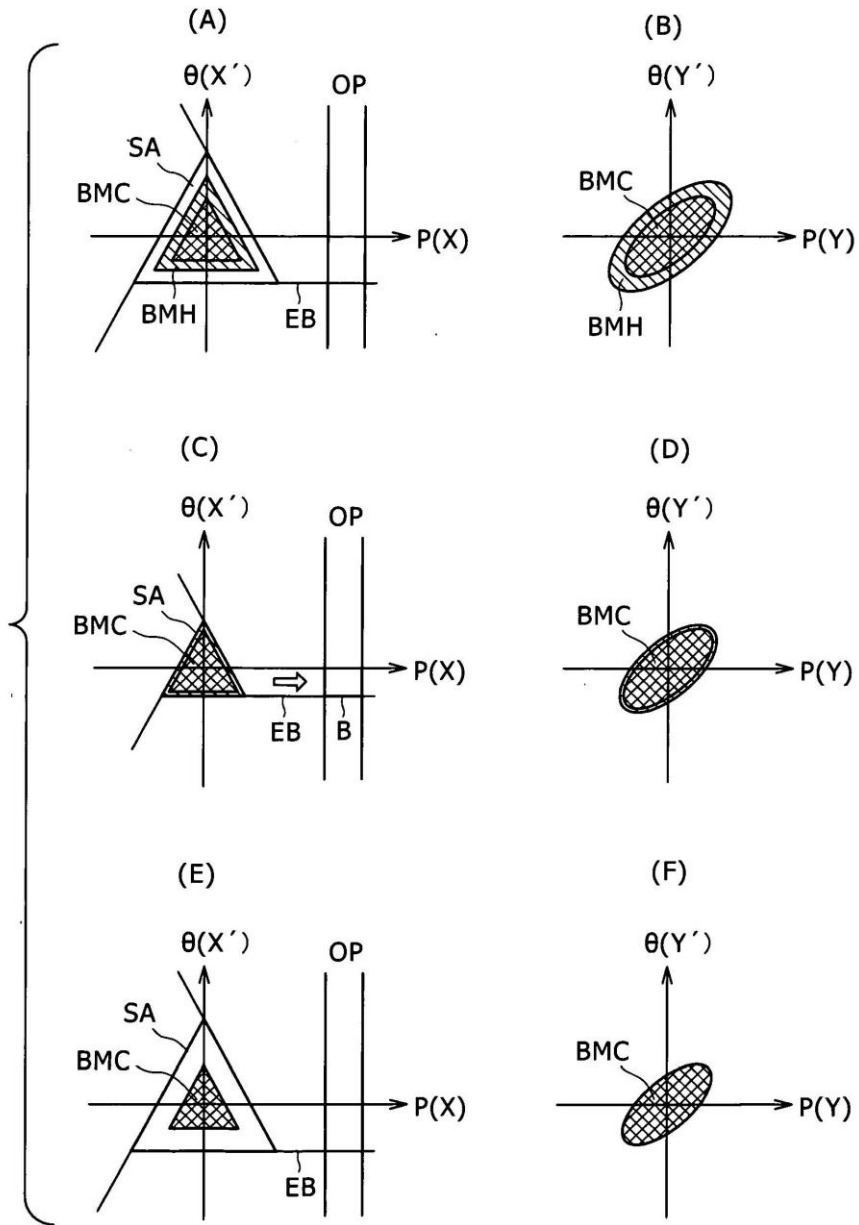


FIG. 4

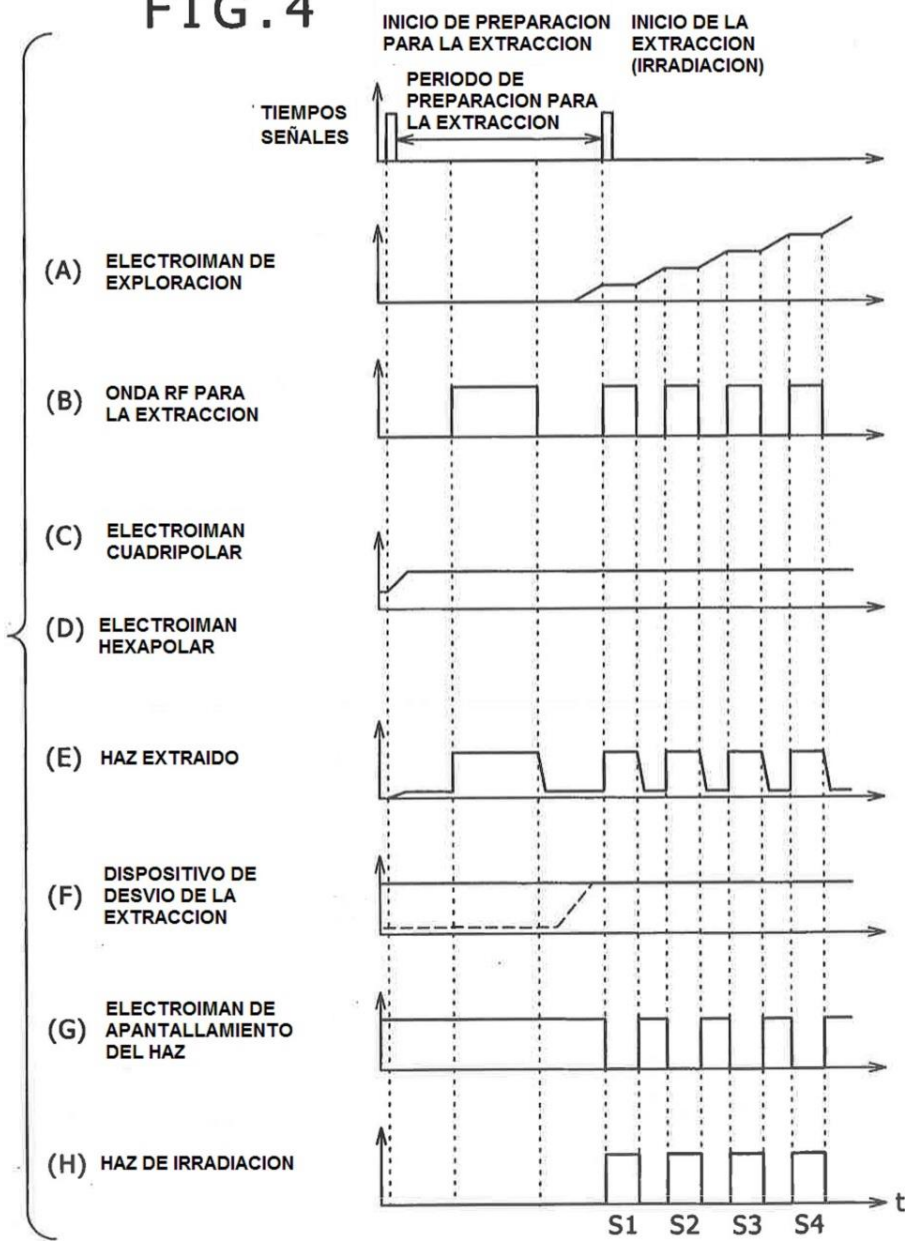


FIG. 5

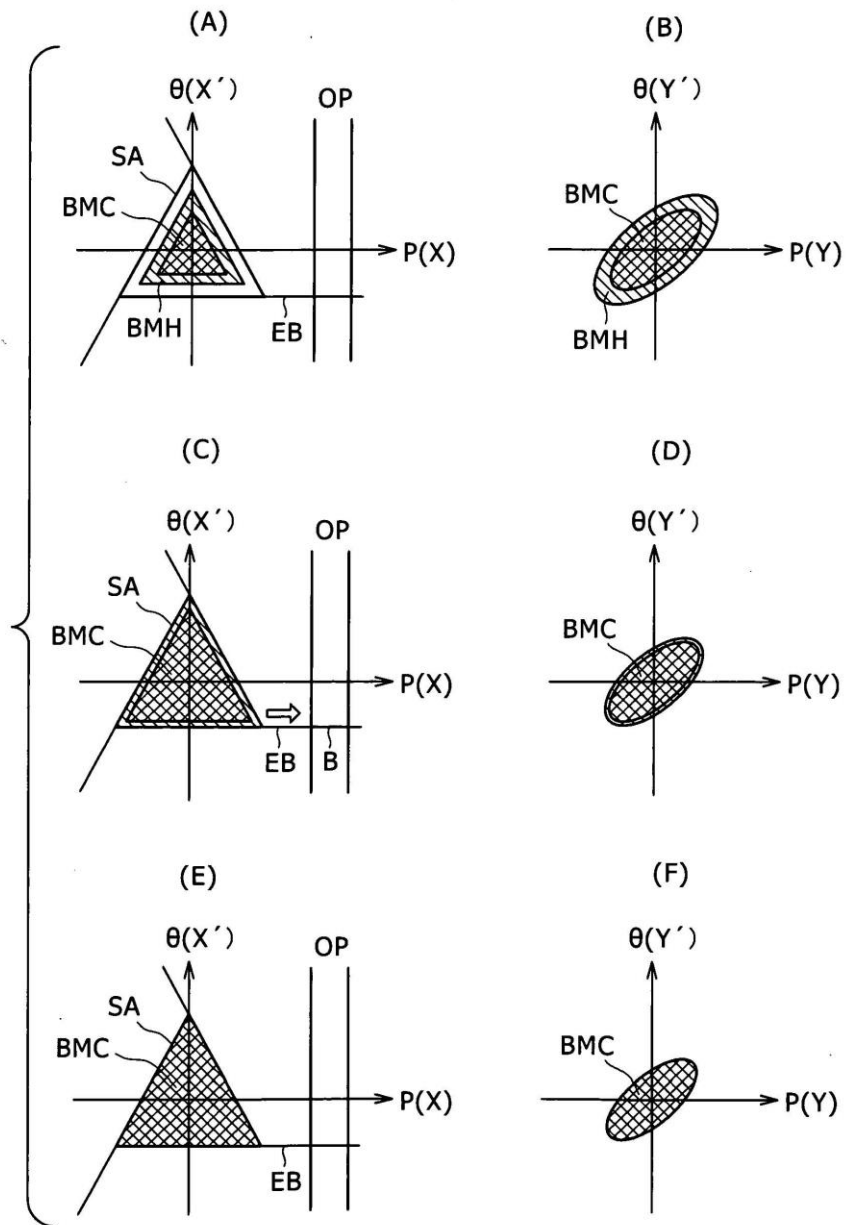


FIG. 6

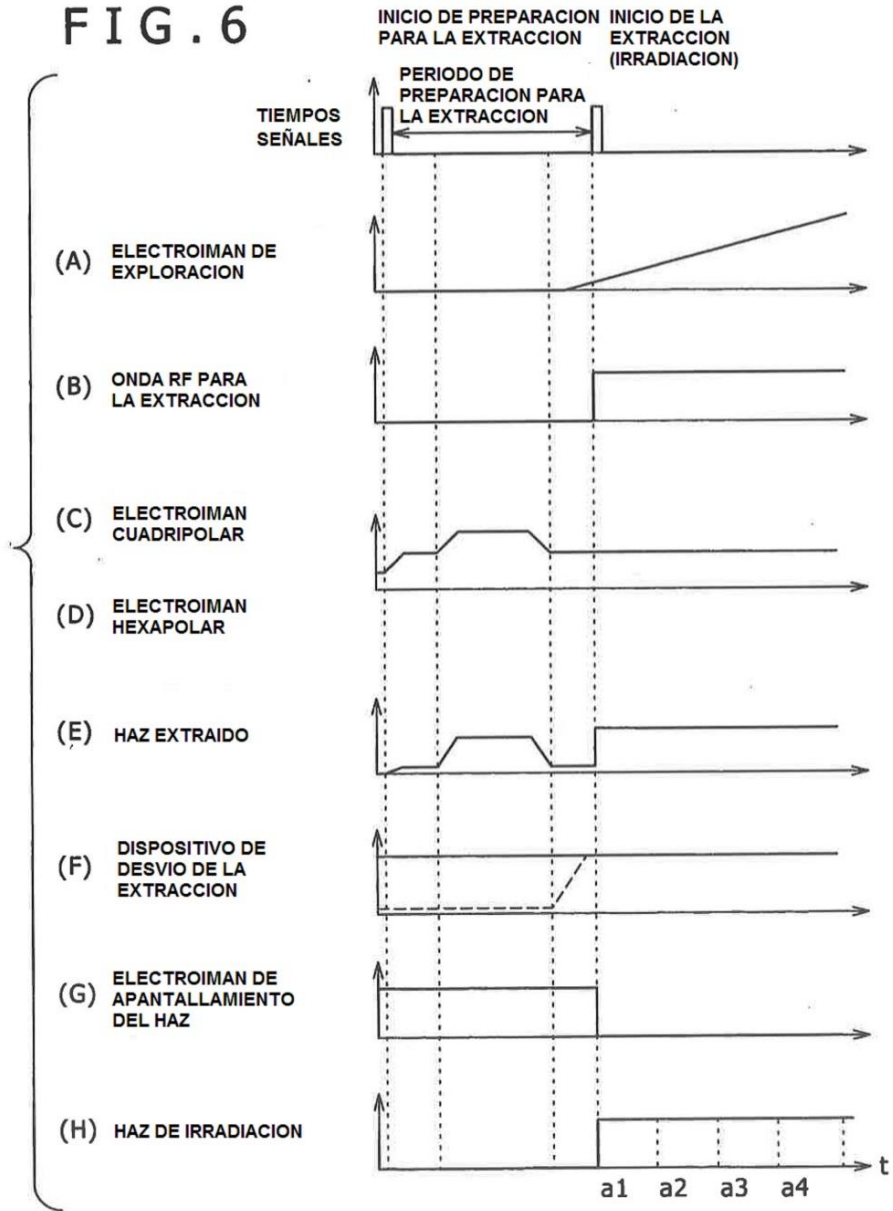
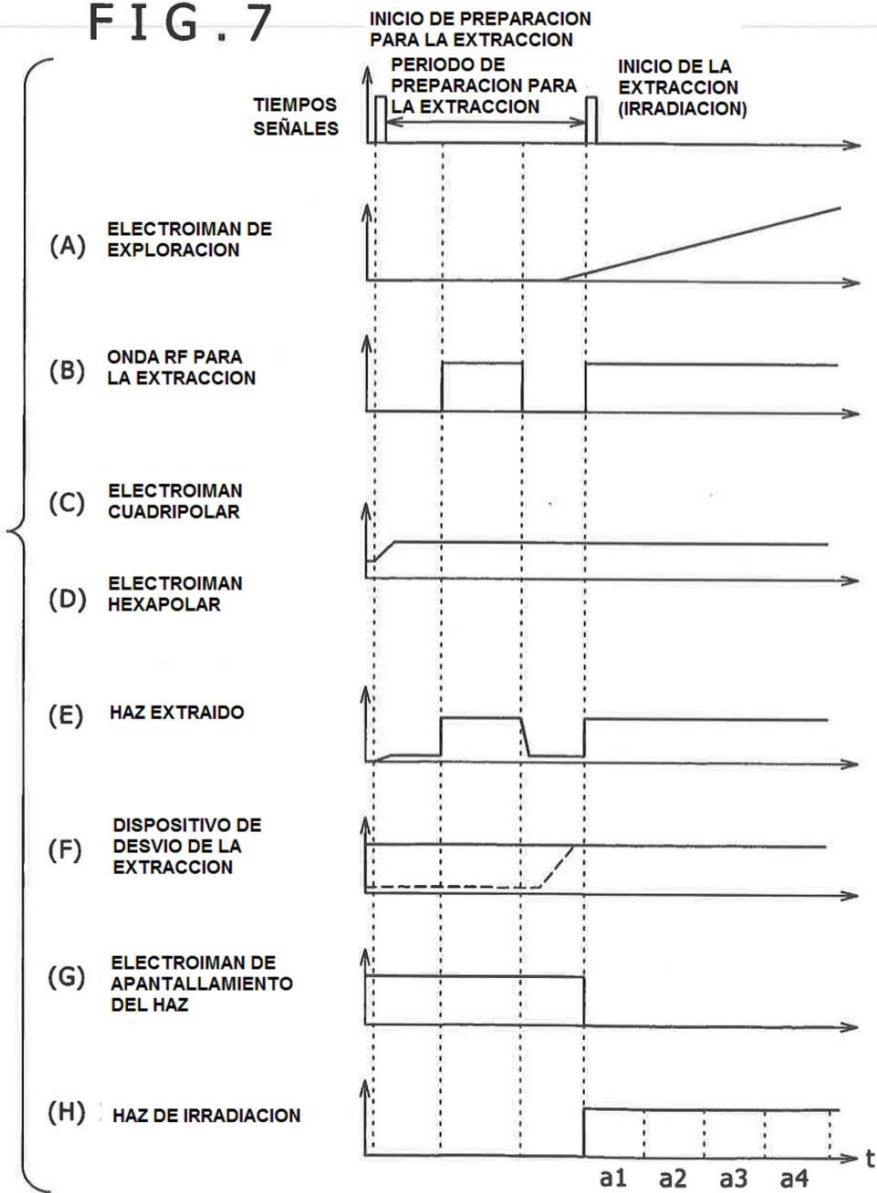




FIG. 7



**FIG. 8**

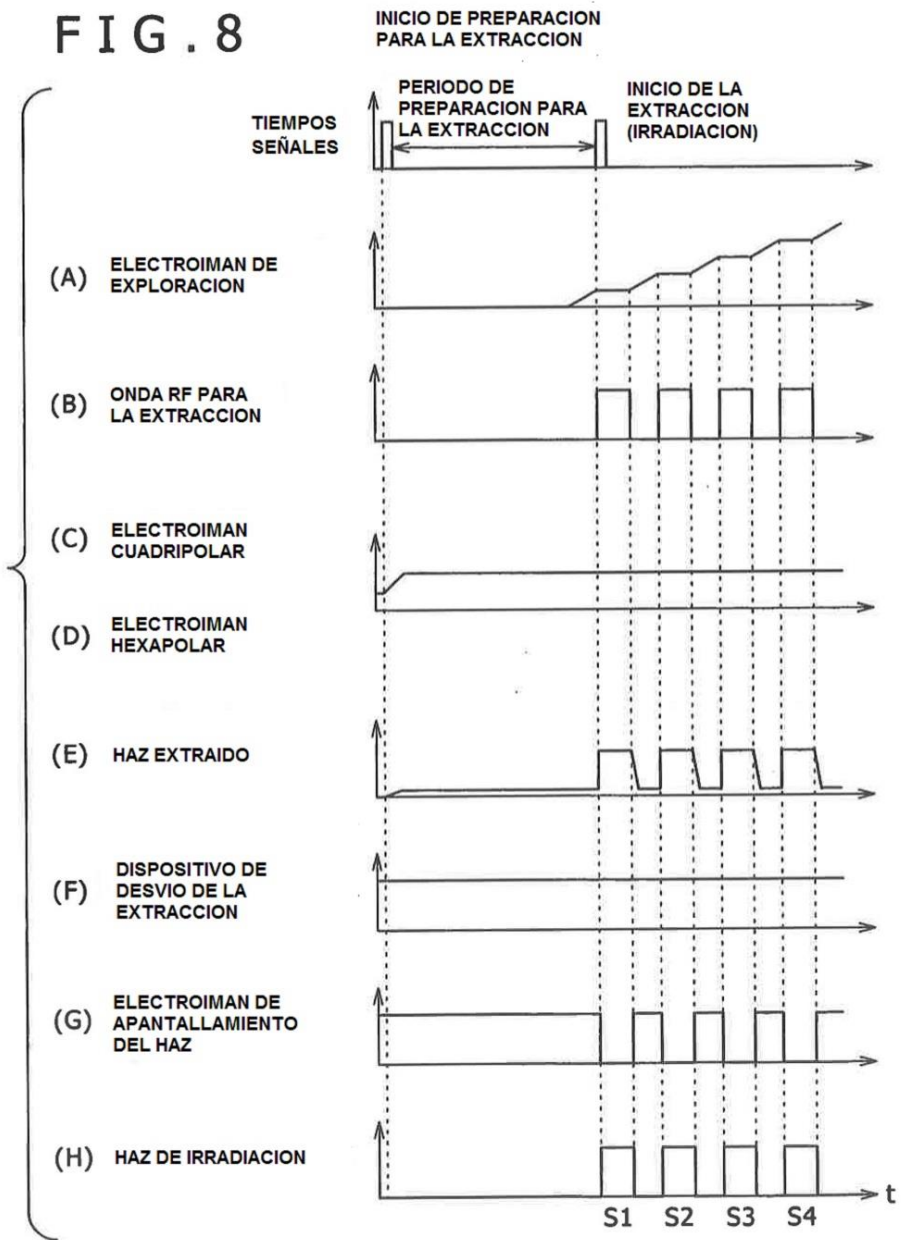


FIG. 9

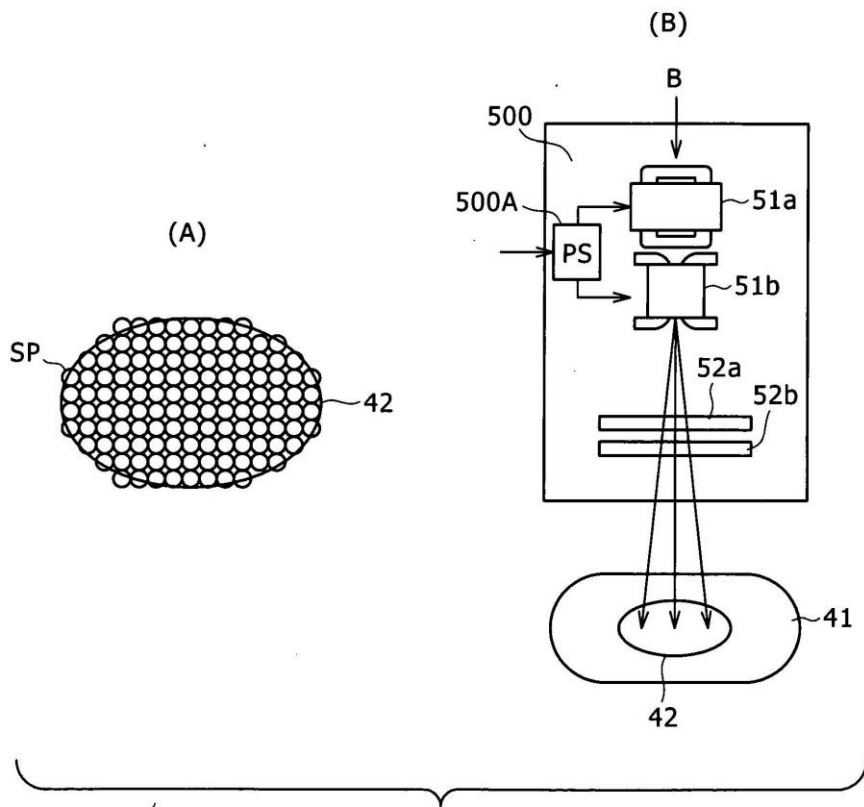


FIG. 10

