

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 779 056**

51 Int. Cl.:

G21K 1/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.07.2013 PCT/US2013/049098**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.01.2014 WO14008275**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.07.2013 E 13812826 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.01.2020 EP 2870608**

54 Título: **Colimador de ángulo variable**

30 Prioridad:
05.07.2012 US 201261668268 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
13.08.2020

73 Titular/es:
**AMERICAN SCIENCE & ENGINEERING, INC.
(100.0%)
829 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821, US**

72 Inventor/es:
ROMMEL, MARTIN

74 Agente/Representante:
ARIAS SANZ, Juan

ES 2 779 056 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

Colimador de ángulo variable

Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

5 Esta solicitud de patente reivindica la prioridad de la solicitud de patente estadounidense provisional n.º 61/668.268, presentada el 5 de julio de 2012, titulada "Variable Angle Collimator" (Colimador de ángulo variable), y que designa a Martin Rommel como inventor.

Campo técnico

La presente invención se refiere a fuentes de rayos X, y más particularmente a colimadores.

Antecedentes de la técnica

10 La obtención de imágenes de retrodispersión de rayos X se basan en la exploración de un objeto con un haz bien colimado, a menudo denominado "haz concentrado". En el pasado, estos haces también se habían usado ampliamente para la obtención de imágenes de transmisión de rayos X, pero hoy en día los haces cónicos y en abanico junto con detectores pixelados dominan la obtención de imágenes de transmisión.

15 Hay dos enfoques usados habitualmente para formar el haz de exploración colimado. Ambos se basan en una fuente de rayos X estacionaria y una abertura móvil. En ambos casos, la radiación de una fuente de rayos X estacionaria se colima en primer lugar para dar un haz en abanico mediante un colimador estacionario. Luego, una pieza móvil con una abertura forma el haz de exploración. Esta pieza móvil es o bien un disco rotatorio con rendijas radiales o bien una rueda con aberturas en el perímetro. El disco rotatorio cubre el haz en abanico y el haz de exploración está formado por la radiación emitida a través de las rendijas que atraviesa la longitud de la abertura del haz en abanico. Este enfoque se ilustra, por ejemplo, en la patente estadounidense 3.780.291 de 1973 de Stein and Swift; véase la figura 1A. En el otro enfoque, una rueda con perforaciones radiales que gira alrededor de la fuente de rayos X constituye la pieza móvil. Si la fuente se coloca en el centro de la rueda, el haz de exploración se emite en dirección radial con la velocidad angular de la rueda.

25 Se han propuesto otros enfoques para formar un haz colimado a partir de una fuente de rayos X estacionaria, por ejemplo, basándose en un cilindro rotatorio con una ranura en espiral tal como se describe por Annis en la patente estadounidense 5.493.596 de 1996.

30 Se han desarrollado configuraciones de sistema con fuentes de rayos X móviles. El movimiento de la fuente de rayos X no se forma normalmente al mover el tubo de rayos X sino al mover (exploración) el haz de electrones a lo largo de un ánodo extendido. Esto produce un punto fuente de rayos X en movimiento (punto focal del haz de electrones) cuya ubicación puede controlarse electrónicamente. Un punto fuente de rayos X móvil permite la formación del haz de rayos X de exploración con una simple abertura estacionaria (orificio estenoico) a cierta distancia del punto de la fuente. A medida que el punto de la fuente de rayos X se mueve desde un extremo de la trayectoria de exploración hasta el otro, el haz de rayos X que emerge de la abertura se extiende por un intervalo angular. Una realización de este concepto es, por ejemplo, parte del sistema descrito en la patente estadounidense 4.045.672 de 1977 de Watanabe, véase también la figura 1B.

40 A medida que el haz de rayos X cubre el intervalo angular, el área de la sección transversal del haz varía según el coseno del ángulo entre el haz y la normal del plano de abertura. Si el intervalo angular es pequeño, la variación del haz es limitada y puede despreciarse. Sin embargo, si es necesario un intervalo angular grande, el efecto se vuelve significativo. Por ejemplo, para un intervalo angular de 120°, un ángulo fuera de la normal de 60° en los extremos conduce a una reducción de al menos el 50% del tamaño del haz y el flujo suministrado, ya que el coseno de 60° es un medio (1/2).

45 En realidad, la variación del haz es aún mayor, ya que el material con el orificio estenoico tiene un grosor finito que conduce a una reducción adicional del área de la sección transversal del haz con un ángulo creciente. Este problema se vuelve más grave para los rayos X de mayor energía que requieren un material de blindaje más grueso para el material con el orificio estenoico.

50 Para permitir un material de blindaje grueso y evitar la variación angular, se ha sugerido reemplazar el orificio estenoico por un cilindro rotatorio que contiene una perforación perpendicular a través del eje tal como se describe en la patente estadounidense 6.356.620 de 2002 de Rothschild y Grodzins, véase también la figura 1C. Este cilindro tendría que rotar de manera síncrona con el haz de electrones de exploración para que el punto fuente de rayos X móvil esté alineado con la perforación en cualquier momento. Este enfoque resuelve ambos problemas con el diseño simple de orificio estenoico: forma un haz de tamaño constante independientemente del ángulo del haz y no limita el grosor del material que forma la abertura. Sin embargo, esta solución activa introduce un coste y una complejidad significativos en comparación con el orificio estenoico pasivo. También elimina en gran medida la enorme flexibilidad que ofrece el control electrónico del haz de electrones.

El documento US 2003/235271 A1 da a conocer técnica anterior, concretamente, un sistema de aparato de exploración tomográfico computarizado con haz de electrones con componentes helicoidales o inclinados de blanco, colimador y detector para eliminar el error de haz cónico y explorar objetos en movimiento continuo. En ese documento, el punto de haz de electrones se explora alrededor del blanco helicoidal a una velocidad angular constante para producir un abanico de rayos cuya posición axial se mueve a una velocidad constante a lo largo del eje del aparato de exploración.

El documento US 4 433 427 A da a conocer técnica anterior.

El documento GB 2 295 266 A da a conocer técnica anterior.

El documento US 2003/161434 A1 da a conocer técnica anterior.

10 Sumario de las realizaciones

Un colimador de ángulo variable produce de manera controlable un haz de radiación colimado sin manipular físicamente ningún elemento del colimador. El ángulo del haz colimado puede controlarse de manera completamente electrónica mediante el control de un haz de electrones que incide sobre un ánodo.

Según la invención, se proporciona un sistema para producir un haz de radiación concentrado orientable tal como se expone en la reivindicación 1. El sistema incluye una fuente de radiación configurada para producir radiación de rayos X en un ángulo, con relación a un colimador, en el que el ángulo puede controlarse electrónicamente; un colimador que comprende material opaco a la radiación de rayos X producida por la fuente de radiación, comprendiendo el colimador una abertura configurada para recibir radiación de rayos X desde la fuente de radiación en una pluralidad de ángulos incidentes, y configurada para hacer pasar una parte de la radiación de rayos X a través del colimador en cada uno de la pluralidad de ángulos incidentes, para formar un haz de radiación de rayos X concentrado colimado que tiene una sección transversal de haz, en el que el colimador es un cilindro cortado helicoidalmente; y en el que el colimador y la fuente de radiación están configurados para permanecer estacionarios entre sí cuando se produce un haz de radiación de rayos X concentrado orientable.

La fuente de radiación puede incluir una fuente de electrones y un ánodo, configurados de tal manera que la fuente de electrones ilumina el ánodo con un haz de electrones orientable electrónicamente, para producir una fuente de radiación de punto móvil.

La abertura y, por tanto, una sección transversal del haz de radiación resultante, puede tener cualquiera de una variedad de formas, tales como forma romboidal, cuadrada y rectangular. En algunas realizaciones, la forma de la abertura (y, por tanto, la sección transversal del haz resultante) es variable en función del ángulo de la radiación incidente con respecto a la abertura.

Una realización de un colimador incluye un primer elemento que tiene una primera superficie, siendo la primera superficie una de una superficie paraboloides hiperbólica o una superficie paraboloides hiperbólica modificada; y un segundo elemento que tiene una segunda superficie, siendo la segunda superficie una de una superficie paraboloides hiperbólica o una superficie paraboloides hiperbólica modificada; estando dispuesto el primer elemento con relación al segundo elemento de tal manera que la primera superficie esté enfrentada a la segunda superficie, estando separadas la primera superficie y la segunda superficie por un espacio para definir una abertura a través del colimador.

Según la invención, también se proporciona un método para irradiar un blanco con un haz de radiación concentrado colimado orientable tal como se expone en la reivindicación 6. El método incluye proporcionar una fuente de radiación orientable configurada para iluminar un colimador; proporcionar un colimador que comprende una abertura que tiene una entrada y una salida, en el que el colimador es un cilindro cortado helicoidalmente, estando dispuesto el colimador en una ubicación fija con respecto a la fuente de radiación orientable; producir un haz de radiación concentrado colimado orientable en una pluralidad de ángulos de salida: iluminando la entrada de la abertura con radiación de rayos X de iluminación desde un primer ángulo de iluminación, de tal manera que una parte de la radiación de rayos X de iluminación pasa a través del colimador y sale del colimador en un primer ángulo de salida; e iluminando la entrada de la abertura con radiación de rayos X de iluminación desde un segundo ángulo de iluminación, siendo el segundo ángulo de iluminación diferente del primer ángulo de iluminación, de tal manera que una parte de la radiación de rayos X de iluminación pasa a través del colimador y sale del colimador en un segundo ángulo de salida, siendo el segundo ángulo de salida diferente del primer ángulo de salida, de tal manera que la radiación que sale del colimador en el primer ángulo de salida y en el segundo ángulo de salida irradian el blanco.

En una realización, la etapa de proporcionar un colimador puede incluir proporcionar un colimador que tiene: un primer elemento que comprende una primera superficie, siendo la primera superficie una de una superficie paraboloides hiperbólica o una superficie paraboloides hiperbólica modificada; y un segundo elemento que comprende una segunda superficie, siendo la segunda superficie una de una superficie paraboloides hiperbólica o una superficie paraboloides hiperbólica modificada; estando dispuesto el primer elemento con relación al segundo elemento de tal manera que la primera superficie esté enfrentada a la segunda superficie, estando separadas la primera superficie y la segunda superficie por un espacio para definir una abertura paraboloides hiperbólica a través del colimador.

En algunas realizaciones, producir un haz colimado en el primer ángulo incluye producir un haz colimado que tiene una primera forma en sección transversal, producir un haz colimado en el segundo ángulo incluye producir un haz colimado que tiene una segunda forma en sección transversal, en el que la segunda forma es diferente de la primera forma.

- 5 Además, en general, se da a conocer un sistema para producir un haz de radiación orientable que incluye medios de fuente de radiación para producir una fuente de radiación de iluminación de punto orientable electrónicamente; y medios de colimación que tienen una abertura configurada para hacer pasar una parte de radiación de iluminación incidente sobre dichos medios de colimación; estando dispuestos los medios de fuente de radiación, con relación a los medios de colimación, para permanecer estacionarios con respecto a los medios de colimación, y para iluminar la abertura con radiación incidente desde la fuente de radiación de punto orientable, de tal manera que la abertura produzca un haz de radiación orientable.

10 Los medios de colimación pueden incluir un primer elemento que comprende una primera superficie paraboloides hiperbólica; y un segundo elemento que comprende una segunda superficie paraboloides hiperbólica; en los que el primer elemento está dispuesto, con relación al segundo elemento, de tal manera que la primera superficie paraboloides hiperbólica está dispuesta opuesta a la segunda superficie paraboloides hiperbólica de tal manera que la primera superficie paraboloides hiperbólica está separada de la segunda superficie paraboloides hiperbólica por un espacio de abertura, de tal manera que el primer elemento y el segundo elemento forman la abertura a través del espacio de abertura.

15 Alternativamente, los medios de colimación pueden incluir un primer elemento que comprende una primera superficie paraboloides hiperbólica modificada; y un segundo elemento que comprende una segunda superficie paraboloides hiperbólica modificada; en los que el primer elemento está dispuesto, con relación al segundo elemento, de tal manera que la primera superficie paraboloides hiperbólica modificada está dispuesta opuesta a la segunda superficie paraboloides hiperbólica modificada de tal manera que la primera superficie paraboloides hiperbólica modificada está separada de la segunda superficie paraboloides hiperbólica modificada por un espacio de abertura, en el que el espacio de abertura no es constante, de tal manera que el primer elemento y el segundo elemento forman la abertura a través del espacio de abertura.

Breve descripción de los dibujos

Las características anteriores de las realizaciones se entenderán más fácilmente con referencia a la siguiente descripción detallada, tomada con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- 30 las figuras 1A-1C ilustran esquemáticamente un colimador de la técnica anterior;
- las figuras 2A-2I ilustran esquemáticamente un ejemplo de un colimador;
- las figuras 2J-2K ilustran esquemáticamente un ejemplo de un colimador;
- La figura 2L ilustra esquemáticamente una sección transversal de un haz colimado que tiene forma de cometa;
- las figuras 3A-C ilustran esquemáticamente una superficie paraboloides hiperbólica virtual;
- 35 las figuras 4A-C ilustran esquemáticamente un ejemplo de un colimador;
- las figuras 5A-5E ilustran esquemáticamente un colimador de cilindro cortado helicoidalmente de un sistema según la presente invención;
- las figuras 6A-C ilustran esquemáticamente un ejemplo de un colimador;
- 40 la figura 7 ilustra esquemáticamente un ejemplo de un bloque de colimador con una superficie paraboloides hiperbólica modificada y una placa secundaria.

Descripción detallada de realizaciones específicas

Diversas realizaciones proporcionan un colimador de rayos X que permite formar un haz de rayos X de exploración del tamaño y flujo deseados independientemente del grosor del material de abertura sin requerir el movimiento de la abertura o los componentes físicos que crean la abertura. Algunas realizaciones proporcionan un colimador de rayos X que permite formar un haz de rayos X de exploración del tamaño y flujo deseados independientemente del ángulo del haz.

50 En diversas realizaciones, un colimador de piezas no móviles crea un haz concentrado a partir de una fuente de radiación similar a un punto de manera que el área de la sección transversal del haz concentrado varía con el ángulo incidente de manera deliberada. En particular, algunas realizaciones permiten la creación de haces concentrado con un área de sección transversal que es independiente del ángulo incidente. En algunas realizaciones, un colimador de ángulo variable incluye materiales de atenuación dispuestos de manera rígida de tal manera que la radiación procedente de una fuente similar a un punto se colima efectivamente para dar un haz concentrado para un intervalo

de ángulos incidentes y de tal manera que la sección transversal del haz es función del ángulo incidente.

Por ejemplo, el ángulo del haz puede determinarse controlando el punto focal de un haz de electrones fuente que incide sobre un ánodo. Tal haz de electrones puede describirse como "orientable". Una fuente de un haz de electrones, junto con un ánodo, puede describirse como una fuente de radiación configurada para producir radiación en un ángulo, con relación a un colimador, en el que el ángulo puede controlarse electrónicamente.

El punto focal se convierte en una fuente de rayos X. Como tal, el movimiento controlable del haz de electrones proporciona el control del punto focal y proporciona de ese modo el control de la ubicación de la fuente de rayos X. El control de la ubicación de la fuente de rayos X proporciona, a su vez, el control del ángulo en el que los rayos X inciden en el colimador y proporciona de ese modo el control de la dirección del haz de rayos X desde el colimador. Estas características proporcionan la capacidad de explorar con el haz de rayos X producido de forma escalonada y/o variar la velocidad de exploración y/o variar el intervalo del ángulo de exploración, por ejemplo. Tal fuente de rayos X puede describirse como "controlable" u "orientable" en el sentido de que su ubicación (por ejemplo, en un ánodo; y/o con relación a una abertura en un colimador) puede controlarse electrónicamente.

Las figuras 2A-2H ilustran esquemáticamente un primer ejemplo de un colimador 200 útil para entender la invención, e incluye una primera placa 210 y una segunda placa 220. La primera placa 210 tiene una primera cara 210A y una segunda cara 210B, y es opaca al tipo de radiación para el que está destinado el colimador 200. Por ejemplo, si el colimador 200 está destinado para colimar rayos X, entonces la primera placa 210 es opaca a los rayos X.

La primera placa 210 incluye una abertura alargada 211 que se extiende completamente entre la primera cara 210A y la segunda cara 210B con el fin de hacer pasar radiación a la que la primera placa 210 es opaca por lo demás. En este ejemplo, la abertura alargada 211 tiene una forma rectangular, pero pueden usarse otras formas en diversos ejemplos.

El colimador 200 también incluye una segunda placa, 220, que tiene una primera cara 220C y una segunda cara 220D, y también tiene una abertura alargada 221 que se extiende completamente entre la primera cara 220C y la segunda cara 220D con el fin de hacer pasar radiación a la que la segunda placa 220 es opaca por lo demás. En este ejemplo, la abertura alargada 221 tiene una forma rectangular, pero pueden usarse otras formas en diversos ejemplos. Cuando se observa como en las figuras 2A y 2B, las aberturas 211 y 221 están en ángulos diferentes.

En el colimador 200, la primera placa 210 y la segunda placa 220 están dispuestas paralelas entre sí, y separadas por un espacio "d" 240, tal como se ilustra esquemáticamente en la figura 2C. Las placas 210, 220 están dispuestas de tal manera que las aberturas alargadas estén dispuestas en un ángulo relativo entre sí, por ejemplo, de tal manera que una proyección de la abertura alargada 211 sobre la abertura alargada 221 forme una forma de "X". En algunos ejemplos, la abertura alargada 211 está dispuesta de modo que su proyección sobre la abertura alargada 221 se encuentre con la abertura 221 en ángulo recto (por ejemplo, "+")

En tales configuraciones, la primera placa 210 y la segunda placa 220 bloquean toda la radiación (254) procedente del ánodo 250, excepto en que la primera abertura 211 y la segunda abertura 221 actúan conjuntamente para formar una abertura de forma romboidal a través de la que puede pasar parte de la radiación sin entrar en contacto con la primera placa 210 (que puede conocerse como placa de entrada) y sin entrar en contacto con la segunda placa 220 (que puede conocerse como placa de salida). Más particularmente, una proyección de la primera abertura alargada 211 se corta con la segunda abertura alargada 221 en un ángulo distinto de cero y de tal manera que la intersección de la proyección de la primera abertura alargada 211 y la segunda abertura alargada 221 forma una abertura de forma romboidal a través de la que puede pasar radiación sin entrar en contacto con la placa de entrada 210 y sin entrar en contacto con la placa de salida 220. De esta manera, se bloquea toda la radiación que incide en la placa de entrada 210, excepto la parte de radiación incidente que pasa a través de la primera abertura alargada 211. Toda esa radiación se bloquea, a su vez, por la segunda placa 220, excepto la parte de la radiación que pasa a través de la segunda abertura alargada 221. Dicho de otro modo, toda la radiación incidente la bloquea el colimador 200, excepto la radiación que va a aproximarse al colimador 200 en un ángulo que se alinea tanto con la primera abertura alargada 211 como con la segunda abertura alargada 221. Como tal, la primera abertura alargada 211 y la segunda abertura alargada 221 pueden describirse como que forman una abertura compuesta 270.

El inventor ha descubierto que el colimador 200 proporciona una característica útil, porque la abertura compuesta 270 formada por la actuación conjunta de la primera abertura 211 y la segunda abertura 221 existe en una variedad de ángulos con respecto a la radiación incidente. Dicho de otro modo, el colimador 200 presentará una abertura compuesta (es decir, a través del colimador 200) a la radiación que se aproxima al colimador 200 desde una variedad de direcciones, todo sin tener que mover o manipular la primera placa 210 y/o la segunda placa 220. Por consiguiente, un haz de radiación colimado 260 sale del colimador 200, y la dirección de ese haz colimado varía en función de la ubicación de la fuente de la radiación.

Más específicamente, una fuente (que puede denominarse "fuente puntual") de radiación 251 ilumina el colimador 200 desde cualquiera de varias posiciones. Por ejemplo, en las figuras 2C, la fuente de radiación 250 es el punto focal de un haz de electrones en el ánodo 250. La radiación 254 se aleja de ese punto 251 en una variedad de ángulos, pero sólo parte de esa radiación, en este ejemplo radiación a lo largo del vector 255A, se aproxima al

colimador 200 en una dirección que permitirá que la radiación pase a través tanto de la primera abertura 211 como de la segunda abertura 221, para producir el haz 260A de radiación colimado.

En las figuras 2D-2H, se ilustran esquemáticamente ejemplos ilustrativos de la abertura compuesta 270 formada por la actuación conjunta de las aberturas 211 y 221. En cada figura, se forma un haz de rayos X colimado a partir de la radiación incidente por la intersección proyectada, de forma romboidal de las dos aberturas 211; 221 (que también pueden conocerse como ranuras) tal como se ve desde el punto fuente (251) de la radiación. En la figura 2F, el ángulo del haz es normal a las placas de colimador 210, 220 (es decir, el ángulo, α , entre el vector de la radiación incidente (por ejemplo, 255B) y un vector normal a la superficie 210A de la placa 210, es cero) y la abertura compuesta 270 (y, por consiguiente, el haz, por ejemplo, 260B) tiene forma cuadrada. Como referencia, en la figura 2C se ilustra esquemáticamente un ángulo de haz distinto de cero, α , entre un vector 259 normal a la superficie 210A de la placa 210 y el vector de haz 255A.

A medida que el punto fuente de rayos X 251 se mueve hacia arriba o hacia abajo, el ángulo del haz α cambia y la altura j (271; véase, por ejemplo, la figura 2I) del rombo de abertura 270 se reduce como $\cos(\alpha)$. Al mismo tiempo, la abertura se desplaza lateralmente en $0,5 d \tan(\alpha)$ donde d (240) es la distancia entre las placas de colimador.

Por ejemplo, tal como se comentó anteriormente, cuando la radiación incidente es normal a la superficie 210A del colimador 200, la abertura 270 aparece (desde el punto de la fuente de radiación) cerca del centro del colimador 200. Alternativamente, cuando la radiación incidente se aproxima a la superficie 210A del colimador 200 desde otro ángulo, la abertura aparece (desde el punto de la fuente de radiación) en una ubicación diferente (por ejemplo, descentrada), como en las figuras 2D, 2E, 2G y 2H, por ejemplo. En este ejemplo 200, si el ángulo del haz varía entre $+45^\circ$ y -45° , el intervalo lateral para el desplazamiento de abertura sería igual a la distancia entre las placas d . En algunos ejemplos, la trayectoria del punto fuente de rayos X puede ajustarse para compensar el desplazamiento lateral de la abertura, con el fin de mantener una línea de exploración recta.

Por tanto, para controlar el haz de radiación colimado, la dirección del haz de electrones puede cambiarse o manipularse, mediante modos conocidos en la técnica, de tal manera que el punto focal 251 del haz de electrones pueda moverse a una ubicación diferente en el ánodo 250. Debido a que el punto focal 251 es la fuente de la radiación que ilumina el colimador 200, la fuente de radiación se manipula efectivamente de esta manera, y la radiación se aproxima al colimador 200 desde un ángulo diferente. Por ejemplo, el punto focal 251 de radiación puede moverse para producir radiación de iluminación a lo largo del vector 255B o 255C. De hecho, la ubicación del punto focal puede moverse de manera escalonada, o continuamente, para producir radiación desde una variedad de direcciones. Por tanto, cada ubicación del punto focal 241 produce un haz colimado que sale del colimador 200 en un ángulo que varía en función de la ubicación del punto focal 251. Por ejemplo, la radiación a lo largo del vector 255A produce el haz colimado 260A; la radiación a lo largo del vector 255B produce el haz colimado 260B; y la radiación a lo largo del vector 255C produce un haz colimado 260C. Como tal, la dirección de un haz de radiación colimado puede controlarse electrónicamente, sin mover ni manipular físicamente un elemento estructural del colimador, y sin mover ni manipular físicamente un elemento estructural de la fuente de radiación.

Una superficie virtual entre las dos placas de colimador ranuradas 210, 220 a las que está confinado el haz de rayos X, tiene la forma de un paraboloide hiperbólico, tal como se define mediante la función $z(x, y) = xy$. Tal superficie virtual 300 se ilustra esquemáticamente en las figuras 3A-3C, en las que las líneas oscuras 301 representan las posibles posiciones del haz.

En las figuras 2J y 2K, se ilustra esquemáticamente un ejemplo alternativo 280 útil para entender la invención, e incluye una tercera placa, o placa intermedia, 230. La placa 230 tiene una primera cara 230E y una segunda cara 230F, y es opaca al tipo de radiación para el que está destinado el colimador 280. La placa intermedia 230 también tiene una abertura 231, y está dispuesta entre las placas 210 y 220 de tal manera que la superficie paraboloide hiperbólica virtual 300 pasa a través de la abertura 231 y forma de ese modo parte de la abertura compuesta 270 y permite de ese modo que pase parte de la radiación a través del colimador 280. Tal ejemplo puede mejorar el grado en que el colimador es opaco (es decir, la opacidad del colimador), y puede refinar adicionalmente el haz colimado. En algunos ejemplos, por ejemplo en un diseño simétrico para el que los ángulos de ranura para la entrada y salida del haz son iguales, una placa 230 en el centro tendría una ranura horizontal 231.

En otro ejemplo, un colimador 400 útil para entender la invención está formado no por múltiples placas sino por dos bloques enfrentados 401, 402, cada uno con una superficie paraboloide hiperbólica tal como se ilustra esquemáticamente en las figuras 4A-4C. Dicho de otro modo, tal ejemplo incluye dos superficies reales, en lugar de virtuales, entre las aberturas de entrada y salida.

Uno de tales bloques 401 se ilustra esquemáticamente en la figura 4A, y muestra la superficie paraboloide hiperbólica 401A. Los bloques 401, 402 actúan conjuntamente para formar una abertura de salida 470, similar a la abertura compuesta 270 formada por las placas 210 y 220 comentadas anteriormente. En resumen, la abertura 470 hace pasar selectivamente la radiación procedente de una fuente, dependiendo del ángulo en el que la radiación incide en el colimador 400, de tal manera que puede controlarse el haz colimado resultante controlando la ubicación de la fuente de radiación. El movimiento aparente de tal abertura 470 se ilustra esquemáticamente por las diferentes ubicaciones de la abertura 470 en las figuras 4B y 4C.

Las figuras 5A-5E ilustran esquemáticamente una realización de un colimador de cilindro cortado helicoidalmente 500 de un sistema según la presente invención. En general, esta realización 500 es un colimador de ángulo variable que consiste en un cilindro circular recto 501 con un eje de cilindro 503 y una rendija 502. La rendija 502 pasa completamente a través del cilindro 501 y se somete a torsión a lo largo del eje 503.

5 En la figura 5B, se ilustra esquemáticamente una vista en corte transversal que deja ver el interior de una realización del colimador 500, y muestra la superficie límite 501B. La superficie límite 501B y la superficie de cilindro 501C definen los bordes de rendija 501D. Cada uno de los bordes de rendija 501D define una hélice alrededor del eje de cilindro 503. Como tal, la superficie límite 501B, que es la superficie entre los bordes helicoidales 501D, puede describirse como una "superficie helicoidal". La superficie 501A también es una superficie helicoidal, y como tal, la rendija 502 puede describirse como una "rendija helicoidal". Expuesto de manera alternativa, la rendija 502 tiene una forma helicoidal, de modo que las superficies límite 501A, 501B de la rendija 502 forman (o están abarcadas por) una doble hélice, tal como se ilustra esquemáticamente en la figura 5A.

10 En una realización, la rendija 502 en el radio 504 del cilindro 501 (es decir, en la superficie 501C del cilindro 501) forma un ángulo 520 de 45° con la dirección del eje 503 del cilindro 501, dando como resultado una abertura de forma cuadrada 510. Véase, por ejemplo, la rendija 502 en la figura 5D.

En algunas realizaciones, la rendija 502 tiene una anchura constante 502A, que produce una sección transversal del haz independiente del ángulo. Por ejemplo, la abertura 510 conserva una forma cuadrada desde una variedad de ángulos, tal como se ilustra esquemáticamente en las figuras 5C-5E.

20 En otro ejemplo 600, útil para entender la invención, e ilustrado esquemáticamente en las figuras 6A-6C, la altura h 605 del espacio 604 entre las dos superficies 601A, 602A de dos bloques enfrentados 601, 602 que forman la rendija de colimador de torsión 603 no es constante, tal como en el ejemplo 400 en las figuras 4A-4C por ejemplo. Más bien, la altura h 605 del espacio 604 aumenta a medida que la secante del ángulo del haz α :

$$h \propto \sec(\alpha) = 1/\cos(\alpha)$$

25 De esta manera, un haz de rayos X con un área de sección transversal constante independiente del ángulo del haz se mantiene la superficie paraboloides hiperbólica, porque se mantiene la sección transversal cuadrada o casi cuadrada del haz.

Basándose sólo en la altura dependiente del ángulo para modificar la rendija de colimador de torsión 603 conduce a superficies definidas por:

$$z(x, y) = x \cdot y \pm \frac{h}{2} \sqrt{1 + y^2}.$$

30 Estas superficies mantienen una altura constante h de la sección transversal del haz; sin embargo, la forma cuadrada obtenida en $\alpha = 0$ (donde $\alpha = 0$ es un ángulo que es normal a la superficie del colimador) se pierde con un ángulo α creciente. Para mantener una sección transversal cuadrada o casi cuadrada del haz, la pendiente de las ranuras en las superficies de entrada y salida del colimador tendrá que aumentar a medida que aumenta el ángulo del haz. Entonces la superficie central de la ranura ya no vendrá dada por $z(x, y) = x \cdot y$, sino por:

35
$$z(x,y) = x \cdot \sinh(y)$$

o una aproximación de la misma. Con la altura dada por $h\sqrt{1 + y^2}$, la abertura mantendrá una forma cuadrada pero se reducirá de tamaño con un ángulo creciente. Una altura dada por $\cosh(y)$ mantiene un área de sección transversal constante.

40 La superficie central (h=0) permanecerá lineal en x ya que esta es la dirección del haz recto. En las figuras 6A-6C, se muestra un ejemplo de la superficie paraboloides hiperbólica modificada. Las figuras 6B y 6C ilustran esquemáticamente un colimador 600 formado por dos bloques enfrentados 601, 602, que forman la abertura de salida 670.

45 La modificación de las superficies paraboloides hiperbólicas del colimador útil para entender la invención no sólo permite lograr un área de sección transversal del haz independiente del ángulo del haz, sino que también permite la variación deliberada del área de la sección transversal en función del ángulo del haz. Mantener constante el área de la sección transversal del haz es sólo un caso especial de control del área. El control del área de la sección transversal del haz en función del ángulo del haz permite diseños con formas de haz y tasa de dosis (flujo) moduladas suministradas por el haz colimado. En diversas realizaciones y ejemplos, los contornos de una abertura en un colimador pueden configurarse para producir una sección transversal del haz de cualquiera de una variedad de formas, tales como forma romboidal (por ejemplo, abertura romboidal 270 de la figura 2I), rectangular o de forma cuadrada (por ejemplo, abertura cuadrada 10 de la figura 5C), o incluso en forma de cometa (p. ej., abertura 299 de la figura 2L), por nombrar sólo algunos ejemplos. En general, la abertura de un colimador puede configurarse para

producir un haz con un tamaño y una forma (sección transversal) de una manera considerada, por un diseñador del sistema, que es beneficiosa para la aplicación para la que está diseñado el sistema.

5 En comparación con un colimador de orificio estenopeico, diversas realizaciones y ejemplos pueden producir una dispersión aumentada que puede reducirse aumentando el grosor del colimador (por ejemplo, el colimador 400) o, más efectivamente, agregando una o más placas secundarias adicionales en el lado de salida del colimador. Tal ejemplo 700 se ilustra esquemáticamente en la figura 7 e incluye una placa 701 adyacente al colimador 702. El colimador 702 puede ser cualquiera de los colimadores descritos anteriormente con relación a las figuras 2A-6C, por ejemplo. La ranura en la placa 701 incluye una abertura 703 dispuesta para despejar la trayectoria del haz primario 710 que sale de un colimador 702.

10 Un sistema útil para entender la invención para producir un haz de radiación colimado puede describirse como que tiene una fuente de radiación, y un colimador según una de las realizaciones descritas anteriormente, y circuitos para controlar la fuente de radiación para controlar el ángulo al que la radiación procedente de la fuente incide en el colimador. Un método para producir un haz de radiación colimado controlable útil para entender la invención puede incluir proporcionar un colimador según una de las realizaciones descritas anteriormente, y luego iluminar el
15 colimador con radiación procedente de la fuente de radiación desde una variedad de ángulos, con el fin de controlar el ángulo del haz colimado que sale del colimador.

Algunos ejemplos útiles para entender la invención proporcionan un colimador de ángulo variable que incluye una placa de entrada que tiene una primera cara y una segunda cara, y una primera abertura alargada completamente a través de la placa de entrada entre la primera cara y la segunda cara; una placa de salida que tiene una tercera cara y una cuarta cara, y una segunda abertura alargada completamente a través de la placa de salida entre la tercera cara y la cuarta cara, siendo la primera cara paralela a la cuarta cara, y estando separada de la cuarta cara por una distancia predeterminada, de tal manera que una proyección de la primera abertura alargada se corta con la segunda abertura alargada en un ángulo distinto de cero y de tal manera que la intersección de la proyección de la primera abertura alargada y la segunda abertura alargada forma una abertura de forma romboidal a través de la que
20 puede pasar radiación sin entrar en contacto con la placa de entrada y sin entrar en contacto con la placa de salida.

En algunos ejemplos útiles para entender la invención, el ángulo distinto de cero es un ángulo recto.

Algunos ejemplos útiles para entender la invención también incluyen una placa intermedia que tiene una tercera abertura completamente a través de la placa intermedia. La placa intermedia se dispone entre la placa de entrada y la placa de salida de tal manera que la tercera abertura se alinea con la primera abertura alargada y la segunda
30 abertura alargada en una pluralidad de ángulos, de modo que la primera abertura alargada, la segunda abertura alargada y la tercera abertura forman una abertura de forma romboidal (o una abertura de otra forma poligonal) a través de la que puede pasar radiación sin entrar en contacto con ninguna de la placa de entrada, la placa de salida y la placa intermedia. En algunos ejemplos útiles para entender la invención, la tercera abertura es una abertura alargada, y en algunos ejemplos, la tercera abertura es una abertura rectangular.

35 Otro ejemplo de un colimador de ángulo variable útil para entender la invención incluye un primer elemento que tiene una primera superficie, siendo la primera superficie una de una superficie paraboloide hiperbólica o una superficie paraboloide hiperbólica modificada, y un segundo elemento que también tiene una primera superficie, siendo la primera superficie una de una superficie paraboloide hiperbólica o una superficie paraboloide hiperbólica modificada. El primer elemento está dispuesto con relación al segundo elemento de tal manera que la primera superficie esté
40 enfrentada a la segunda superficie, y está separada de la segunda superficie separada por un espacio, para definir una abertura paraboloide hiperbólica a través del colimador.

En algunos ejemplos útiles para entender la invención, la primera superficie es una superficie paraboloide hiperbólica modificada y la segunda superficie es una superficie paraboloide hiperbólica modificada, de tal manera que el espacio entre la primera superficie y la segunda superficie no es constante.

45 En otro ejemplo útil para entender la invención, un sistema de exploración de radiación incluye una fuente de radiación configurada para proporcionar de manera controlable un haz de radiación en una pluralidad de ángulos, y un colimador que tiene una abertura paraboloide hiperbólica que tiene una entrada y una salida. En algunos ejemplos, el colimador incluye una placa de entrada que tiene una primera cara y una segunda cara, y una primera abertura alargada completamente a través de la placa de entrada entre la primera cara y la segunda cara; una placa
50 de salida que tiene una tercera cara y una cuarta cara, y una segunda abertura alargada completamente a través de la placa de salida entre la tercera cara y la cuarta cara, siendo la primera cara paralela a la cuarta cara, y estando separada de la cuarta cara por una distancia predeterminada, de tal manera que una proyección de la primera abertura alargada se corta con la segunda abertura alargada en un ángulo distinto de cero, de tal manera que la intersección de la proyección de la primera abertura alargada y la segunda abertura alargada forma una abertura de
55 forma romboidal a través de la que puede pasar radiación procedente de la fuente de radiación, en una pluralidad de ángulos, sin entrar en contacto con la placa de entrada y sin entrar en contacto con la placa de salida.

En algunos ejemplos útiles para entender la invención, el colimador incluye un primer elemento que tiene una primera superficie, siendo la primera superficie una de una superficie paraboloide hiperbólica o una superficie

5 paraboloides hiperbólicas modificadas, y un segundo elemento que tiene una segunda superficie, siendo la segunda superficie una de una superficie paraboloides hiperbólicas o una superficie paraboloides hiperbólicas modificadas. El primer elemento está dispuesto con relación al segundo elemento de tal manera que la primera superficie esté enfrentada a la segunda superficie y está separada de la segunda superficie por un espacio para definir una abertura paraboloides hiperbólicas a través del colimador.

10 Un método de irradiación de un blanco con un haz de radiación colimado útil para entender la invención incluye proporcionar un colimador que tiene una abertura paraboloides hiperbólicas que tiene una entrada y una salida; iluminar la entrada de la abertura paraboloides hiperbólicas con radiación de iluminación desde un primer ángulo de iluminación, de tal manera que una parte de la radiación de iluminación pasa a través del colimador y sale del colimador a través de la cuarta superficie en un primer ángulo de salida; iluminar la entrada de la abertura paraboloides hiperbólicas con radiación de iluminación desde un segundo ángulo de iluminación, de tal manera que una parte de la radiación de iluminación pasa a través del colimador y sale del colimador a través de la cuarta superficie en un segundo ángulo de salida, siendo el segundo ángulo de salida diferente del primer ángulo de salida.

15 En algunos de tales ejemplos, proporcionar un colimador incluye proporcionar un colimador que tiene una placa de entrada que tiene una primera cara y una segunda cara, y una primera abertura alargada completamente a través de la placa de entrada entre la primera cara y la segunda cara; una placa de salida que tiene una tercera cara y una cuarta cara, y una segunda abertura alargada completamente a través de la placa de salida entre la tercera cara y la cuarta cara, siendo la primera cara paralela a la cuarta cara, y estando separada de la cuarta cara por una distancia predeterminada, de tal manera que una proyección de la primera abertura alargada se corta con la segunda abertura alargada en un ángulo distinto de cero, y de tal manera que la intersección de la proyección de la primera abertura alargada y la segunda abertura alargada forma una abertura de forma romboidal a través de la que puede pasar radiación sin entrar en contacto con la placa de entrada y sin entrar en contacto con la placa de salida.

20 En algunos ejemplos útiles para entender la invención, proporcionar un colimador incluye proporcionar un colimador que tiene un primer elemento que tiene una primera superficie, siendo la primera superficie una de una superficie paraboloides hiperbólicas o una superficie paraboloides hiperbólicas modificadas; un segundo elemento que tiene una segunda superficie, siendo la segunda superficie una de una superficie paraboloides hiperbólicas o una superficie paraboloides hiperbólicas modificadas; de tal manera que el primer elemento está dispuesto con relación al segundo elemento de manera que la primera superficie esté enfrentada a la segunda superficie, estando separadas la primera superficie y la segunda superficie por un espacio para definir una abertura paraboloides hiperbólicas a través del colimador.

25 En los sistemas según la invención, como colimador, puede proporcionarse un colimador de ángulo variable que tiene una carcasa cilíndrica, teniendo la carcasa una superficie cilíndrica y un eje, y comprendiendo una rendija helicoidal que pasa completamente a través de la carcasa, en los que la rendija helicoidal define una primera superficie límite y una segunda superficie límite, estando separada la primera superficie límite de la segunda superficie límite por un espacio. En algunas realizaciones, el espacio es una distancia constante entre la primera superficie límite y la segunda superficie límite en la superficie cilíndrica.

30 Definiciones. Tal como se usa en esta descripción, los siguientes términos tendrán los significados indicados, a menos que el contexto requiera otra cosa:

35 Una superficie paraboloides hiperbólicas es una superficie definida por la siguiente fórmula, donde z es la altura del espacio entre las superficies opuestas que definen una abertura, y x e y son coordenadas en ejes ortogonales en un plano normal a z:

$$\frac{z}{c} = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}$$

40 En algunos ejemplos, una superficie paraboloides hiperbólicas se define mediante la siguiente forma de la fórmula anterior:

45
$$z(x, y) = x \cdot y$$

Una superficie paraboloides hiperbólicas modificada es una superficie paraboloides hiperbólicas modificada tal como se describe con relación a la figura 7.

Una abertura paraboloides hiperbólicas es un paso a través de un colimador, teniendo el paso al menos un contorno en forma de una superficie paraboloides hiperbólicas o una superficie paraboloides hiperbólicas modificada.

50 Las realizaciones de la invención descritas anteriormente pretenden ser meramente a modo de ejemplo; numerosas variaciones y modificaciones resultarán evidentes para los expertos en la técnica. Se pretende que todas estas variaciones y modificaciones estén dentro del alcance de la presente invención tal como se define en cualquier reivindicación adjunta.

REIVINDICACIONES

1. Sistema para producir un haz de radiación de rayos X concentrado orientable, que comprende:
una fuente de radiación configurada para producir radiación de rayos X en un ángulo, con relación a un colimador, en el que el ángulo puede controlarse electrónicamente; y
5 el colimador (200, 400, 500) comprende material opaco a la radiación de rayos X producida por la fuente de radiación, comprendiendo el colimador una abertura configurada para recibir radiación de rayos X desde la fuente de radiación en una pluralidad de ángulos incidentes, y configurada para que pase una parte de la radiación de rayos X a través del colimador en cada uno de los ángulos incidentes, para formar un haz concentrado colimado orientable de radiación de rayos X que tiene una sección transversal del haz, en el
10 que el colimador es un cilindro cortado helicoidalmente ; y
en el que el colimador (200, 400, 500) y la fuente de radiación están configurados para permanecer estacionarios entre sí cuando se produce el haz de radiación de rayos X concentrado orientable.
2. Sistema según la reivindicación 1, en el que la fuente de radiación comprende una fuente de electrones y un ánodo, estando la fuente de electrones configurada para iluminar el ánodo con un haz orientable de electrones, para producir una fuente puntual móvil de radiación de rayos X.
15
3. Sistema según la reivindicación 1, en el que el haz concentrado colimado que pasa por la abertura tiene forma romboidal o forma cuadrada.
4. Sistema según la reivindicación 1 en el que la forma de la abertura es variable en función del ángulo incidente de la radiación con respecto a la abertura.
- 20 5. Sistema según la reivindicación 1, en el que el colimador comprende:
un primer elemento que comprende una primera superficie (401A, 501A); y
un segundo elemento que comprende una segunda superficie (501B);
estando dispuesto el primer elemento con relación al segundo elemento de tal manera que la primera superficie (401A, 501A) esté enfrentada a la segunda superficie (501B), estando separadas la primera
25 superficie y la segunda superficie por un espacio (502) para definir la abertura (470, 502) a través del colimador.
6. Método de irradiación de un blanco con un haz concentrado colimado orientable de radiación de rayos X, comprendiendo el método:
proporcionar una fuente de radiación orientable configurada para iluminar un colimador;
30 proporcionar un colimador que comprende una abertura (270, 470, 502) que tiene una entrada y una salida, en el que el colimador es un cilindro cortado helicoidalmente, estando dispuesto el colimador en una ubicación fija con respecto a la fuente de radiación orientable;
producir un haz concentrado colimado orientable de radiación de rayos X en una pluralidad de ángulos de salida mediante:
35 iluminar la entrada de la abertura con radiación de rayos X de iluminación desde un primer ángulo de iluminación, de modo que una parte de la radiación de rayos X de iluminación pasa a través del colimador y sale del colimador en un primer ángulo de salida; y
iluminar la entrada de la abertura con radiación de rayos X de iluminación desde un segundo ángulo de iluminación, siendo el segundo ángulo de iluminación diferente del primer ángulo de iluminación, de
40 tal manera que una parte de la radiación de rayos X de iluminación pasa a través del colimador y sale del colimador en un segundo ángulo de salida, siendo el segundo ángulo de salida diferente del primer ángulo de salida,
de tal manera que la radiación que sale del colimador en el primer ángulo de salida y en el segundo ángulo de salida irradie el blanco.
- 45 7. Método de irradiación de un blanco con un haz de radiación de rayos X concentrado colimado según la reivindicación 6, en el que proporcionar un colimador incluye proporcionar un colimador que tiene:
un primer elemento que comprende una primera superficie; y
un segundo elemento que comprende una segunda superficie;

estando dispuesto el primer elemento con relación al segundo elemento de tal manera que la primera superficie esté enfrentada a la segunda superficie, estando separadas la primera superficie y la segunda superficie por un espacio para definir una abertura a través del colimador.

- 5 8. Método de irradiación de un blanco con un haz de radiación de rayos X concentrado colimado según la reivindicación 6, en el que el haz concentrado colimado que sale del colimador en el primer ángulo de salida tiene una primera forma en sección transversal, y el haz concentrado colimado que sale del colimador en el segundo ángulo de salida tiene una segunda forma en sección transversal, siendo diferente la segunda forma de la primera forma.

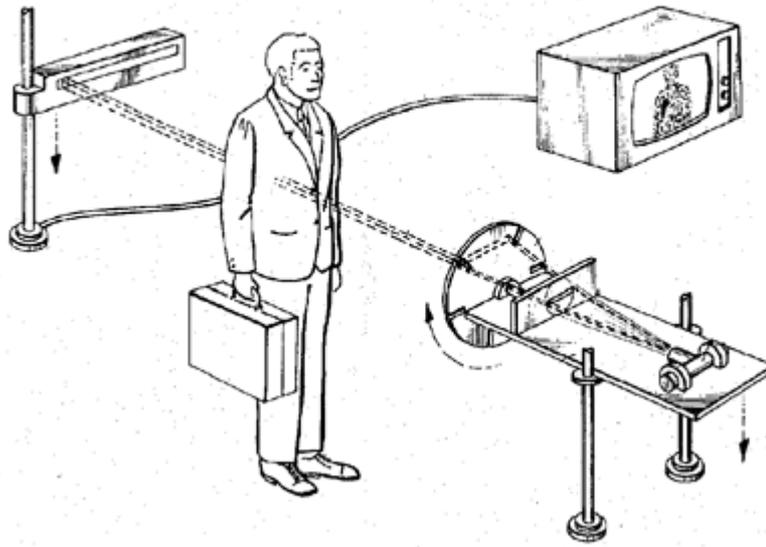


Fig. 1A (técnica anterior)

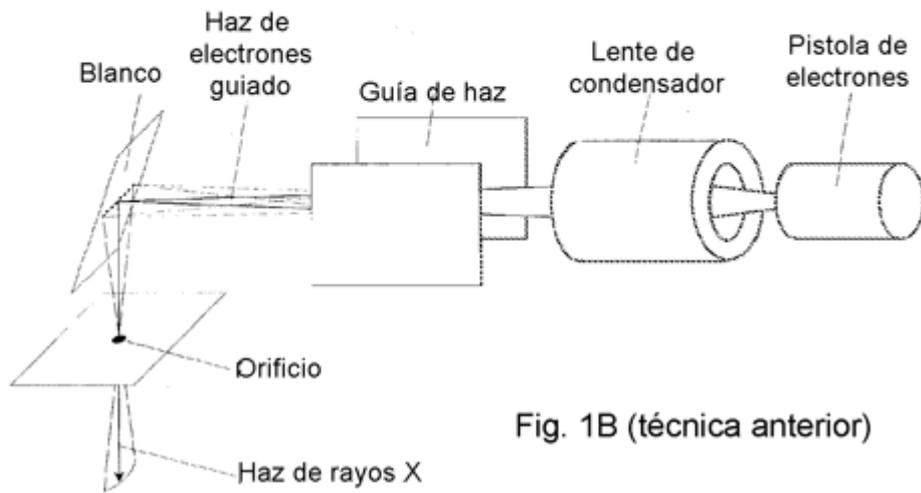


Fig. 1B (técnica anterior)

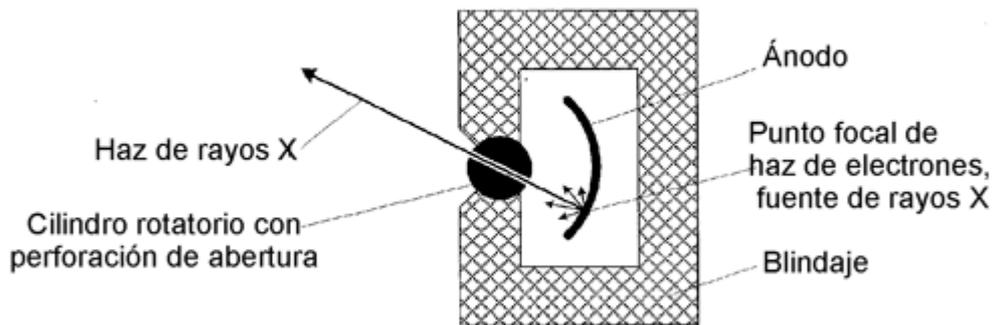


Fig. 1C (técnica anterior)

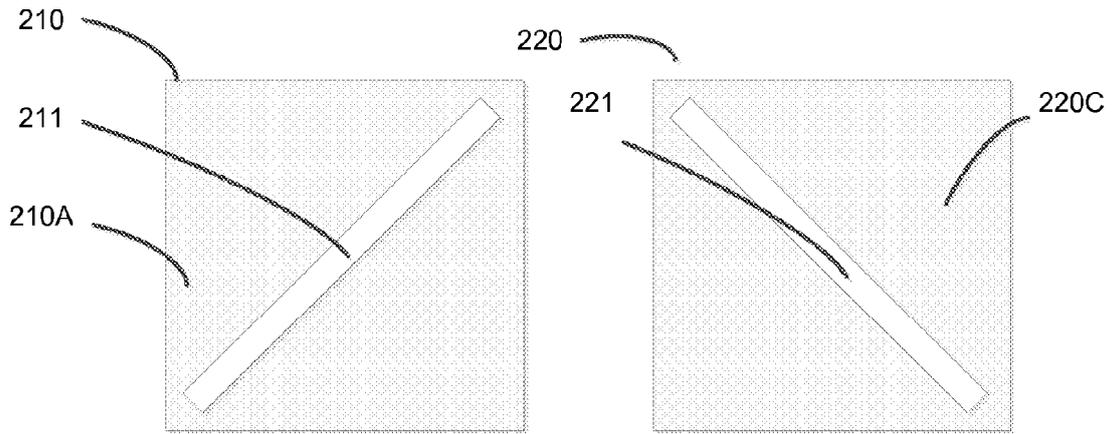


Fig. 2A

Fig. 2B

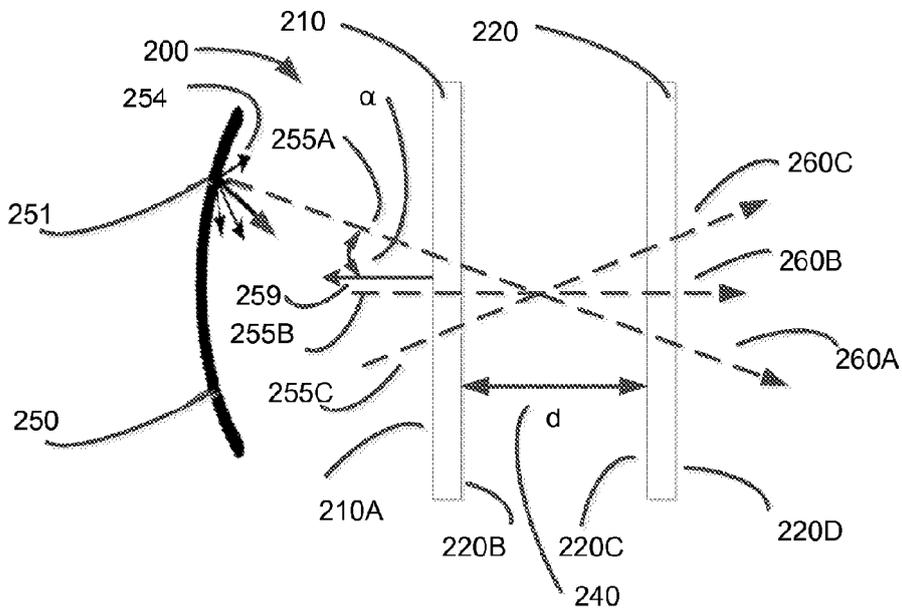


Fig. 2C

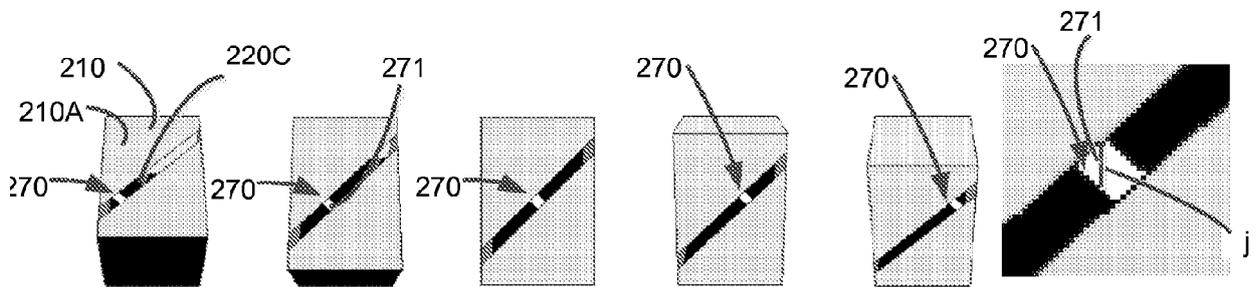


Fig. 2D

Fig. 2E

Fig. 2F

Fig. 2G

Fig. 2H

Fig. 2I

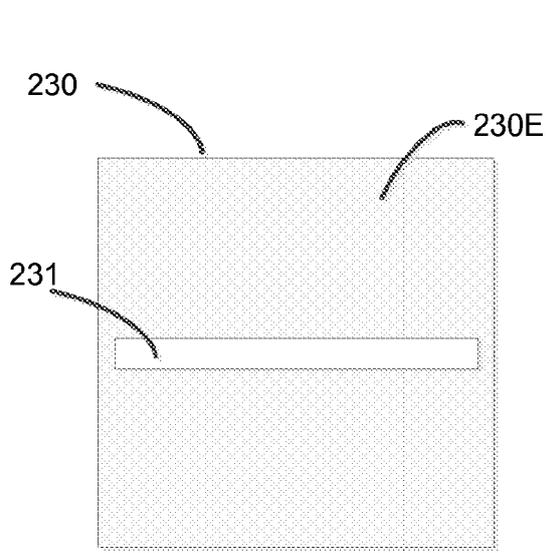


Fig. 2J

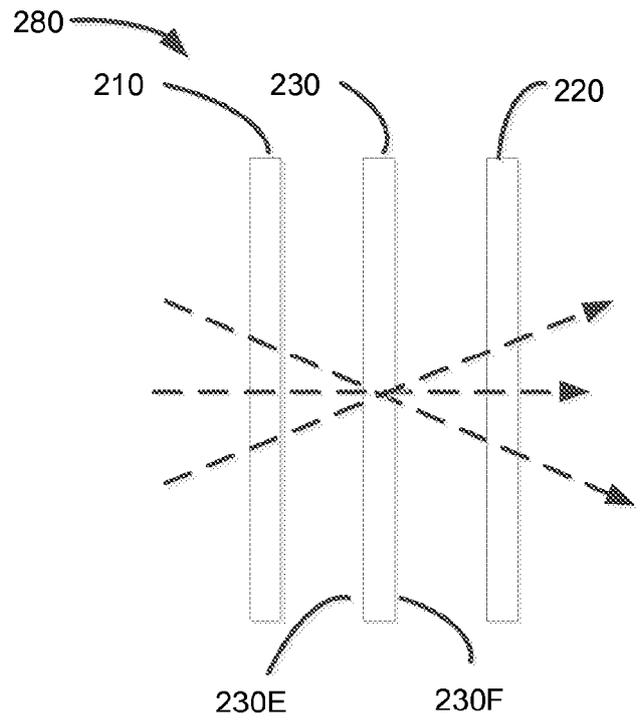


Fig. 2K

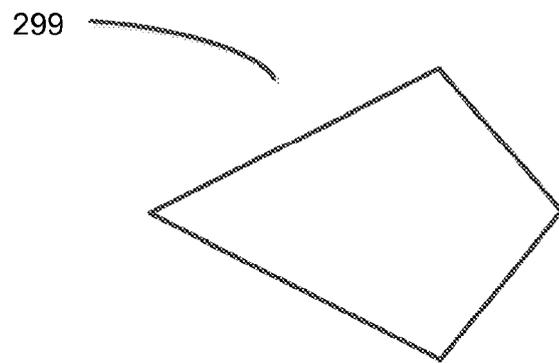
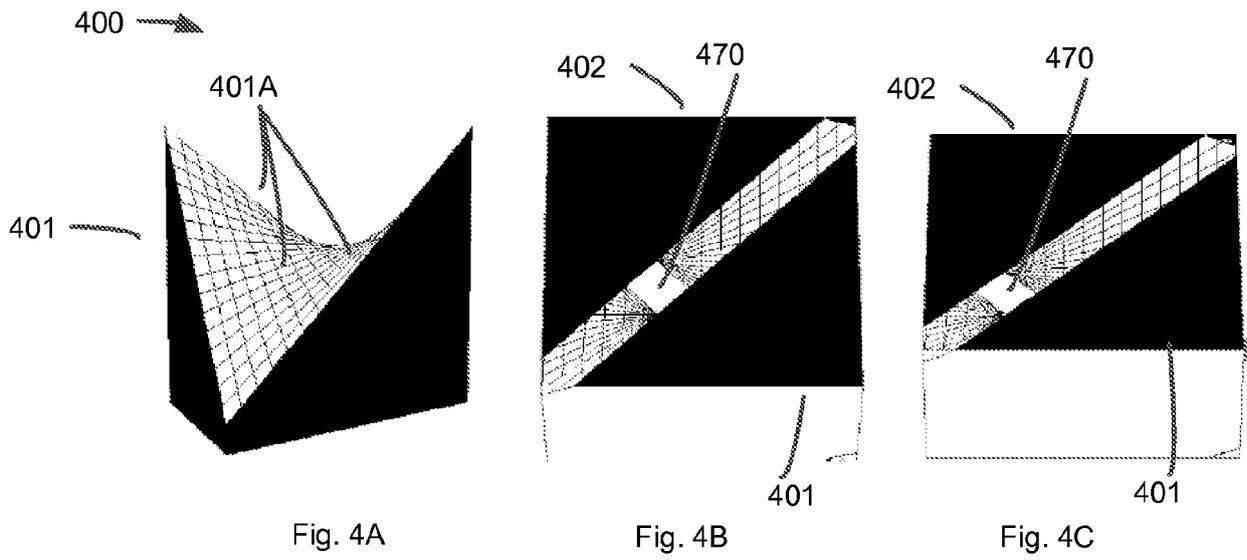
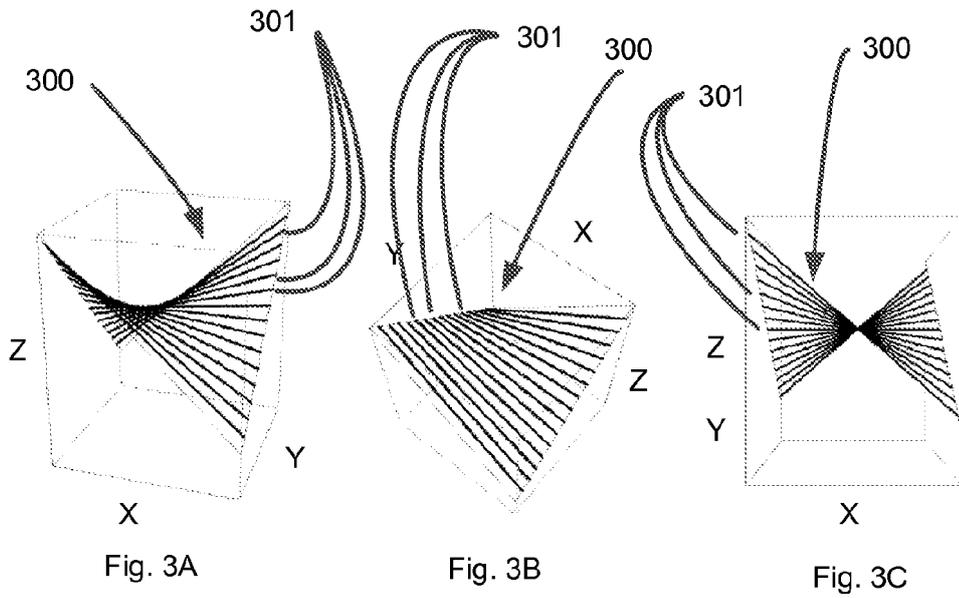
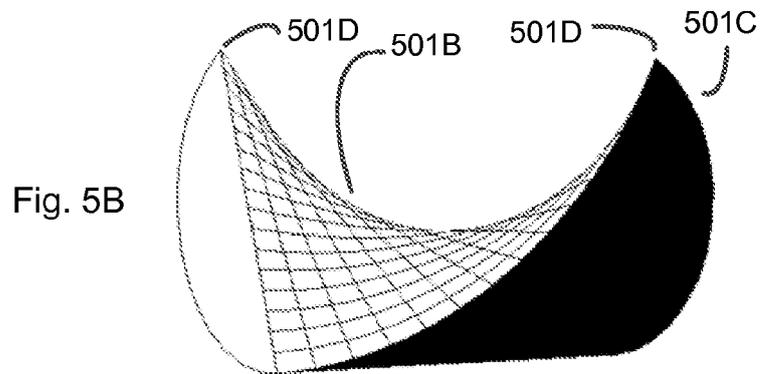
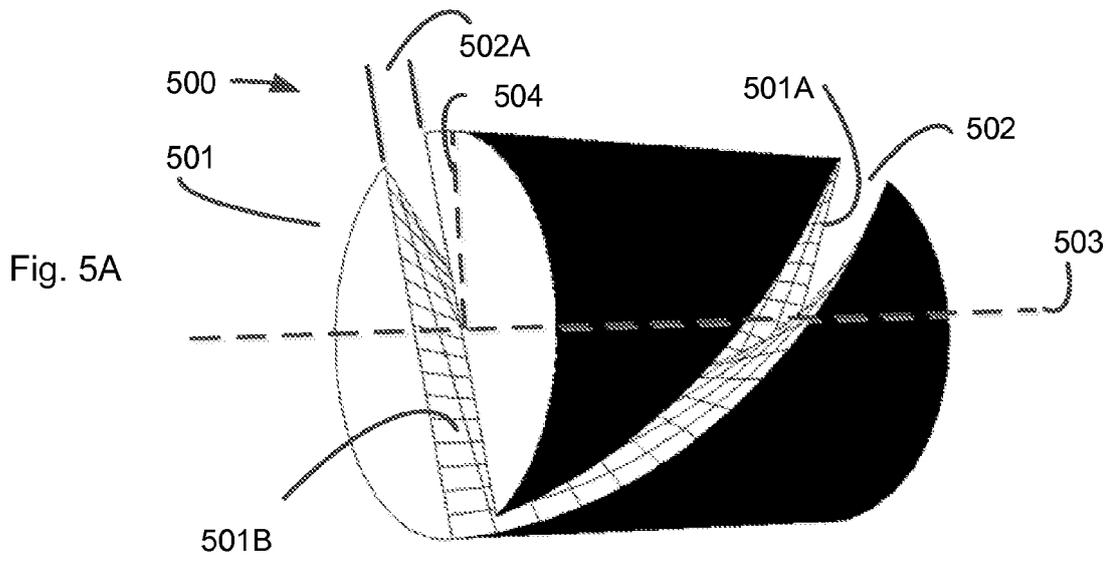


Fig. 2L





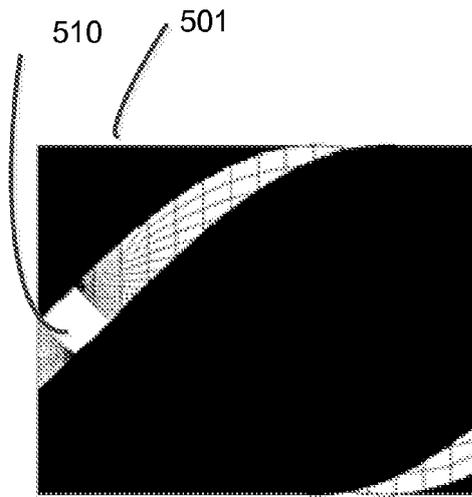


Fig. 5C

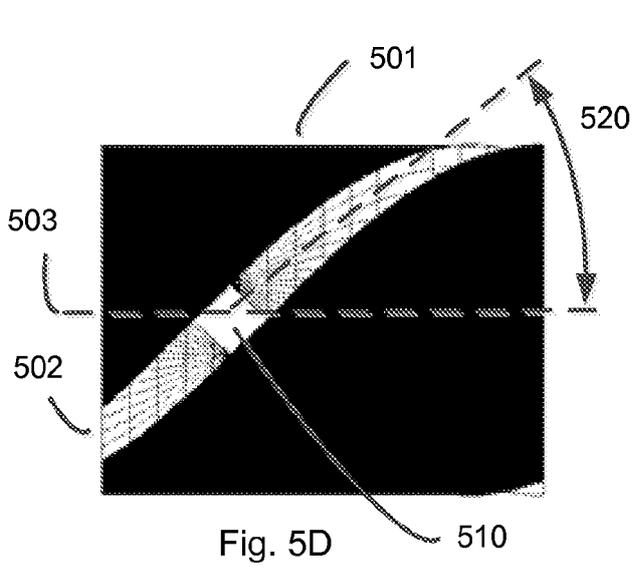


Fig. 5D

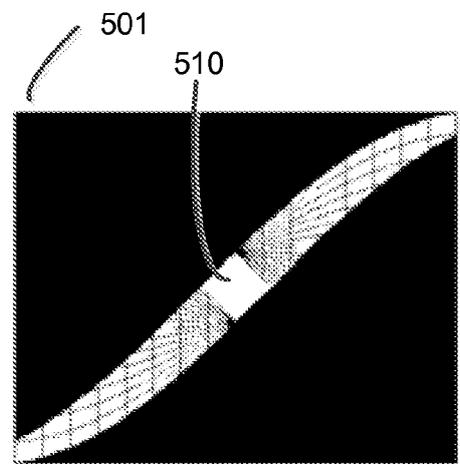


Fig. 5E

