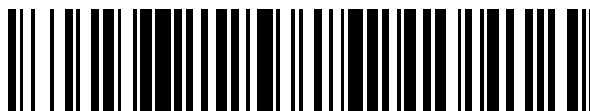


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 798 083**

51 Int. Cl.:

G01N 23/04 (2008.01)

G01V 5/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.07.2010** **E 15153435 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.04.2020** **EP 2889610**

54 Título: **Fluorescencia de resonancia nuclear de isótopo dual para la identificación, el ensayo y la adquisición de imágenes de isótopos con fuentes mono energéticas de rayos de gamma**

30 Prioridad:

21.07.2009 US 506639

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

09.12.2020

73 Titular/es:

**LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL SECURITY,
LLC (100.0%)
2300 First Street
Livermore, CA 94550, US**

72 Inventor/es:

BARTY, CHRISTOPHER

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 798 083 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

Fluorescencia de resonancia nuclear de isótopo dual para la identificación, el ensayo y la adquisición de imágenes de isótopos con fuentes mono energéticas de rayos de gamma

Antecedentes de la invención

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a aplicaciones que utilizan rayos gama monoenergéticos (rayos MEGa), y más específicamente, se refiere a técnicas que utilizan rayos MEGa para caracterizar isótopos.

Descripción de la técnica relacionada

10 Las fuentes de rayos MEGa se crean mediante la dispersión de pulsos láser energéticos (tipo Joule) de corta duración (unos picosegundos) de haces de electrones relativistas (varios cientos de MeV). Los fotones dispersados resultantes se dirigen directamente en un haz estrecho (típicamente miliradianes de divergencia), son monoenergéticos, sintonizables, polarizados y tienen un brillo de los fotones máximo (fotones/segundo/ángulo sólido unitario, por unidad de área, por unidad de ancho de banda) que supera el de los mejores sincrotrones en más de 15 órdenes de magnitud a energías de rayos gamma en exceso de 1 MeV. Tales haces pueden excitar eficazmente los protones en el núcleo de un isótopo específico, lo que se denomina fluorescencia de resonancia nuclear (NRF). Las energías resonantes de NRF son una función del número de protones y neutrones en el núcleo y, por tanto, son una característica exclusiva de cada isótopo. Se ha sugerido que la NRF se puede usar para identificar isótopos específicos. Se ha sugerido además (T-REX/FINDER) que las fuentes de rayos MEGa son ideales para esta aplicación y no solo hacen posible la identificación de isótopos, sino que también se pueden usar para determinar la cantidad y distribución espacial de isótopos en un objeto determinado. Con el fin de lograr estas tareas, se analiza el haz de rayos MEGa transmitido a través de un objeto particular. Las resonancias de NRF son estrechas, típicamente de amplitud IQE-6 en comparación con la energía resonante, p. ej., 1 eV de amplitud para una energía resonante de 1 MeV. Las fuentes de rayos MEGa, por otra parte, son típicamente de $10E-3$ de amplitud con respecto a su energía portadora, p. ej., 1 keV de amplitud para una energía portadora de 1 MeV. Una cantidad determinada de (p. ej., gramos) de un isótopo resonante retira una cantidad correspondiente de fotones resonantes de un haz de rayos MEGa, según la ley de Beer. La detección o medición de la ausencia de fotones resonantes en un haz de rayos MEGa transmitido a través de un objeto se puede usar, por tanto, para determinar no solo la presencia del material, sino también su ubicación y cantidad. Para ello, se necesita un detector capaz de resolver el número de fotones resonantes retirados por el objeto deseado del haz de rayos MEGa. Las tecnologías de espectroscopía de rayos gamma conocidas no son capaces de resoluciones superiores a $10E-3$ en la región espectral de MeV y, por tanto, no son capaces de cumplir esta tarea. Un método descrito por Bertozzi et al. (patente de Bertozzi) contempla usar una pieza del material en observación después del objeto en cuestión para evaluar la retirada de fotones resonantes de NRF del haz.

Consideremos pormenorizadamente la sugerencia de Bertozzi usando un ejemplo específico, a saber, la ubicación de U235 oculto dentro de un contenedor grande tal como el usado para el comercio transoceánico. La sugerencia de Bertozzi se aplica específicamente a la interrogación con un haz de rayos gamma policromático tal como el producido por una fuente de Bremsstrahlung. Remitiéndonos a la Figura 1A, en su propuesta, el haz **10** transmitido a través del contenedor de carga **12** impacta sobre dos "detectores". El detector de transmisión **14** es un colector de energía que mide los rayos gamma totales que pasa a través del objeto y el primer detector **16**, que consiste en una pieza (típicamente una hoja delgada) del material/isótopo que se está buscando en el contenedor, es decir, una hoja delgada **18** de U235 en este ejemplo. La hoja delgada de U235 en el detector **16** está rodeada de un área grande, el espectrómetro de rayos gamma **20** que mide el espectro de los fotones dispersados por la hoja delgada **18** de U235. Si el U235 está presente en el contenedor de carga en cantidades superiores a unos gramos, entonces los fotones resonantes serán retirados del haz de rayos gamma interrogadora y el espectrómetro de rayos gamma que rodea a la hoja delgada de U235 no verá ningún fotón resonante. Como se representa en la Figura 1B, la luz dispersada por la hoja delgada interrogadora consistirá en fotones no NRF y partículas **22** tales como fotones dispersados de Compton, fotones de Delbruck y diversas partículas energéticas. Cuando el haz **10** no se propaga sobre ningún U235 dentro del contenedor, entonces además de los fotones no NRF y las partículas, la espectroscopía de la luz dispersada revelará fotones NRF **24**. La Figura 2A muestra un contenedor de carga **30**, que incluye material **32** de U235 que es interrogado por un haz policromático **34** que incluye luz resonante en la línea del U235. Como se muestra en la Figura 2B, la espectroscopía de la luz dispersada muestra solo fotones no NRF y partículas **36** y de ese modo revela la ausencia de fotones NRF y, por tanto, la presencia de material de U235 en el contenedor. A pesar de que este método en principio funciona, tiene algunas limitaciones importantes, en particular, requiere espectroscopía de rayos gamma de los fotones dispersados para ser eficaz. La espectroscopía de rayos gamma es difícil y se logra, en prácticamente todos los casos, recogiendo un rayo gamma cada vez y analizando la energía total de ese fotón. Esto puede servir para rayos que tienen fotones distribuidos uniformemente en el tiempo, p. ej., los que provienen de una fuente de Bremsstrahlung. Sin embargo, las fuentes de Bremsstrahlung han demostrado ser inadecuadas para esquemas de detección de NRF basados en transmisión debido a su amplio ancho de banda y su divergencia del haz, que no son concordantes con los requisitos de detección de NRF (documento de Pruet et al.). Los haces de rayos MEGa son muy adecuados para la transmisión-detección debido a su estrecho ancho de banda y su baja divergencia (100x inferior a los de Bremsstrahlung); sin embargo, por su naturaleza, estas fuentes producen ráfagas grandes de fotones, hasta

10E10 por pulso a velocidades de decenas a cientos de veces por segundo. Las fuentes de rayos MEGa no son adecuadas para la espectroscopía de rayos gamma basada en el recuento de fotones individuales.

Los métodos alternativos que eliminan las limitaciones del método de Bertozzi son deseables.

El documento WO 2007/038527 describe la utilización de fuentes de haces concentrados, de resolución espacial alta y brillo alto, de radiación de rayos X y rayos gamma espectralmente dura y pura a base de láser para inducir dispersión resonante en núcleos específicos, es decir, fluorescencia de resonancia nuclear. Monitorizando tal fluorescencia como una función de la posición del haz, es posible adquirir imágenes indistintamente en dos dimensiones o tres dimensiones, de la ubicación y concentración de isótopos individuales en una configuración de material específica. Tales métodos de la presente invención identificación de materiales, resolución espacial de la ubicación de los materiales y capacidad para ubicar e identificar materiales blindados por otros materiales, tales como, por ejemplo, detrás de un muro de plomo. La base de la presente invención es la generación de radiación de rayos X (cientos de keV) y rayos gamma (superior a aproximadamente 1 MeV) de alta energía cuasimonocromática mediante la colisión de pulsos láser intensos de electrones relativistas. Tal procedimiento como se utiliza en la presente memoria, es decir, dispersión de Thomson o dispersión de Compton inversa, produce haces que tienen diámetros de aproximadamente 1 micra a aproximadamente 100 micras de fotones de alta energía con un ancho de banda de $\Delta E/E$ de aproximadamente $10E^{-3}$.

Compendio de la invención

Un objetivo de la presente invención es hacer posible la detección, ensayo y adquisición de imágenes eficaz de isótopos mediante fluorescencia de resonancia nuclear (NRF) excitada por fuentes de dispersión de Compton inversa, a base de láser, de rayos gamma monoenergéticos (rayos MEGa).

Este y otros objetivos resultarán evidentes a partir de la descripción de la presente memoria.

Las realizaciones de la presente invención mitigan la necesidad de espectroscopía de recuento de fotones individuales con disposiciones de detección basadas en rayos MEGa. La Figura 3A muestra una realización de la presente invención que incluye una disposición de detectores que no consiste en dos detectores situados detrás del objeto en observación, sino en tres. El último detector, que funciona como un monitor de haces, es un detector integrador que monitoriza la potencia total del haz que llega a su superficie. Este detector de la transmisión puede, p. ej., ser idéntico al último detector del esquema de Bertozzi, que se describe en el documento de EE. UU. 2006/0188060 A1. El primer detector y el detector intermedio incluyen cada uno un detector integrador que rodea una hoja delgada. Las hojas delgadas de estos dos detectores están hechas del mismo material atómico, pero cada hoja delgada es un isótopo diferente, p. ej., la primera hoja delgada puede comprender U235 y la segunda hoja delgada puede comprender U238. Los detectores integradores que rodean estas piezas de hoja delgada miden la potencia total dispersada desde la hoja delgada y pueden ser similares en composición al monitor de haces final. Los fotones no resonantes, después de su calibración, se dispersarán equitativamente desde ambas hojas delgadas, es decir, Compton, Delbruck, etc., y no son, en primer orden, dependientes del número de nucleones en el isótopo, pero son una función del elemento atómico. Como se muestra en la Figura 3B, si el objeto en interrogación no tiene U235 presente y el haz de rayos MEGa interrogador está sintonizado a la transición resonante del U235, entonces la primera hoja delgada producirá fotones resonantes, así como los fotones no resonantes y radiación dispersa y, por tanto, emanará más energía de la primera hoja delgada que de la segunda hoja delgada. En la presente memoria se proporciona un abanico de métodos para diagnosticar el contenido de un objeto interrogado y están dentro del alcance de la presente invención. Por ejemplo, la relación de la energía dispersada por cada hoja delgada o la diferencia en la energía dispersada por cada hoja delgada se pueden usar no solo para determinar la presencia del material en el objeto en interrogación, sino que la relación o diferencia exactas son una función de la cantidad de material presente, por tanto, esta disposición de detectores también puede proporcionar información de ensayo cuantitativa. Disponiendo las hojas delgadas en píxeles pequeños también es posible usar haces de rayos MEGa y NRF para determinar con una resolución espacial alta (micras) la ubicación de isótopos específicos.

Esta disposición genérica se denomina observador de ranura de isótopos dobles (DINO), ya que identifica eficazmente la profundidad de la ranura de amplitud 10E-6 en el haz de rayos MEGa transmitido en la amplitud 10RE-3. Como las fuentes de rayos MEGa son nuevas (solo un par de años de edad), nunca nadie necesitó considerar cómo hacer un detector de tipo DINO. Varias configuraciones de DINO están dentro del alcance de la presente invención, que incluyen, pero no se limitan a:

a) hojas delgadas secuenciales en las que la atenuación de la primera hoja delgada se calibra y se toma como parte de la medición;

b) disposición de hojas delgadas rotatorias en la que las dos (o más) hojas delgadas se colocan alternativamente en el haz en pulsos de rayos MEGa secuenciales;

c) múltiples disposiciones de isótopos usadas con haces de rayos MEGa dobles o multicolor para detectar y ensayar más de un isótopo simultáneamente;

d) detección y ensayo determinados por la relación de señales de ambas hojas delgadas y el monitor de haces;

- e) detección y ensayo determinados por la diferencia de señales de ambas hojas delgadas y el monitor de haces;
- f) sin uso de monitor de haces, sino que solo se usa la dispersión de los isótopos para determinar la presencia y cantidad de material.

Breve descripción de los dibujos

- 5 Los dibujos adjuntos, que se incorporan en, y forman parte de, la descripción, ilustran realizaciones de la invención y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención.

La Figura 1A muestra una configuración de la técnica anterior en la que un haz transmitido a través de un contenedor de carga impacta sobre dos detectores.

La Figura 1B ilustra luz dispersada por una hoja delgada interrogadora.

- 10 La Figura 2A muestra un contenedor de carga que incluye material de U235 que es interrogado por un haz policromático que incluye luz resonante en la línea del U235.

La Figura 2B ilustra un espectro de luz dispersada que presenta solo fotones no NRF y partículas.

La Figura 3A muestra una realización de la presente invención que incluye una disposición de detectores que consiste en tres detectores situados detrás de un contenedor que no tiene U235 en la trayectoria del haz.

- 15 La Figura 3B muestra que para un objeto en interrogación que no tiene U235 presente y el haz de rayos MEGA interrogador está sintonizado a la transición resonante del U235, entonces la primera hoja delgada producirá fotones resonantes, así como los fotones no resonantes y radiación dispersa y, por tanto, emanará más energía de la primera hoja delgada que de la segunda hoja delgada.

- 20 La Figura 4A muestra una realización de la presente invención que incluye una disposición de detectores que consiste en tres detectores situados detrás de un contenedor que tiene U235 en la trayectoria del haz.

La Figura 5 ilustra un ejemplo de la invención donde, después de salir del objeto en ensayo, un haz de sondeo pasa a través de una hoja delgada de U238 y a continuación a través de una hoja delgada de U235 antes de propagarse hacia el detector de monitorización de haces.

La Figura 6A ilustra una realización que usa una única hoja delgada rotatoria.

- 25 La Figura 6B muestra las dos mitades de la hoja delgada rotatoria de la Figura 6A.

La Figura 7 es un ejemplo donde una porción de un haz de rayos MEGA de área finita pasa simultáneamente a través de una pieza de U235 y una de U238.

La Figura 8 ilustra un haz de rayos MEGA de área finita que se propaga a través de píxeles de material de U235 en línea con píxeles de material de U238.

- 30 **Descripción detallada de la invención**

La Figura 3A muestra una realización de la presente invención donde no hay U235 ni U238 en la trayectoria del haz. Específicamente, el haz de sondeo de rayos MEGA **50** está sintonizado en la línea de NRF del U235. La trayectoria del haz **50**, a medida que atraviesa el contenedor **52**, no se interseca con ningún material de U235 o U238. Después de pasar a través del contenedor **52**, el haz **50** se propaga a, y a través de, una primera hoja delgada **54**, que está rodeada por un detector integrador **56**. Después de pasar a través de la hoja delgada **54**, el haz **50** se propaga a, y a través de, una segunda hoja delgada **58**, que está rodeada por un detector integrador **60**. Después de pasar a través de la hoja delgada **58**, el haz **50** se propaga hacia un detector integrador **62**. Como el haz **50**, que está sintonizado en la línea de NRF del U235, no encuentra ningún U235 a medida que pasa a través del contenedor **52**, no hay reducción de los fotones resonantes de U235 dentro del haz **50**. Por lo tanto, la hoja delgada **54** de U235 produce una mayor cantidad de NRF de lo que haría si el haz **50** hubiera encontrado U235 en su trayectoria a través del contenedor **52**. Si hubiera habido una cantidad suficiente de U235 presente en la trayectoria del haz **50** dentro del contenedor **52**, de tal manera que todos los fotones resonantes del haz **50** hubieran sido retirados, entonces, después de la normalización de las señales en cada detector para tener en cuenta las pérdidas de atenuación, la cantidad de fotones no resonantes y radiación dispersa de las hojas delgadas **54** y **58** habría sido, en primer orden, la misma. En el ejemplo de la Figura 3A, no hay U235 (ni U238) dentro de la trayectoria del haz a través de contenedor y, por lo tanto, además de los fotones no resonantes y las partículas dispersadas, el detector integrador recoge la resonancia producida por la interacción del haz de sondeo **50** con el U235 en la hoja delgada **54**. La Figura 3B representa las señales producidas por los detectores integradores **56** y **58** en el ejemplo de la Figura 3A. Los elementos de la Figura 4A son idénticos en todos los aspectos a los de la Figura 3A, a excepción de que una cantidad de material **64** de U235 está en la trayectoria del haz **50** a medida que este pasa a través del contenedor **52**. En este ejemplo, la cantidad de U235 es suficiente para retirar todos los fotones resonantes del haz **50**, de tal manera que no hay producción de NRF de U235 desde la hoja delgada **54**, como se representa en la Figura 4B. Cuando la hoja delgada **54** no produce absolutamente nada de

NRF de U235, la cantidad de U235 dentro de la trayectoria del haz no se puede deducir. Debido a la magnitud de las energías de rayos gamma (en exceso de 1 MeV) producidas por las fuentes de rayos MEGa usadas en la presente invención, como se describe, p. ej., en la solicitud n.º 11/528,182 (patente de EE. UU. n.º 7,564,241), la presente invención es capaz de producir NRF de U235 en la hoja delgada **54** incluso en presencia de U235 dentro de la trayectoria del haz **50** a través del contenedor **52**. Por tanto, si la cantidad de NRF de U235 producida por la hoja delgada **54** es inferior a la producida cuando el haz **50** no encuentra U235 en su trayectoria a través del contenedor **54**, la cantidad de U235 que es producida es indicativa de la cantidad de ese material en la trayectoria del haz **50**. Además, moviendo la trayectoria del haz **50** con respecto al contenedor **52**, se puede obtener una imagen, tanto bidimensional como tridimensional, del material de U235 dentro del contenedor **52**. Otras técnicas para obtener una imagen bidimensional y tridimensional se presentan a continuación, e incluso otras resultarán evidentes para los expertos en la técnica en base a las descripciones de la presente memoria. Aunque la presente invención usa ejemplos para determinar la presencia, el ensayo y la adquisición de imágenes de U235, la presente invención se puede usar con los mismos fines en aplicaciones con otros materiales.

La Figura 5 ilustra otro ejemplo donde, después de salir de un objeto en ensayo (no mostrado), un haz de sondeo **70**, pasa a través de una hoja delgada **72** de U238 y a continuación a través de una hoja delgada **82** de U235 antes de propagarse hacia el detector de monitorización de haces **90**. El detector integrador **74**, mostrado en sección transversal, ubicado cerca de la hoja delgada **72**, es sustancialmente similar, en este ejemplo, al detector **84** ubicado cerca de la hoja delgada **82**. El detector integrador **74** está formado por un centelleador **76** y dos fotomultiplicadores **77** y **78**. Se coloca un blindaje de Compton **79** entre la hoja delgada **72** y el centelleador **76**.

La Figura 6A ilustra una realización que usa una única hoja delgada rotatoria en lugar de las hojas delgadas dobles descritas anteriormente. En este ejemplo, después de salir del objeto en ensayo, el haz de rayos MEGa **100** pasa a través de la hoja delgada rotatoria **102** e impacta sobre el detector integrador **106**. Un detector integrador **104**, similar a los detectores **74** y **84** de la Figura 5, está ubicado cerca de la hoja delgada **102**. La Figura 6B muestra una vista frontal de la hoja delgada rotatoria **102**. Como se muestra en la Figura 6B, una mitad **102'** de la hoja delgada rotatoria comprende U235 y la otra mitad **102''** comprende U238. El haz **100** se pulsa a una velocidad fija y la hoja delgada rotatoria **102** rota a una velocidad fija que es la mitad de la velocidad de los pulsos si el haz **100**. A tal velocidad de rotación, el haz **100** pasará a través de la porción de U235 en un pulso y, en el siguiente pulso, el haz **100** pasará a través de la porción de U238.

La Figura 7 es un ejemplo donde una porción de un haz de rayos MEGa de área finita **120** pasa simultáneamente a través de una pieza **122** de U235 y una pieza de U238 **124**. La porción del haz **120** que pasa a través de la pieza **122** de U235 se propaga hacia el detector integrador **126** y la porción del haz **120** que pasa a través de la pieza de U238 **124** se propaga hacia el detector integrador **128**.

La Figura 8 ilustra un haz de rayos MEGa de área finita **140** que se propaga a través de píxeles de material **141-146** de U235 en línea con píxeles **151-156** de material de U238. Este haz cubrirá completamente cualquier material de U235 que tenga un diámetro inferior al diámetro del haz. Por ejemplo, si el diámetro del haz **140'** es 1 cm y una pieza **148** de U235 tiene un diámetro de 0,5 cm, entonces la pieza **148** de U235 será completamente cubierta por el haz **140**. Se coloca un detector integrador independiente (no mostrado) para medir la NRF de U235 y los fotones no resonantes y partículas para cada uno de los píxeles **141-146** de material de U235 y de los píxeles **151-156** de material de U238. En este ejemplo, se coloca un detector integrador independiente de los detectores integradores **161-166** para medir la porción del haz que pasa a través de cada par de píxeles. Por tanto, la porción del haz **140** que pasa a través del píxel **141** pasará a continuación a través del píxel **151** y se propagará hacia el detector integrador **161**. Observe que, aunque los píxeles **141-146** y los píxeles **151-156** están representados como un conjunto ordenado bidimensional, cada píxel puede ser una parte de un conjunto ordenado de píxeles que se prolongan perpendiculares al plano de la página para crear un conjunto ordenado de píxeles tridimensional. Esta configuración ejemplar proporciona instantáneamente una imagen bidimensional completa de cualquier pieza de U235 que sea más pequeña que el diámetro del haz **140**. Tal haz se puede mover con respecto a una pieza más grande de U235 para obtener una imagen de tal pieza. El haz y la pieza de U235 se pueden mover el uno con respecto al otro para obtener una imagen tridimensional del U235. El haz y su alineación con los conjuntos ordenados de píxeles se pueden mantener constantes como una unidad, y la unidad completa se puede mover para obtener una imagen de la pieza de U235.

Para entender algunos métodos ejemplares para analizar los datos recogidos en las realizaciones de la invención, considere las figuras 3A a 4B. En la Figura 3A, el rayo MEGa, que está sintonizado a una línea de NRF del U235, pasa a través del contenedor sin encontrar ningún U235. Si el haz no estuviera sintonizado a la línea de NRF de indistintamente el U235 o el U238, la cantidad de señal recogida por cada detector integrador sería aproximadamente la misma. Habría alguna reducción de potencia por la absorción y dispersión a medida que el haz se propaga a través de la primera hoja delgada. Por lo tanto, las dos señales están normalizadas. Si el haz se sintoniza a continuación a una línea de NRF del U235, la diferencia entre los niveles de señal en cada detector es producida por la NRF del contenido de U235 de la primera hoja delgada. Esta diferencia no cambiará si se retira todo el contenedor. Esto es importante en un aspecto, porque el sistema de detección se puede ajustar y alinear y, a continuación, las dianas, tales como contenedores marítimos, se pueden mover hacia la trayectoria del haz. Si la trayectoria del haz no se interseca con material que tiene contenido de U235, entonces la diferencia de señal será determinada por la cantidad de U235 a través de la cual pasa el haz. Al poner esta diferencia en una escala logarítmica, revelará cambios pequeños en la cantidad de señal producida de NRF de U235 recogida por el detector integrador próximo a la hoja delgada de

U235. Esto hace posible un abanico de métodos de análisis de datos de diverso grado de precisión. Por ejemplo, la mera medición de la cantidad de señal recogida por el detector de U235 en resonancia antes y durante la interacción con una diana de U235 mostrará una diferencia de señal que es dependiente de la cantidad de U235 encontrada. En otro ejemplo, como se comentó anteriormente, se hace una medición de la cantidad de señal recogida por el detector de U235 y el detector de U238, en resonancia, antes y durante la interacción con una diana de U235. Las señales se pueden normalizar primero de un abanico de formas, que incluyen la sustitución de una hoja delgada de U238 por la hoja delgada de U235, o sintonizando el haz de rayos MEGa para que esté fuera del intervalo de resonancia. La diferencia entre las dos señales en la resonancia del U235 es dependiente de la cantidad de U235 encontrada. En otro método, se determina una diferencia entre (i) la relación de la señal del detector de U235 al tercer detector y (ii) la relación de la señal del detector de U238 al tercer detector. En cada método, la representación de los resultados en una escala logarítmica revela cambios mucho menores que en una escala lineal. Otros métodos de análisis de señales resultarán evidentes para los expertos en la técnica en base a estos ejemplos.

Las variaciones y usos de la invención resultarán evidentes para los expertos en la técnica. Por ejemplo, las técnicas aquí descritas se pueden usar para materiales distintos de los descritos. Se pueden emplear otras configuraciones de detectores integradores dentro del alcance de esta invención. Las realizaciones de la invención se pueden usar para determinar rápidamente el contenido de isótopos de dianas móviles tales como las descritas para ser usadas en el Proyecto de energía de fusión-fisión con confinamiento inercial por láser (LIFE) en el Lawrence Livermore National Laboratory o en un reactor con lecho de bolas. En los casos donde el objeto se mueve, las configuraciones de la invención se pueden usar para medir el desplazamiento Doppler para la determinación de velocidades.

La descripción anterior de la invención se ha presentado con fines ilustrativos y descriptivos y no pretende ser exhaustiva ni limitar la invención a la forma exacta descrita.

A la vista de las enseñanzas anteriores, son posibles muchas modificaciones y variaciones. Las realizaciones descritas solo sirven para explicar los principios de la invención y su aplicación práctica para hacer posible de ese modo que las personas que no sean expertas en la técnica hagan el mejor uso posible de la invención en diversas realizaciones y con diversas modificaciones adecuadas para el uso particular contemplado. El alcance de la invención se define mediante las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato para la detección de uno de un primer y un segundo isótopo de un material atómico, comprendiendo el aparato:

una primera estructura (54; 72; 102');

5 un primer detector integrador (56; 74; 104) colocado activamente para detectar una señal A de dicha primera estructura (54; 72; 102');

en donde dicha primera estructura (54; 72; 102') comprende una porción A que consiste esencialmente en dicho primer isótopo de dicho material atómico,

10 en donde dicha primera estructura (54; 72; 102') está configurada para interceptar al menos alguna porción de un haz de rayos gamma monoenergéticos (rayos MEGa) (50; 70; 100); y en donde el primer detector integrador (56; 74; 104) se proporciona para medir la potencia total dispersada desde la primera estructura (54; 72; 102');

estando el aparato caracterizado por que comprende una segunda estructura (58; 82; 102") y un segundo detector integrador (60; 84; 104) colocado activamente para detectar una señal B de dicha segunda estructura (58; 82; 102");

15 en donde dicha primera estructura (54; 72; 102') y dicha segunda estructura (58; 82; 102") comprenden el mismo dicho material atómico, en donde dicha segunda estructura (58; 82; 102") comprende una porción B que consiste esencialmente en dicho segundo isótopo de dicho material atómico;

20 en donde dicha segunda estructura (58; 82; 102") está configurada para interceptar al menos alguna porción del haz de rayos gamma monoenergéticos (rayos MEGa) (50; 70; 100); y en donde el segundo detector integrador (60; 84; 104) se proporciona para medir la potencia total dispersada desde la segunda estructura (58; 82; 102").

2. El aparato de la reivindicación 1, que comprende además un tercer detector integrador (62; 90; 106) configurado para interceptar al menos alguna porción de dicho haz de rayos gamma monoenergéticos (rayos MEGa) (50; 70; 100).

25 3. El aparato de la reivindicación 2, que comprende además medios para analizar al menos una de dicha señal A, dicha señal B y una señal C de dicho tercer detector integrador (62; 90; 106), estando dichos medios para analizar configurados para determinar al menos una de (i) la presencia de un isótopo y (ii) la cantidad de dicho isótopo; y/o producir una imagen seleccionada del grupo que consiste en una imagen bidimensional y una imagen tridimensional.

30 4. El aparato de la reivindicación 2, en donde dicha primera estructura (54) es una de una pluralidad de primeras estructuras dispuestas en un primer grupo de píxeles, en donde dicha segunda estructura (58) es una de una pluralidad de segundas estructuras dispuestas en un segundo grupo de píxeles, en donde dicho tercer detector integrador (62) es uno de una pluralidad de terceros detectores integradores.

35 5. El aparato de la reivindicación 4, en donde cada uno de dicho primer grupo de píxeles, dicho segundo grupo de píxeles y dicha pluralidad de terceros detectores integradores están dispuestos en un conjunto ordenado seleccionado del grupo que consiste en un conjunto ordenado unidimensional y un conjunto ordenado bidimensional; o al menos una porción de cada uno de dicho primer grupo de píxeles, dicho segundo grupo de píxeles y dicha pluralidad de terceros detectores integradores están configurados para interceptar al menos alguna porción de dicho haz de rayos MEGa (50).

6. El aparato de la reivindicación 1, que comprende además una fuente de rayos MEGa para proporcionar dicho haz (50).

7. El aparato de la reivindicación 6, en donde al menos uno de:

40 dicha fuente puede estar configurada para proporcionar dicho haz en una línea de fluorescencia de resonancia nuclear (NRF) de uno de dicho primer isótopo o dicho segundo isótopo;

dicha fuente es capaz de producir energía de rayos MEGa de al menos 1 MeV; y

45 dicha primera estructura (102') forma una primera parte de un disco (102) y en donde dicha segunda estructura (102") forma una segunda parte de dicho disco (102), comprendiendo además dicho aparato medios para hacer rotar dicho disco (102) en donde dicho haz (100) puede, en momentos diferentes, pasar a través de dicha primera parte (102') y dicha segunda parte (102").

8. El aparato de la reivindicación 1, en donde al menos uno de:

dicha primera estructura (54; 72; 102') comprende una primera hoja delgada y en donde dicha segunda estructura (58; 82; 102") comprende una segunda hoja delgada;

50 dicho primer isótopo consiste en U235 y dicho segundo isótopo consiste en U238;

dicha señal A se selecciona de un primer grupo que consiste en fotones y radiación dispersa y dicha señal B se selecciona de un segundo grupo que consiste en fotones y radiación dispersa:

dicho aparato comprende además medios para proporcionar movimiento relativo entre dicho haz (50; 70; 100) y al menos una de dicha primera estructura (54; 72; 102') o dicha segunda estructura (58; 82; 102''); y

5 cada uno de dicho primer detector integrador (56; 74; 104) y dicho segundo detector integrador (60; 84; 104) comprende un centelleador, al menos un fotomultiplicador y un blindaje de Compton.

9. Un método para la detección de uno de un primer y un segundo isótopo de un material atómico, comprendiendo el método:

10 hacer interactuar un haz de rayos gamma monoenergéticos (rayos MEGa) (50; 70; 100) con un objeto de ensayo (52) y una primera estructura (54; 72; 102'), en donde dicha primera estructura (54; 72; 102') comprende dicho material atómico, en donde dicha primera estructura (54; 72; 102') comprende una porción A que consiste esencialmente en dicho primer isótopo; y

15 con un primer detector integrador (56; 74; 104) proporcionado para medir la potencia total dispersada desde la primera estructura (54; 72; 102'), que detecta una primera porción de radiación dispersa y fotones resultante de la interacción de dicho haz de rayos MEGa (50; 70; 100) con dicha primera estructura (54; 72; 102') para producir una señal A;

estando el método caracterizado por que comprende:

20 hacer interactuar el haz de rayos gamma monoenergéticos (rayos MEGa) (50; 70; 100) con una segunda estructura (58; 82; 102'') que comprende el mismo dicho material atómico, en donde dicha segunda estructura (58; 82; 102'') comprende una porción B que consiste esencialmente en dicho segundo isótopo;

con un segundo detector integrador (60; 84; 104) proporcionado para medir la potencia total dispersada desde la segunda estructura (58; 82; 102''), que detecta una segunda porción de radiación dispersa y fotones resultante de la interacción de dicho haz de rayos MEGa (50; 70; 100) con dicha segunda estructura (58; 82; 102'') para producir una señal B; y

25 comparar dicha señal A con dicha señal B para determinar si dicho objeto de ensayo (52) comprende uno de dicho primer isótopo o dicho segundo isótopo.

10. El método de la reivindicación 9, en donde al menos uno de:

el método comprende además comparar dicha señal A con dicha señal B para determinar la cantidad de uno de dicho primer isótopo o dicho segundo isótopo presente en dicho objeto de ensayo;

30 dicho rayo MEGa comprende una energía de al menos 1 MeV; y

comprendiendo el método además proporcionar movimiento relativo entre dicho haz (50; 70; 100) y al menos una de dicha primera estructura (54; 72; 102') o dicha segunda estructura (58; 82; 102'').

35 11. El método de la reivindicación 9, que comprende además detectar, con un monitor de haces (62; 90; 106), la energía en dicho haz (50; 70; 100), en donde la etapa de detectar detecta energía después de que dicho haz interactúa con dicho objeto de ensayo (52), dicha primera estructura (54; 72; 102') y dicha segunda estructura (58; 82; 102''), para producir una señal C.

12. El método de la reivindicación 11, que comprende además analizar al menos una de dicha señal A, dicha señal B y una señal C para producir una imagen seleccionada del grupo que consiste en una imagen bidimensional y una imagen tridimensional.

40 13. El método de la reivindicación 11, que comprende además determinar el ensayo de dicho uno de un primer y un segundo isótopo del material atómico; dicho determinar el ensayo de dicho uno de un primer y un segundo isótopo del material atómico comprende:

calcular una relación A de dicha señal A dicha señal C;

calcular una relación B de dicha señal B a dicha señal C;

45 calcular una diferencia entre dicha relación A y dicha relación B; y

representar gráficamente dicha diferencia en una escala logarítmica.

14. El método de la reivindicación 9, en donde:

dicha primera estructura (54) es una de una pluralidad de primeras estructuras dispuestas en un primer grupo de

píxeles, en donde dicha segunda estructura (58) es una de una pluralidad de segundas estructuras dispuestas en un segundo grupo de píxeles, en donde dicho monitor de haces (62) es uno de una pluralidad de monitores de haces.

15. El método de la reivindicación 14, en donde:

- 5 cada uno de dicho primer grupo de píxeles, dicho segundo grupo de píxeles y dicha pluralidad de monitores de haces están dispuestos en un conjunto ordenado seleccionado del grupo que consiste en un conjunto ordenado unidimensional y un conjunto ordenado bidimensional; o
- 10 al menos una porción de cada uno de dicho primer grupo de píxeles, dicho segundo grupo de píxeles y dicha pluralidad de monitores de haces están configurados para interceptar al menos alguna porción de dicho haz de rayos MEGa (50).

TÉCNICA ANTERIOR

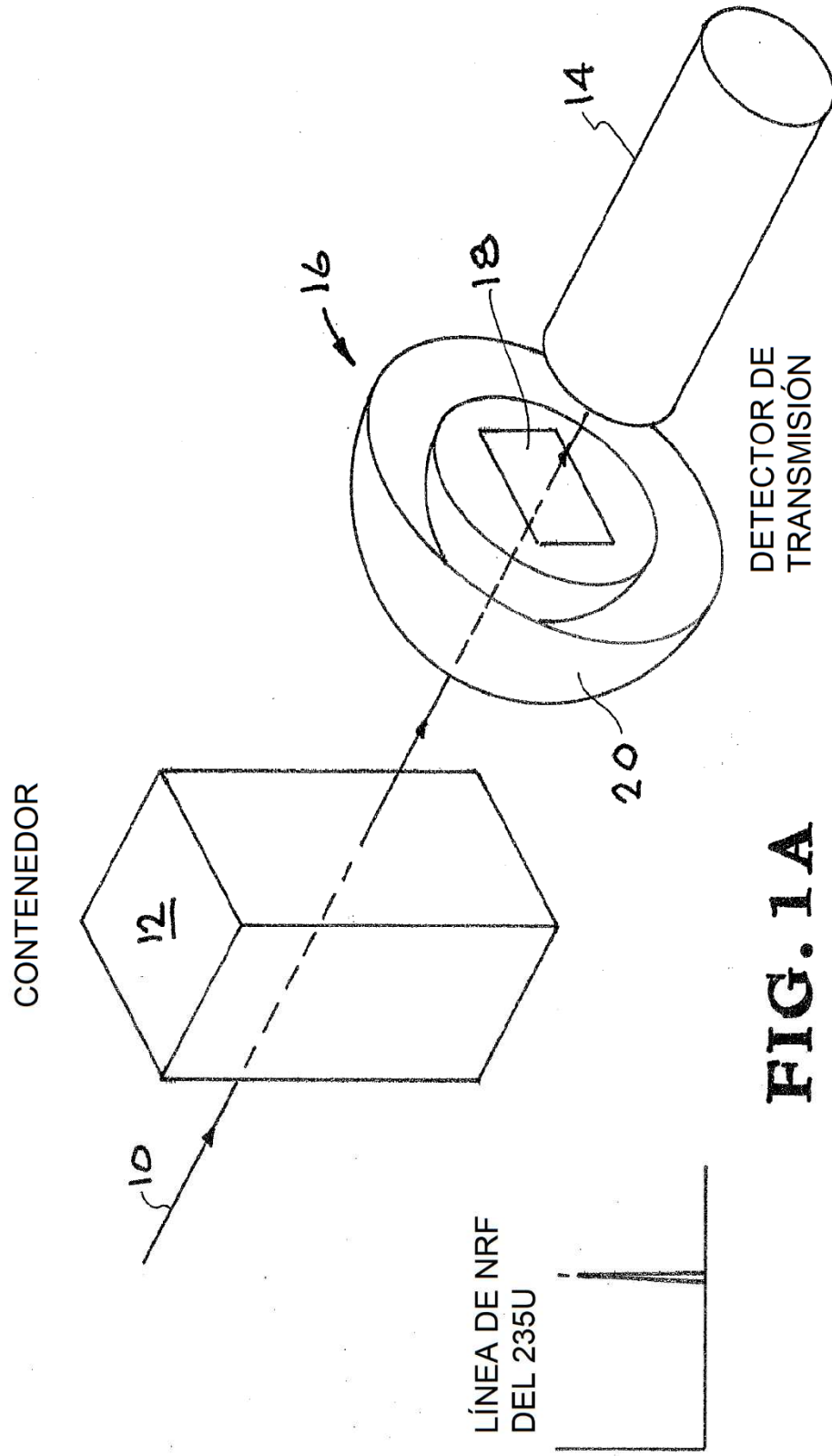
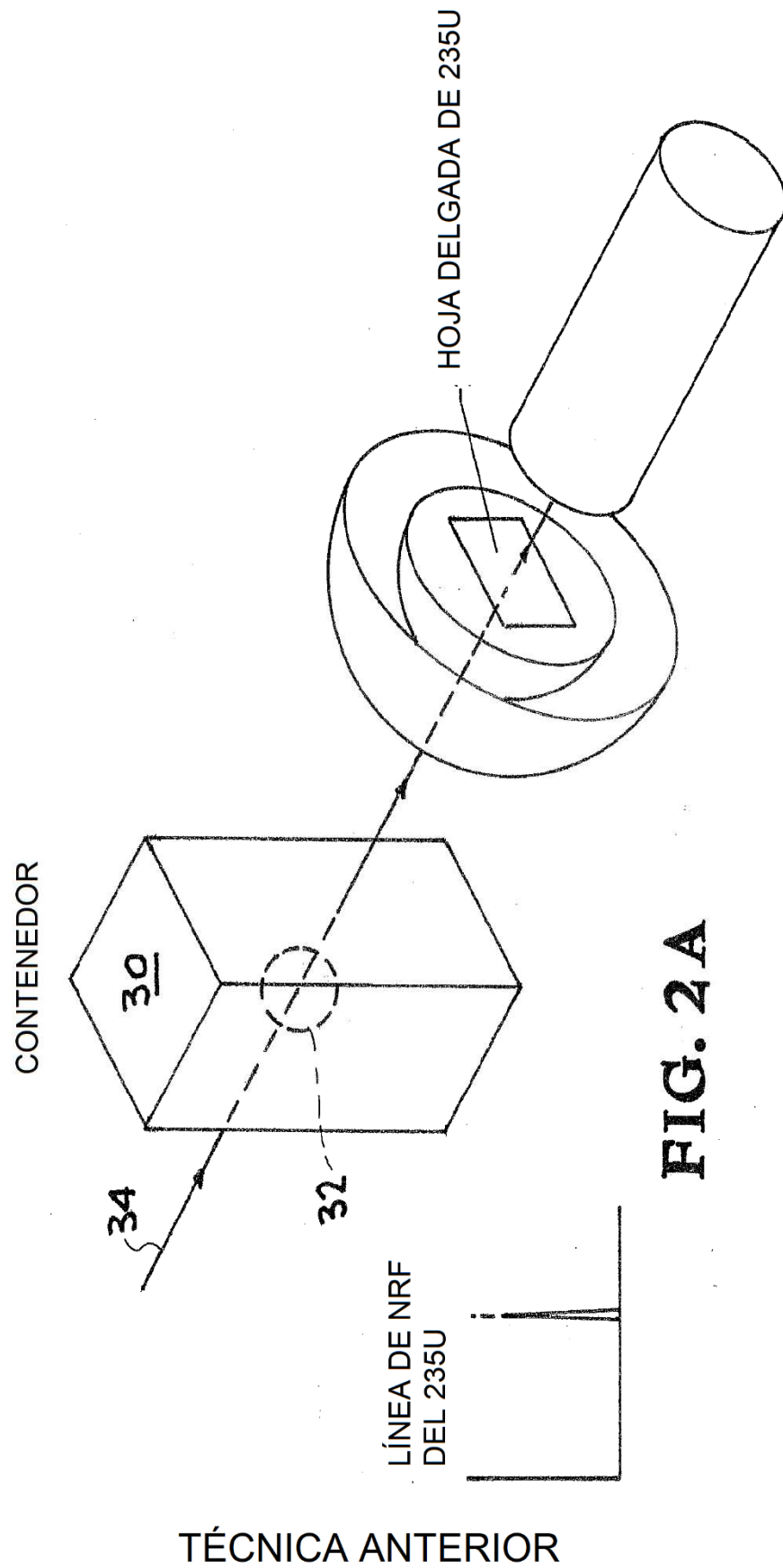


FIG. 1A



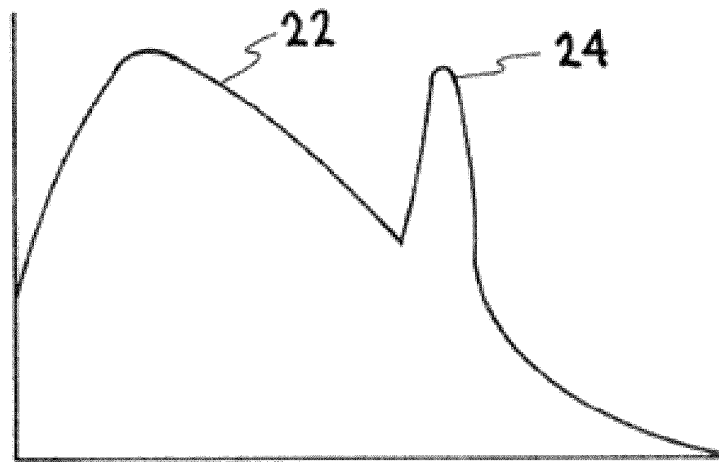


FIG. 1 B

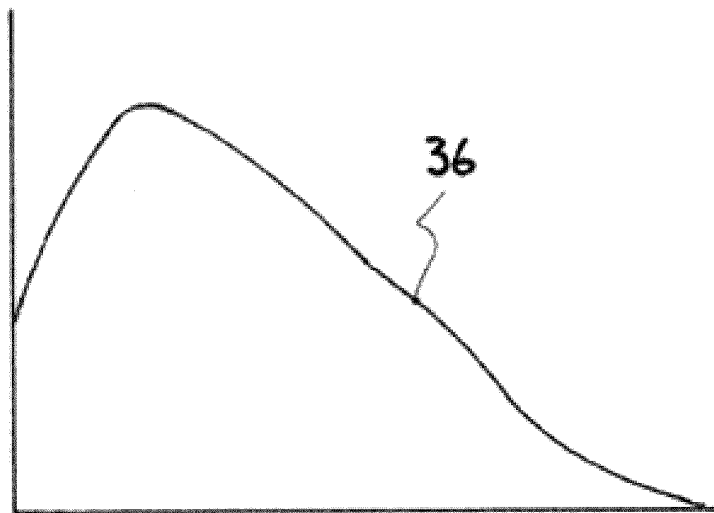
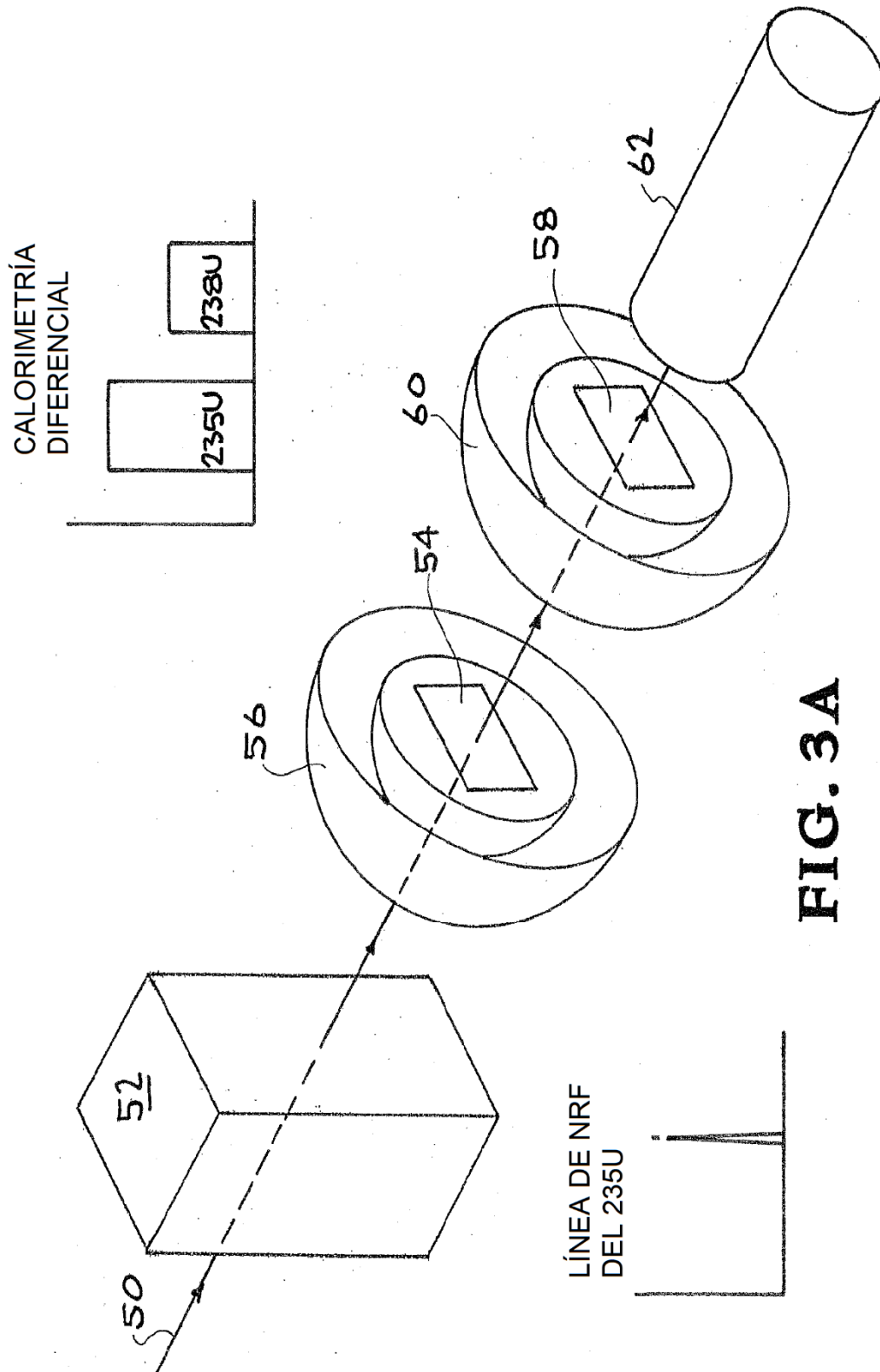


FIG. 2 B

TÉCNICA ANTERIOR



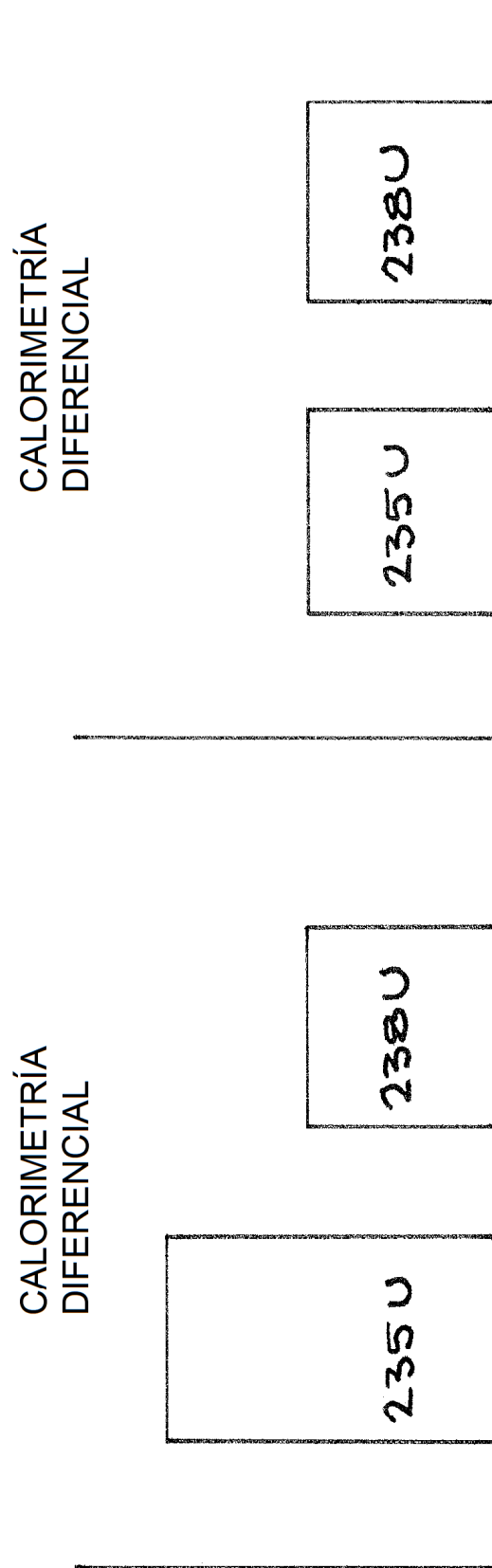


FIG. 3B

FIG. 4B

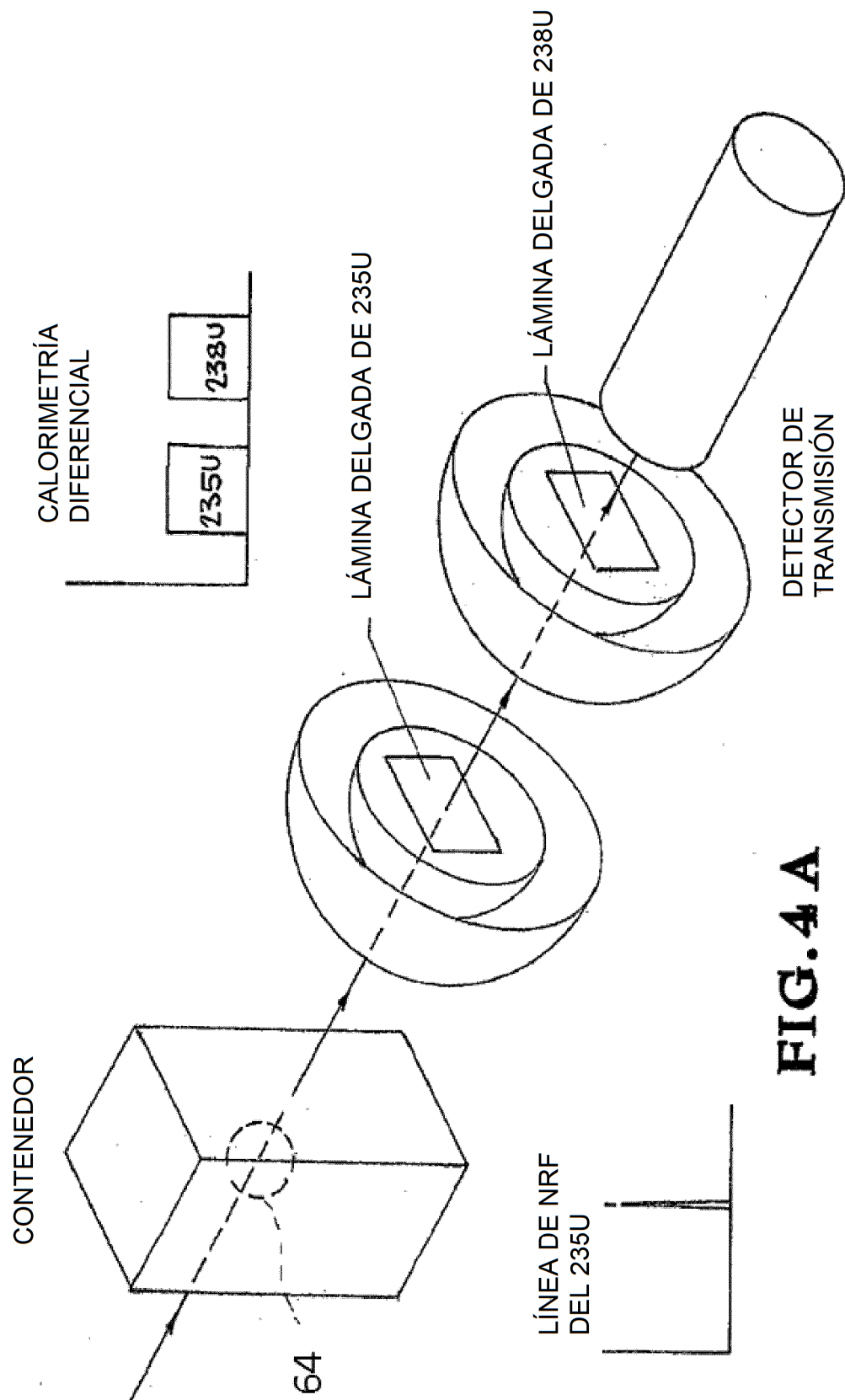


FIG. 4A

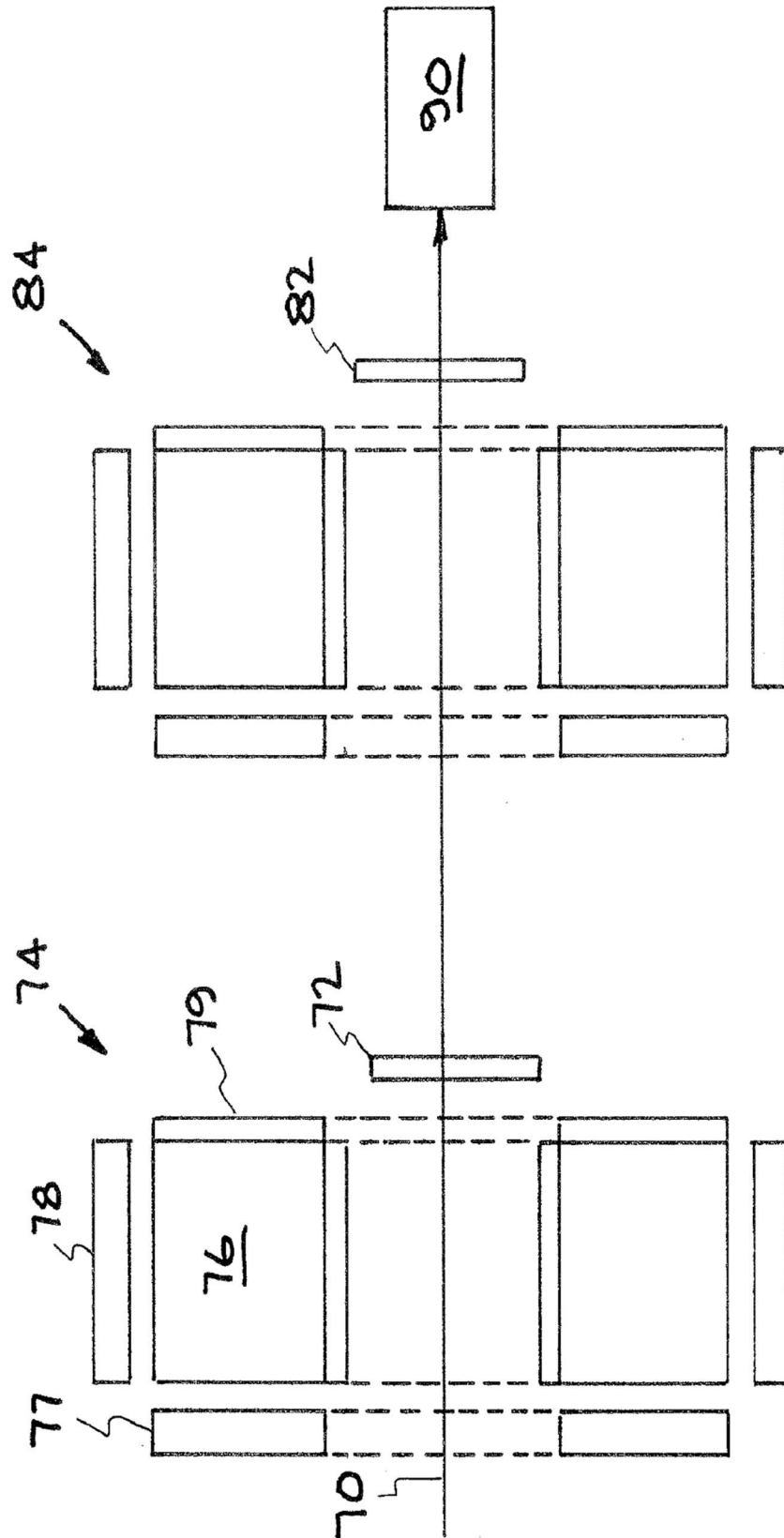


FIG. 5

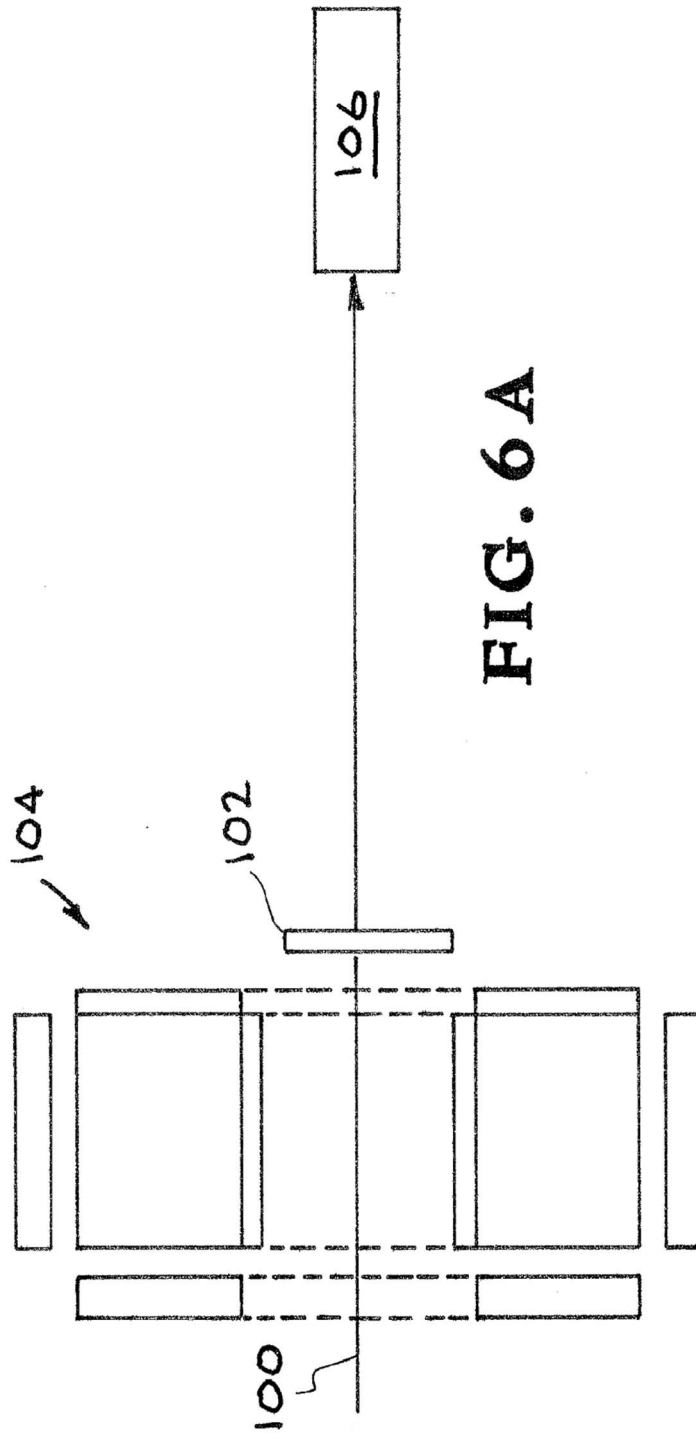


FIG. 6A

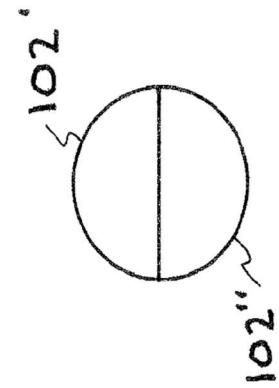


FIG. 6B

