

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 685 971**

51 Int. Cl.:

G01T 1/20 (2006.01)

G01V 5/00 (2006.01)

G01T 3/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.02.2013 PCT/US2013/024585**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.08.2013 WO13122763**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.02.2013 E 13749372 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.07.2018 EP 2825904**

54 Título: **Inspección de rayos X usando detectores de centelleo acoplados mediante fibra con desplazamiento de longitud de onda**

30 Prioridad:

14.02.2012 US 201261598521 P

14.02.2012 US 201261598576 P

06.03.2012 US 201261607066 P

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

15.10.2018

73 Titular/es:

AMERICAN SCIENCE AND ENGINEERING, INC.

(100.0%)

**829 Middlesex Avenue
Billerica, MA 01821, US**

72 Inventor/es:

**ARODZERO, ANATOLI;
CALLERAME, JOSEPH;
DINCA, DAN-CRISTIAN;
SUD, RAJEN;
GRODZINS, LEE;
ROMMEL, MARTIN;
ROTHSCHILD, PETER y
SCHUBERT, JEFFREY**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 685 971 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

Inspección de rayos X usando detectores de centelleo acoplados mediante fibra con desplazamiento de longitud de onda

5 La presente solicitud reivindica prioridad a partir de las solicitudes de patente provisionales estadounidenses, con n.ºs de serie 61/598.521 y 61/598.576, ambas presentadas el 14 de febrero de 2012, y las solicitudes de patente provisionales estadounidenses, con n.º de serie 61/607.066, presentada el 6 de marzo de 2012.

Campo técnico

La presente invención se refiere a un detector de radiación de rayos X.

Técnica anterior

10 A lo largo de los últimos 30 años, se han empleado detectores de centelleo acoplados mediante fibra de radiación y partículas. En algunos casos, el centelleador está pixelado, consistiendo en elementos de centelleador discretos, y en otros casos, se emplean otras estrategias (tal como fibras de acoplamiento cruzadas ortogonalmente) con el fin de proporcionar resolución espacial. Ejemplos de detectores de centelleo acoplados mediante fibra se proporcionan por las patentes estadounidenses n.ºs 6.078.052 (de DiFilippo) y 7.326.9933 (de Katagiri *et al.*). Los detectores
15 descritos en ambas por DiFilippo y Katagiri *et al.* emplean fibras con desplazamiento de longitud de onda (WSF) de manera que puede conducirse luz reemitida por el material de núcleo de la fibra, con baja atenuación, hasta fotodetectores dispuestos en una ubicación conveniente, a menudo distante del propio centelleador. La resolución espacial tiene una importancia particular en aplicaciones tales como generación de imágenes por neutrones. La resolución espacial es también primordial en el Telescopio espacial de gran área de Fermi (anteriormente, GLAST) donde un detector de centelleo segmentado de alta eficiencia emplea lecturas de WSF para la detección de rayos
20 cósmicos de alta energía, tal como se describe en Moiseev, *et al.*, *High efficiency plastic scintillator detector with wavelength-shifting fiber readout for the GLAST Large Area Telescope*, Nucl. Instr. Met. Phys. Res. A, vol. 583, pp. 372-81 (2007).

25 Debido a los contextos en los que se han empleado hasta la fecha detectores de centelleador acoplados mediante fibra, todos los detectores de centelleador acoplados mediante fibra conocidos han contado los pulsos producidos por interacciones individuales de partículas (fotones o partículas masivas) con el centelleador, permitiendo de ese modo que se determine la energía depositada por la partícula incidente basándose en el flujo acumulativo de luz reemitida por el centelleador.

30 Sin embargo, los requisitos de detección de sistemas de inspección por retrodispersión de rayos X son totalmente diferentes de los requisitos abordados por los detectores de centelleo acoplados mediante fibra existentes. Sistemas de inspección de rayos X por retrodispersión se han usado durante más de 25 años para detectar materiales orgánicos ocultos en el interior de equipaje, cargamento de contenedores, en vehículos y en personal. Puesto que materiales orgánicos a granel dispersan preferiblemente rayos X (mediante dispersión Compton) en lugar de absorberlos, estos materiales aparecen como objetos más brillantes en imágenes por retrodispersión. En tanto que
35 los rayos X incidentes se dispersan en todas direcciones, la sensibilidad se antepone notablemente a la resolución espacial como requisito, y en la mayoría de las aplicaciones de dispersión, la resolución espacial de detector no tiene importancia en absoluto, dado que la resolución se rige por el haz incidente en lugar de por detección.

40 Los requisitos de detección especializada de gran área y alta sensibilidad planteados por los sistemas de dispersión de rayos X son particularmente problemáticos en el caso de detectores de centelleo "convencionales" 100 del tipo mostrado en una sección transversal lateral en la figura 1A y en una sección transversal frontal en la figura 1B. Un ejemplo de un detector de este tipo se describe en la patente estadounidense n.º 5.302.817 (de Yokota), y está incorporado en el presente documento como referencia. Normalmente, una caja estanca a la luz 102 está alineada con pantallas de centelleo 103 en las que la radiación de rayos X incidente 101 se convierte en luz de centelleo, normalmente en las partes de UV, visibles o de longitud de onda más larga, del espectro electromagnético (EM). Se
45 acoplan tubos fotomultiplicadores de gran área fotocatódica (PMT) 105 para recibir luz de centelleo por medio de incisiones 108. Un problema recae en que una fracción de la luz de centelleo que se origina dentro de la pantalla se transmite desde la pantalla al interior del volumen cerrado. La luz de centelleo restante se pierde en el material de pantalla. Las pantallas de centelleo 103 están diseñadas para maximizar la fracción de luz emitida, que es equivalente a garantizar un coeficiente de transmisión T elevado para la interfaz entre la pantalla 103 y el medio (normalmente aire) que llena el volumen de detector. Sin embargo, en un detector de retrodispersión convencional del tipo representado en las figuras 1B y 1B, las pantallas de centelleo 103 deben servir también como buenos reflectores puesto que la luz de centelleo, una vez emitida al interior del volumen de la caja 102, normalmente necesita múltiples reflexiones hasta que alcanza un fotodetector 105. De este modo, el coeficiente de reflexión R de la superficie de pantalla debe ser también elevado, sin embargo, dado que la suma de T y R está limitada a formar
50 una unidad, T y R no pueden maximizarse simultáneamente, y debe alcanzarse un compromiso. Como resultado, la eficiencia de recogida de luz del detector de retrodispersión convencional es inherentemente baja, con sólo un pequeño porcentaje de la luz de centelleo generada recogida en los fotodetectores.

Para un detector de generación de imágenes, el ruido estadístico de fotón se calcula en cuanto a los fotones

absorbidos por el detector y se usa para generar la imagen. Cualquier fotón que pase a través del detector sin ser absorbido, o incluso los que se absorban sin generar información de imagen, se desechan y no contribuyen a reducir el ruido en la imagen. Dado que los fotones no pueden subdividirse, representan el nivel cuántico fundamental de un sistema. Es una práctica común calcular el ruido estadístico en cuanto al número más pequeño de cuantos usados para representar la imagen en cualquier lugar a lo largo de la cadena de generación de imagen. El punto a lo largo de la cadena de generación de imagen en el que se usa el menor número de cuantos para representar la imagen se denomina "sumidero cuántico". El nivel de ruido en el sumidero cuántico determina el límite de ruido del sistema de generación de imágenes. Sin aumentar el número de portadores de información (es decir, cuantos) en el sumidero cuántico, el límite de ruido de sistema no puede mejorarse. Una recogida de luz pobre puede crear posiblemente un sumidero cuántico secundario, lo que quiere decir que limitará la fracción de rayos X incidentes que da como resultado la corriente de PMT. Además, aumentará el ruido de imagen. Una eficiencia de recogida ligera puede mejorarse aumentando el área sensible de los fotodetectores, sin embargo, esa trayectoria a la eficiencia resulta costosa.

La estructura de pantalla de centelleo empleada normalmente en detectores de centelleo de rayos X de la técnica anterior se describe ahora con referencia a la figura 2. Una capa de centelleador compuesto 202 se intercala entre una lámina de refuerzo 204 para soporte estructural y una película protectora delgada y transparente 206 hecha de poliéster, por ejemplo. El centelleador compuesto consiste normalmente en microcristales inorgánicos en una matriz orgánica o resina. Los cristales son el material de centelleante real. Fluorocloruro de bario (BaFCl o "BFC") o oxisulfuro de gadolinio (Gd₂O₂S, o "Gadox") dopado con elementos de tierras raras son elecciones comunes para estos. La potencia de detención de la pantalla se determina por el grosor de la capa de centelleador compuesta 202, que se mide normalmente en miligramos de cristal centelleador por área de unidad. Puesto que los centelleadores inorgánicos (tal como BFC o Gadox) sufren de alta autoabsorción, la capa de centelleador compuesta ha de mantenerse bastante fina con el fin de extraer una buena fracción de la luz de centelleo. Esto limita la potencia de detección útil de la pantalla y la hace adecuada sólo para la detección de rayos X con energías de hasta aproximadamente 100 keV.

Por tanto, sería ventajoso tener un detector de centelleo para aplicaciones de detección de dispersión de rayos X que proporcione una extracción, recogida y detección de luz de centelleo más eficientes.

Tal como se comentó brevemente al principio, hace tiempo que se emplean fibras con desplazamiento de longitud de onda (WSF) para la detección de centelleo. Fibras con desplazamiento de longitud de onda consisten en un núcleo con índice de refracción relativamente alto, rodeado por una o más capas de revestimiento de índice de refracción más bajo. El núcleo contiene material desplazamiento de longitud de onda, también denominado tinte. Luz de centelleo que entra en la fibra se absorbe por el tinte que, a su vez, emite luz con una longitud de onda más larga. La luz de longitud de onda más larga se emite de manera isotrópica en la fibra material. La reflexión interna total atrapa una fracción de esa luz y la conduce por distancias largas con una pérdida relativamente baja. Esto es posible, tal como se describe con referencia a la figura 3, puesto que los intervalos de longitud de onda de absorción 304 y emisión 302 del tinte efectivamente no se superponen de manera que la luz con longitud de onda desplazada no se reabsorbe. La fracción capturada se determina por la relación de los índices de refracción en superficies de la fibra. Una ventaja adicional de la WSF es que el desplazamiento de longitud de onda puede llevar la luz de centelleo 306 al intervalo de longitud de onda sensible del fotodetector (PMT, fotomultiplicador de silicio (SiPM), o contador de fotones multipíxel (MPPC), u otro).

Las estructuras de centelleador se han producido usando muchas tecnologías de fabricación, que incluyen, por ejemplo, fundición a presión, moldeado por inyección (tal como se describe por Yoshimura *et al.*, *Plastic scintillator produced by the injection-molding technique*, Nucl. Instr. Met. Phys. Res. A, vol. 406, pp. 435-41 (1998), y por extrusión (tal como se describe en la patente estadounidense n.º 7.067.079, de Bross *et al.*). El documento US 2011/0079726 da a conocer la técnica anterior.

Sumario de las realizaciones de la invención

Según diversas realizaciones de la presente invención, se proporciona un detector de radiación de rayos X que aplica detectores de centelleo acoplados mediante fibra a problemas en inspección de rayos X de transmisión y retrodispersión.

Por conveniencia de anotación, un detector de centelleo acoplado mediante fibra con desplazamiento de longitud de onda puede referirse en el presente documento a un detector "Sc-WSF". Según un aspecto de la invención, se proporciona un detector de radiación de rayos X tal como se establece en la reivindicación 1.

Se proporciona un detector de radiación penetrante que tiene un volumen no pixelado de medio de centelleo para convertir energía de incidente radiación penetrante en luz de centelleo. El detector tiene guías de ondas ópticas múltiples, alineadas sustancialmente en paralelo entre sí en una región de extracción de luz de centelleo que es contigua al volumen no pixelado del medio de centelleo. Las guías de ondas ópticas guían luz derivada desde la luz de centelleo hasta un fotodetector para detectar fotones guiados por las guías de ondas y para generar una señal de detector.

En realizaciones de la presente invención, el detector puede tener también un circuito integrador para integrar la señal de detector en una duración de tiempo especificada.

5 En una realización alternativa de la invención, se proporciona un detector de radiación penetrante que tiene un volumen de medio de centelleo para convertir energía de incidente radiación penetrante en luz de centelleo y una pluralidad de guías de ondas ópticas, alineadas sustancialmente en paralelo entre sí en una región de extracción de luz de centelleo contigua al volumen del medio de centelleo. Las guías de ondas ópticas guían luz derivada desde la luz de centelleo hasta un fotodetector que genera una señal de detector. Finalmente, un circuito integrador para integrar la señal de detector en una duración de tiempo especificada.

10 Según la invención, las guías de ondas ópticas en los detectores anteriores son fibras con desplazamiento de longitud de onda óptica. El medio de centelleo puede incluir un haluro mixto de bario dopado con lantánido tal como fluorocloruro de bario. El fotodetector puede incluir un fotomultiplicador.

15 En más realizaciones adicionales de la invención, el cuadrado del grosor de cualquiera de los detectores anteriores, dividido por el área del detector, puede ser menor de 0,001. Al menos una de la pluralidad de guías de ondas pueden carecer de revestimiento y el medio de centelleo puede caracterizarse por un índice de refracción de valor inferior a un índice de refracción que caracteriza la guía de ondas. Las guías de ondas ópticas pueden disponerse en múltiples planos paralelos, conteniendo cada uno de los planos paralelos un subconjunto de la pluralidad de guías de ondas ópticas.

20 Según la invención, el detector puede tener una pluralidad de capas de medio de centelleador que un haz incidente puede encontrar sucesivamente, y las capas se caracterizan por sensibilidades espectrales distintas al haz incidente. Capas alternas de centelleador pueden incluir $\text{Li}^6\text{F}:\text{ZnS}(\text{Ag})$ que se alternan con al menos uno de $\text{BaFCl}(\text{Eu})$ acoplado mediante fibra y $\text{BaFI}(\text{Eu})$ acoplado mediante fibra. Una primera de la pluralidad de capas de medio de centelleador puede ser un detector de desplazamiento de longitud de onda acoplado mediante fibra preferiblemente sensible a rayos X de baja energía, y una última de la pluralidad de capas de medio de centelleador puede ser un centelleador plástico.

25 Pueden disponerse segmentos de medio de centelleador en un plano transversal a una dirección de propagación de un haz incidente, y pueden acoplarse perfectamente a fotodetectores por medio de fibras ópticas.

Según un ejemplo no cubierto por la presente invención, un método para fabricar un detector de centelleo, comprendiendo el método extruyendo una cubierta de material centelleante alrededor de una guía de ondas óptica, y, en una realización particular, la guía de ondas óptica es una fibra óptica con desplazamiento de longitud de onda.

30 En otro ejemplo no cubierto por la invención actual, un método para detectar una radiación de rayos X dispersada tiene las etapas de

- a. proporcionar un detector caracterizado por una pluralidad de segmentos leídos individualmente; y
- b. sumar una señal de un subconjunto de los segmentos leídos individualmente,

en el que el subconjunto se selecciona en base a una señal relativa sobre el ruido.

35 En otro ejemplo no cubierto por la invención, se proporciona un método para detectar una radiación de rayos X dispersada. El método tiene las etapas de

- a. proporcionar un detector caracterizado por una pluralidad de segmentos leídos individualmente; y
- b. sumar una señal de un subconjunto de los segmentos leídos individualmente,

en el que el subconjunto se selecciona en base a una posición conocida de un haz iluminador primario.

40 Se proporciona un sistema de rayos X de inspección móvil pero no está cubierto por la invención actual. El sistema de inspección tiene una fuente de radiación de rayos X dispuesta sobre un transportador que tiene una plataforma y elementos en contacto con el suelo, y un detector de centelleo acoplado mediante fibra desplegado fuera del transportador durante la operación de inspección para detectar rayos X que han interactuado con el objeto inspeccionado.

45 El sistema de rayos X de inspección móvil puede tener también un detector de tipo toldo de centelleo acoplado mediante fibra desplegado sobre el objeto inspeccionado durante el transcurso de una inspección, y el detector de tipo toldo puede deslizarse hacia fuera desde un tejado del transportador antes de la operación de inspección. También puede ser un detector de tipo faldón desplegado por debajo de la plataforma del transportador, y un detector de tejado para la detección de espacios más altos que el transportador, así como segmentos de detector de centelleador acoplados mediante fibra sustancialmente horizontales y sustancialmente verticales. Los segmentos de detector de centelleador acoplados mediante fibra sustancialmente horizontales y sustancialmente verticales pueden estar formados en una estructura integrada.

50

Según otro ejemplo no cubierto por la presente invención, se proporciona un aparato para detectar radiación incidente sobre el aparato, comprendiendo el aparato:

- a. una pluralidad de hojas de colimación activas sustancialmente paralelas que comprende detectores de centelleo acoplados mediante fibra de longitud de onda desplazada sensible a la radiación para generar al menos una primera señal de detección;
- b. un detector de área amplia posterior para detectar la radiación que pasa entre las hojas de colimación activas sustancialmente paralelas de la pluralidad de hojas de colimador activas y generar una segunda señal de detección; y
- c. un procesador para recibir y procesar las señales de detección primera y segunda.

Según otro ejemplo no cubierto por la invención, se proporciona un sistema de inspección de generación de imágenes de arriba a abajo para inspeccionar un objeto dispuesto en una superficie subyacente. El sistema de inspección de generación de imágenes de arriba a abajo tiene una fuente de rayos X que apuntan sustancialmente hacia abajo y un grupo de detector lineal dispuesto dentro de un saliente por encima de la superficie subyacente. El grupo de detector lineal puede incluir detectores de centelleo acoplados mediante fibra de longitud de onda desplazada.

Según otro ejemplo no cubierto por la invención, se proporciona un sistema de inspección de rayos X para inspeccionar los bajos de un vehículo. El sistema de inspección de rayos X tiene una fuente de rayos X que apuntan sustancialmente hacia arriba acoplada a un bastidor y un detector de centelleador acoplado mediante fibra con desplazamiento de longitud de onda dispuesto en el bastidor para detectar rayos X dispersados por el vehículo y por objetos ocultos bajo o dentro del vehículo. El bastidor puede estar adaptado para maniobrarse por debajo del vehículo por al menos uno de control manual y a motor.

Breve descripción de las figuras

Las características anteriores de la invención se entenderán de manera más inmediata por referencia a la siguiente descripción detallada, que se hace en referencia a las figuras adjuntas, en las que:

las figuras 1A y 1B muestran vistas en sección transversal frontal y lateral, respectivamente, de un detector de centelleo "de tipo caja" de la técnica anterior.

La figura 2 es una vista esquemática de una pantalla de centelleador de la técnica anterior.

La figura 3 representa relaciones espectrales entre la luz de centelleo y espectro de emisión y absorción mediante fibra con desplazamiento de longitud de onda típico.

La figura 4 es una vista en perspectiva esquemática de un grupo de fibras con desplazamiento de longitud de onda intercaladas entre material de centelleador, según una realización de la presente invención.

La figura 5 es una vista esquemática en sección transversal de un grupo de fibras con desplazamiento de longitud de onda embebido dentro de una matriz de material de centelleador, según una realización de la presente invención.

La figura 6A es una vista en perspectiva de un centelleador cilíndrico extruido alrededor de una WSF.

La figura 6B es una representación esquemática de un sistema para extruir un centelleador cilíndrico alrededor de una WSF.

La figura 6C es una vista en sección transversal de un extrusor para coextruir un centelleador cilíndrico con una WSF.

La figura 7 es una sección transversal esquemática de un detector de centelleo con múltiples filas de WSF.

La figura 8 es una vista desde arriba de un detector de centelleo acoplado mediante fibra con desplazamiento de longitud de onda según una realización de la presente invención.

La figura 9 muestra detectores por retrodispersión de tipo tejado y faldón, almacenados, mientras la figura 10 muestra los mismos detectores desplegados durante el transcurso de operaciones de inspección.

La figura 11 muestra un detector de tipo toldo y un detector de tipo faldón para su uso con un sistema de inspección de retrodispersión.

La figura 12 es una vista esquemática en sección transversal de un apilamiento de capas de centelleador para su uso como detector de transmisión de rayos X de alta energía.

Las figuras 13A y 13B muestran un detector de transmisión en capas dentro de un badén de control de velocidad de 2 pulgadas de alto, mientras que la figura 13C muestra una sección transversal del conjunto de detector insertado en

el almacén de badén de control de velocidad.

5 La figura 14A muestra una vista en perspectiva de un detector de transmisión de rayos X segmentado para la medición de la distribución de intensidad detectada a través de la anchura de un haz de rayos X, mientras que las figuras 14B y 14C muestran una sección transversal de terminación y un perfil de haz típico del detector de la figura 14A.

La figura 15 es una vista en sección transversal de un detector de centelleo con resolución de múltiples energías.

La figura 16 muestra un detector de centelleo de múltiples capas para la detección tanto de rayos X como de neutrones térmicos.

La figura 17 muestra una vista en perspectiva de un detector con colimadores activos.

10 Las figuras 18A y 18B muestran vistas en sección transversal y en perspectiva de un detector de WSF usado como un colimador activo y las figuras 18C y 18D muestran una disposición con lecturas independientes separadas por una absorbedor de rayos X estanco a la luz para distinguir la radiación que golpea cada cara.

Las figuras 19A y 19B muestra múltiples detectores que se despliegan en un escáner manual, en estados almacenados y desplegados, respectivamente.

15 Las figuras 20A y 20B muestran una unidad de retrodispersión que, en virtud de los detectores Sc-WSF, puede deslizarse bajo un vehículo para inspeccionar el chasis por debajo.

Las figuras 21A y 21B representan el uso de una combinación en ángulo recto de detectores basándose en tecnología Sc-WSF junto con un sistema de inspección móvil.

Descripción detallada de las realizaciones de la invención

20 Según la presente invención, el acoplamiento óptico de material de centelleador a fibras con desplazamiento de longitud de onda, posibilita ventajosamente objetivos que incluyen aquellos que son propios de las demandas de detección de dispersión de rayos X.

Definiciones:

25 El término "imagen" se referirá a cualquier representación unidimensional o multidimensional, ya sea en forma tangible u otra forma perceptible, o bien, mediante lo cual un valor de alguna característica (tal como intensidad transmitida fraccional a través de una columna de un objeto inspeccionado atravesado por un haz incidente, en el caso de generación de imagen por transmisión de rayos X) está asociado con cada una de una pluralidad de ubicaciones (o, vectores en un espacio Euclídeo, normalmente \mathbb{R}^2) correspondiente a coordenadas dimensionales de un objeto en un espacio físico, no necesariamente mapeadas una a una en el mismo. Una imagen puede comprender un grupo de números en una memoria informática o medio holográfico. De manera similar, "generación de imágenes" se refiere a la representación de una característica física determinada en cuanto a una o más imágenes.

30 Términos de relación espacial, tales como "por encima", "por debajo", "superior", "inferior" y similares, pueden usarse en el presente documento para facilitar la descripción para describir la relación de un elemento con otro tal como se muestra en las figuras. Se entenderá que tales términos de relación espacial pretenden abarcar diferentes orientaciones del aparato en uso o en funcionamiento además de la orientación descrita y/o representada en las figuras.

35 Cuando un elemento se describe como que está "sobre", "conectado a" o "acoplado a" otro elemento, puede estar directamente sobre, conectado o acoplado al otro elemento, o, alternativamente, pueden estar presentes uno o más elementos intervinientes, a menos que se especifique lo contrario.

La terminología usada en el presente documento tiene el propósito de describir realizaciones particulares y no pretende ser limitativa. Las formas singulares "un", "una" y "el/la" pretenden incluir las formas plurales también.

Detectores de WSF

45 En referencia, primero, a la figura 4, en una realización de la invención, una capa de fibras con desplazamiento de longitud de onda paralelas apenas separadas 400 se intercala entre dos capas 403 de pantalla de centelleo compuesta. El material de centelleador preferido es fluorocloruro de bario dopado con europio (BaFCl:Eu), aunque otros centelleadores, tales como BaF1:Eu, u otros haluros mixtos de bario dopado con lantánido (que incluyen, un modo de ejemplo adicional, BaBr1:Eu y BaCsi:Eu), pueden usarse dentro del alcance de la presente invención. Dado que materiales de centelleador empleados para detección de rayos X exhiben normalmente una autoabsorción muy fuerte de fotones de centelleo, realizaciones según la presente invención ventajosamente permiten emplear de manera inusual grandes volúmenes de centelleador 403 al tiempo que se acoplan de manera eficiente señales de centelleo.

Una ventaja de usar pantalla de centelleo compuesta en la presente aplicación es que permite para fabricación por extrusión de un detector de centelleo acoplado mediante fibra.

El centelleador compuesto 403 se soporta estructuralmente por capas exteriores 404 de plástico u otro material, que proporcionan soporte mecánico. El contacto óptico entre el revestimiento de fibra 401 y el centelleador compuesto 403 se establece llenando los vacíos con material de índice coincidente 405 de índice de refracción adecuado que es transparente a la luz de centelleo. El índice de refracción del material de llenado se elige para optimizar la recogida de fotones de luz primarios al interior de la WSF y la captura de fotones con longitud de onda desplazada en la fibra. El material de llenado 405 puede ser grasa óptica o epóxido óptico, por ejemplo, aunque cualquier material está dentro del alcance de la presente invención.

Tras la incidencia de fotones de rayos X, la luz de centelleo emitida por el centelleador 403 se acopla por medio del revestimiento 401 al interior del núcleo 407 de las fibras respectivas, con frecuencia reducida (es decir, desplazada al rojo) y propagada a uno o más fotodetectores 805 (mostrados en la figura 8, por ejemplo). La luz de los núcleos de fibra 407 se convierte en una corriente por medio del fotodetector 805, y la corriente se integra durante un intervalo de tiempo, normalmente en el intervalo de 1-12 μ s, para obtener la potencia de señal para cada píxel. La integración de la señal de detector puede realizarse por un circuito integrador (no mostrado), tal como un preamplificador de integración, por ejemplo.

En referencia ahora a la figura 5, fibras con desplazamiento de longitud de onda 400 están embebidas en la matriz de la pantalla de centelleo 503. Embeber la WSF en el medio de centelleo crea el mejor contacto óptico.

En todavía otra realización de la invención, descrita ahora con referencia a la figura 6A, el material de centelleador compuesto 603 se aplica como un revestimiento o cubierta alrededor de una WSF 601 con un núcleo 602. Esta aplicación se presta a un proceso de fabricación mediante extrusión y permite hacer el uso más eficaz de material de centelleador 603 costoso. El material de centelleador 603 se sella con una capa protectora 604 que actúa también como un reflector para la luz de centelleo. Dentro del alcance de la presente invención, el revestimiento puede omitirse cuando el centelleador tiene un índice de refracción más bajo que la fibra y la unión de la fibra de centelleador tiene la suavidad y robustez necesarias.

Un fibra óptica de polímero con desplazamiento de longitud de onda puede fabricarse, tal como se describe ahora con referencia al sistema esquemático representado en la figura 6B. Fuentes de polímero fundido de WSF 606, polímero fundido de revestimiento de bajo índice de refracción 608 y polímero fundido transparente ópticamente embebido en fósforo 610, todas bajo presión, se alimentan al interior de un troquel de coextrusión 612 dentro de una zona de extrusión 614, y se coextrusionan. Se pulveriza gas seco 611, tal como nitrógeno o aire seco, por ejemplo, sobre la fibra extruida para enfriar. Se alimenta bajo presión el polímero fundido con un pigmento reflector de la luz (tal como TiO_2 , por ejemplo) 616 al interior de un troquel de extrusión 618 para obtener una camisa reflectora de luz en la WSF recubierta de centelleador 613. La WSF cargada de centelleador 620 resultante se enrolla para su almacenamiento mediante una devanadora 622. La figura 6C muestra una vista en sección transversal de un sistema de coextrusión, para usar según las realizaciones de la presente invención, para la fabricación de WSF revestida de centelleador. El polímero fundido de WSF 606 se inyecta, junto con el polímero fundido de revestimiento de bajo índice de refracción 608 y el polímero fundido transparente ópticamente embebido en fósforo 610, en troquel de coextrusión 612. Polímero fundido con un pigmento reflector de la luz 616 se alimenta bajo presión al interior del troquel de extrusión 618. La fibra completada tiene un núcleo de WSF 602, un revestimiento de índice bajo 601, un revestimiento cargado de centelleador 603 y un recubrimiento reflector 604.

Para todas las realizaciones de un detector de centelleo según la presente invención, es ventajoso que el grosor del material de centelleador se optimice para la energía de la radiación que va a detectarse. El diseño debe garantizar una recogida de luz suficiente para evitar un sumidero cuántico secundario. En particular, realizaciones de la invención descritas en el presente documento proporcionan detectores extraordinariamente finos con respecto a su área.

Definiciones:

Para propósitos de la presente descripción, y en cualquiera de las reivindicaciones dependientes, el término "grosor", tal como se aplica a un detector de centelleo, representará la extensión media del detector en una dimensión a lo largo de, o paralela a, un centroide del campo visual del detector. El término área, tal como se aplica a un detector, o, de manera equivalente, el término "área activa" se referirá al tamaño del detector medido en un plano transversal al centroide de todos los vectores de propagación de radiación dentro del campo visual del detector.

Las realizaciones de la presente invención, incluso aquellas con hasta 8 capas de WSF, tienen relaciones del cuadrado de espesor de detector con respecto al área de detector activa que son menores de 0,001. Por ejemplo, un detector de 8 capas con un área de 48" x 12" tiene un grosor no mayor de 0,5", de manera que la relación del cuadrado del grosor con respecto al área de detector es de 0,0005. Esta relación del cuadrado de grosor con respecto al área es normalmente de un orden de magnitud, o más, más pequeño que la relación comparable para los detectores por retrodispersión en la que se detecta directamente la luz de centelleador mediante un fotodetector.

Según una realización adicional de la invención representada en la figura 7, la potencia de detección útil del detector

puede aumentarse combinando múltiples capas 701, 702 de WSF 400 (u otras guías de ondas ópticas que aumentan de ese modo la profundidad de material de centelleador 403 a lo largo de la trayectoria de la radiación incidente.

5 Una realización de un detector de centelleador de longitud de onda desplazada según la presente invención se muestra en la figura 8. Las fibras con desplazamiento de longitud de onda 801 están embebidas dentro del material de centelleador 803, acoplando luz y reduciendo su frecuencia para la detección mediante tubos fotomultiplicadores 805.

10 Según diversas de las realizaciones descritas hasta ahora, los extremos de la WSF están reunidos en haces y acoplados ópticamente a al menos un fotodetector. Ejemplos de fotodetectores adecuados incluyen PMT y fotomultiplicadores de silicio (SiPM).

15 Las ventajas del detector, la invención del cual se describe en el presente documento, incluyen la eficiencia de detección y el bajo perfil geométrico de implementación. Esto permite una mayor libertad en el diseño de un sistema de detección y hace posible aplicaciones con restricciones espaciales totalmente nuevas. La flexibilidad mecánica de la estructura de detector permite dar forma a la superficie de detector para adaptarse a la aplicación, tal como una implementación en la que un objeto del que se genera una imagen está rodeado por el volumen de detector. El perfil bajo también facilita relativamente la orientación y la protección del área de detector para minimizar la detección de radiación dispersada indeseada (diafonía) de un sistema de generación de imágenes por rayos X cercano.

20 La extracción de luz de centelleo en una región grande de centelleador posibilita detectores con una gran relación de aspecto de anchura con respecto a profundidad. En particular, detectores que delimitan ángulos espaciales de 0,1 sr, o más, se facilitan por realizaciones de la presente invención.

25 En un sistema de generación de imágenes por retrodispersión de rayos X típico, un haz estrecho de rayos X escanea un objetivo del que se han generado imágenes en un movimiento lineal, al tiempo que detectores de radiación alargados están dispuestos en ambos lados de una abertura de salida de una fuente de rayos X. A medida que se mueve el haz estrecho, el área de detector más cercana al haz recibirá normalmente la señal más fuerte y área de detector más alejada del haz una señal menor. Si el área de detector se segmenta en secciones legibles individualmente la relación de señal con respecto a ruido del sistema de detección puede mejorarse leyendo sólo los segmentos con una buena relación de señal con respecto a ruido y descartando los segmentos que contribuirán de manera predominante con ruido a la señal sumada. La selección de contribución con segmentos de detector puede hacerse basándose en la señal detectada realmente o basándose en la posición conocida del haz estrecho.

30 *Ventajas de la fabricación de centelleadores mediante extrusión*

35 La extrusión, o proceso de "recubrimiento automático", descrito anteriormente con referencia a las figuras 6A-6C, contrasta notablemente con métodos típicos para depositar material de centelleo policristalino, tal como BaFCl(Eu), sobre una trasera plana. El método de extrusión para fabricar fibras individuales con desplazamiento de longitud de onda recubiertas con un grosor uniforme de centelleador, tal como se enseñó anteriormente, produce fibras que pueden contornearse de manera que las restricciones en la forma de un detector Sc-WSF estén regidas principalmente por el requisito de una captura completa en la fibra mediante reflexión total interna. El concepto de fibras de acoplamiento recubiertas uniformemente proporciona mayor libertad al diseño de detectores de retrodispersión (BX) detectores, especialmente detectores manuales y montados en robots, donde el espacio es escaso.

40 *Detectores desplegables para aumentar la eficacia geométrica de rayos X dispersados*

45 Algunos sistemas de rayos X móviles, tales como aquellos descritos, por ejemplo, en las patentes estadounidenses n.º. 5.764.683, de Swift *et al.* y n.º 7.099.434, Chalmers *et al.* usan el método of retrodispersión de rayos X (BX) para inspeccionar coches y camiones desde un lado. El primero usa detectores desplegados fuera de un transportador durante el funcionamiento, mientras que el segundo usa un área de detector totalmente contenida dentro de un cerramiento, concretamente la cubierta de un transportador. Ambos usan detectores de zona amplia para maximizar la eficacia de detección de los rayos X dispersados. La cobertura de detector de retrodispersión de zona en el caso de un producto según las enseñanzas de la patente 434 de Chalmers cubre aproximadamente 20 pies cuadrados de la superficie interior de un cerramiento que está enfrentado al objetivo. Esta área de detector cubierta tiene una eficacia geométrica relativamente pobre para recoger la radiación dispersada desde objetivos altos o bajos. El perfil geométrico intrínsecamente profundo de tales detectores, necesario para la captura directa de la luz de centelleo por fotomultiplicadores, es un impedimento para el despliegue fuera del furgón.

50 *Definiciones:* tal como se usa en el presente documento, y en cualquier reivindicación adjunta, el término "detector para zonas amplias" se referirá a cualquier detector único, o a cualquier módulo de detector, que subtienda un ángulo de apertura de al menos 30° en cada una de las dos direcciones transversales ortogonales tal como se ven desde un punto en un objeto sometido a inspección, de manera equivalente, caracterizado por un ángulo espacial de al menos n esterorradianes.

Un "transportador" será cualquier dispositivo caracterizado por una plataforma soportada sobre elementos que

hacen contacto con el suelo tales como ruedas, raíles, peldaños, patines, etc., usados para transportar equipos desde una ubicación hasta otra.

Un detector de Sc-WSF, según realizaciones de la presente invención, hace práctico el almacenamiento sin obstrucción de detectores para zonas amplias que pueden desplegarse rápidamente fuera del furgón en posiciones que acrecientan sustancialmente la eficacia de detección.

Haciendo ahora referencia a la figura 9, se muestra un detector de Sc-WSF de tipo toldo para zonas amplias 1101 en una posición recogida, almacenada en el techo de un furgón de inspección de retrodispersión 1103, y se muestra un detector delgado de faldón 1105 en una posición recogida por encima de una rueda del furgón de inspección de retrodispersión. En la figura 10, tanto el detector de techo como el de faldón se muestran desplegados para aumentar el ángulo sólido para detectar objetivos más altos y más bajos, respectivamente; el detector de toldo se despliega por encima de un objeto inspeccionado durante el transcurso de la inspección, mientras que el detector de faldón se despliega, al menos en parte, por debajo de la plataforma del transportador. En otra realización de la invención, descrita con referencia a la figura 11, puede desplegarse un detector de toldo 1301 para objetivos bajos cercanos, tales como para la detección de contrabando en el maletero o lado más alejado de un coche 1303. El detector de toldo 1301 puede deslizarse hacia fuera desde un techo del transportador antes de la operación de inspección. La figura 11 muestra también el despliegue de Detectores de faldón Sc-WSF 1105 usados para examinar eficazmente los neumáticos, pasos de rueda, y el interior de vehículos cercanos.

Detectores de energía doble y múltiple para la detección de transmisión de haces estrechos de rayos X de escaneo

Los haces estrechos de escaneo de rayos X no solo revelan objetos interiores analizando la radiación retrodispersada sino que, en algunas aplicaciones, pueden obtener información adicional mediante el análisis simultáneo de radiación de transmisión (TX) y dispersada hacia delante (FX) radiación. No es necesario que los detectores de TX y FX estén segmentados dado que la zona de sección transversal del haz estrecho, junto con el tiempo de integración de la señal define el tamaño de píxel. Además, solamente es necesario que los detectores de TX y FX sean detectores de energía total dado que, en la mayoría de aplicaciones, el flujo de los rayos X de TX o FX es demasiado alto para contar impulsos. Las pantallas de centelleo son los detectores tradicionales para tales aplicaciones de haz de escaneo. Los detectores Sc-WSF extienden sustancialmente el intervalo de aplicaciones de los detectores de centelleo de TX y FX actuales, como dejan claro los siguientes ejemplos.

TX para haces de rayos X de hasta al menos 250 keV

La eficacia de absorción de las pantallas de centelleo tradicionales, fabricadas, por ejemplo, of BaFCl(Eu) o Gadox, baja por debajo de 50% para energías de rayos X por encima de ~80 keV. El punto del 50% para dos capas es de aproximadamente 100 keV. Para hacerlo distinguible, el detector de Sc-WSF puede fabricarse con más de dos capas de centelleadores sin aumentar sustancialmente el perfil del detector. Un detector Sc-WSF económico, con 4 capas, puede usarse para TX con haces de escaneo de rayos X generados por un tubo de rayos X de 140 keV estándar. Un detector de múltiples capas tal como el detector de 9 capas, tal como se muestra en la figura 12, y ahí designado generalmente por el número de referencia 1400, puede ser altamente eficaz para rayos X detectores 1402 emitidos por un tubo de rayos X de 225 keV estándar (no mostrado), tal como el que se usa en la inspección de rayos X de vehículos a través de portales. Se muestran capas 1404 de material de centelleador, y fibras de WSF 1406 acopladas a fotodetectores 1408.

Detector TX transportable para un dispositivo de obtención de imágenes arriba-abajo en inspección de portales de tres lados

El perfil delgado del detector de transmisión (TX) de múltiples capas hace práctico un detector de transmisión (TX) sobre carretera. Las figuras 13A y 13B muestran tal detector en el interior de un badén de control de velocidad 1131 de 2 pulgadas de alto lo suficientemente fuerte como para soportar un remolque de tractor completamente cargado, y que no requiere ninguna excavación del suelo para su despliegue. La fuente 1132 de radiación penetrante emite un haz en abanico 1134 que incide sobre un conjunto de detector lineal 1135 dentro del armazón 1136 del badén de control de velocidad 1131 o un saliente similar por encima de una superficie subyacente. El conjunto de detector 1135 incluye segmentos de material de centelleador 1137 separados por hojas 1138 de número atómico alto. Tal como se describió anteriormente, por ejemplo con referencia a la figura 4, se acopla luz de centelleo a fotodetectores por medio de fibras ópticas con desplazamiento de longitud de onda 1139.

Detector TX segmentado para determinar el perfil de intensidad de haz de escaneo

Haciendo ahora referencia a las figuras 14A y 14B, un detector de transmisión detectado, designado generalmente por el número de referencia 1141, se muestra para medir un perfil de intensidad de haz de escaneo de rayos X incidentes 1143. La alineación del detector de Sc-WSF 1141 (usado en la transmisión) con el plano de un haz estrecho de escaneo presenta un obstáculo significativo cuando el detector TX se despliega para un sistema de seguridad móvil. La figura 14B muestra a sección transversal de un detector de Sc-WSF vertical 1141 (denominado por otra parte en el presente documento, cuando sea apropiado, "detector de transmisión" o "detector TX") con lectura independiente de las fibras 1145 de los WSF, proporciona los medios para medir simultáneamente tanto la intensidad transmitida de cada píxel y la distribución lineal a través de la anchura de haz para determinar su posición

centroide. Se encaminan fibras 1145 en manojos 1147 a fotodetectores 1149 individuales tales como PMT. Puede extenderse la distribución de la intensidad para obtener la intensidad de dispersión hacia delante, que contiene información útil acerca del material de dispersión, y proporciona una medida de la radiación dispersada hacia dentro que se cuenta como intensidad de transmisión.

- 5 La posición relativa del plano de detector y el plano de rayos X de escaneo puede controlarse automáticamente. El detector para este concepto se muestra esquemáticamente en la figura 14A. Puede proporcionarse una superficie reflectante 1148 en un extremo del detector 1141 distal con respecto a los fotodetectores 1149.

Con un único canal de datos para una señal de transmisión, la resolución espacial a lo largo de la dirección de tráfico (transversal con respecto a un haz de rayos X iluminador con forma de abanico) se determina por la más pequeña de las siguientes dos dimensiones: la anchura de la área de detector sensible o el tamaño de haz a lo largo del detector TX (con fines heurísticos, no se consideran casos de submuestreo en esta descripción). Puede mejorarse la resolución espacial, sin embargo, estrechando la área de detector sensible, tal como se describe ahora con referencia a la figura 14C. Según realizaciones de la presente invención, la resolución espacial a lo largo de la dirección del tráfico (a lo largo de la línea de detector) se acrecienta empleando múltiples detectores de un grupo de detectores 1450 asociados con una pluralidad de canales (A, B, C, en la figura 14C) y entrelazando sus zonas sensibles. El espaciado del patrón de entrelazado depende de la anchura de haz a lo largo del detector. Idealmente el espaciado (*es decir*, la distancia entre dos detectores 1451 y 1454 asociados con un único canal "A") tiene que ser lo suficientemente amplio de manera que dos segmentos de detector del mismo canal de detección no reciben radiación directa procedente del haz al mismo tiempo. El perfil de intensidad de haz se representa por el número de referencia 1456. Por motivos prácticos el requisito no es tan estricto, dado que es aceptable alguna cantidad de diafonía entre píxeles. Es necesario entrelazar las imágenes múltiples resultantes, empleando cualquier método, incluyendo métodos bien conocidos en la técnica, para crear una imagen de mayor resolución. Obsérvese que la mejora de la resolución espacial en el detector se produce a costa del flujo y está, por tanto, limitada por consideraciones de señal-ruido.

- 25 Otra configuración incluye una combinación del detector vertical 1141 mostrado en la figura 14A con el detector de carretera horizontal 1135 de la figura 13B para formar un detector en forma de L que, ventajosamente, se configura y alinea fácilmente.

En aún otro ejemplo no cubierto por la invención, se segmenta un grupo de detectores de transmisión 1450 (independientemente de la orientación geométrica, ya sea vertical, horizontal, en forma de L, etc.) en una pluralidad de unidades; tales como B, C y A de la figura 14C. Tal como se muestra, el perfil de haz 1456 es simétrico con respecto a la banda A de manera que la razón de las intensidades medidas es una unidad. Si, por cualquier motivo, la alineación cambia, esa razón cambia drásticamente. Si la alineación se desvía cuando un haz estrecho de rayos X de iluminación escanea hacia arriba y hacia abajo, el cambio en la razón de A/B mide tanto el desfase como el desplazamiento lateral. Los datos recogidos pueden corregirse entonces para tal desplazamiento línea por línea.

35 *Detectores TX de energía doble y energía múltiple para identificación de materiales*

Separar las señales de capas frontales y traseras de centelleadores permite que la capa frontal proporcione una medida del componente de baja energía de cada píxel mientras que la capa trasera proporciona una medida de los componentes de alta energía. Poner una capa de material absorbente entre los centelleadores frontales y traseros es una forma habitual para acrecentar la diferencia entre componentes de alta y baja energía, y eso se realiza fácilmente con un detector Sc-WSF.

El detector Sc-WSF hace práctico un detector de energía doble que consiste en una capa de Sc-WSF, tal como BaFCI-WSF, encima de un detector de centelleador plástico; el BaFCI es sensible a los rayos X de baja energía y no a los rayos X de alta energía, mientras que el detector plástico es sensible a los rayos X de alta energía y muy poco sensible a rayos X de baja energía.

45 Puede fabricarse un discriminador de material alternativo y potencialmente más efectivo usando más de dos capas independientes de Sc-WSF, con lecturas independientes para cada capa. Un absorbedor pasivo, tal como un grosor apropiado de cobre, puede insertarse después del Sc-WSF superior para acrecentar la aplicación de energía doble, tal como se practica con detectores segmentados. Alternativamente, el centelleador central puede usarse como capa absorbente activa. La medición de tres parámetros independientes permite obtener una medida tanto del número atómico promedio de los materiales atravesados así como del grado de endurecimiento del haz. El Sc-WSF puede extenderse adicionalmente para obtener más de tres valores de energía para cada píxel, siendo el límite las incertidumbres estadísticas, que aumentan con el número de componentes. El detector 1400 mostrado en la figura 12 es un ejemplo extremo de tal detector.

55 Una aplicación importante del TX de energía doble es para escáneres de personal de rayos X en terminales de aeropuerto. Proporcionar imágenes de TX simultáneamente con BX ha demostrado ser útil para la inspección. Añadir energía doble a las imágenes de TX ha sido impráctico hasta la fecha principalmente debido a las limitaciones de tamaño impuestas por los detectores convencionales. Sc-WSF elimina esas limitaciones y promete mejorar significativamente el rendimiento, dado que pueden apilarse múltiples detectores, con sensibilidades de

energía distintas, tal como se muestra en la figura 15, en la que un detector de energía doble (o múltiple) 1500 incluye un detector Sc-WSF 1508, sensible a un componente de rayos X incidentes 1501 de energía más baja, situado en frente de una plancha de centelleador plástico 1502, que es sensible a los rayos X de energía más alta. El detector de Sc-WSF 1508 contiene una lectura de centelleador 1504 mediante dos capas de fibras WS 1506.

5 *Detector de radiación compacto de radiación gamma y de neutrones*

El método Sc-WSF hace práctico un monitor de rayos gamma y de neutrones 1601 pequeño, ligero, económico. BaFCI(Eu)-WSF es bastante sensible a la radiación gamma mientras que es insensible a los neutrones, mientras que Li⁶F:ZnS(Ag)-WSF es insensible a rayos gamma y bastante sensible a la detección de neutrones térmicos. La figura 16 muestra una intercalación "Dagwood" de múltiples capas que consiste en una o más capas 1602 de BaFCI(Eu), leídas por un único fotodetector (no mostrado) por medio de fibras ópticas 1604, y una o más capas 1606 de Li⁶F:ZnS(Ag)-WSF, leídas por un segundo fotodetector independiente (no mostrado), ocupando los elementos activos un grosor de no más de uno o dos centímetros. Puede colocarse una capa apropiada de moderador de neutrones 1612, tal como polietileno, en ambos lados del Li⁶F:ZnS(Ag)-WSF para acrecentar la eficacia para detectar neutrones. Una lámina ópticamente reflectora 1608, tal como lámina de aluminio, limita el centelleo a regiones de detector respectivas.

La solicitud de patente estadounidense con número de serie 13/163,854 (de Rothschild), titulada "Detector with Active Colimadores," describe un módulo de detector de retrodispersión 30 que aumenta la profundidad de inspección distinguiendo la dispersión de los campos cercano y lejano objetos inspeccionados, tal como se representa en la figura 17. El ángulo de un conjunto de hojas de colimación activas 31 puede ajustarse o bien una vez en la fábrica, o puede unirse a cualquier clase de dispositivo electromecánico proporcionado para ajustarlos dinámicamente, dependiendo del tipo y/o distancia del objeto que se escanea. La luz de centelleo procedente de las hojas de colimación se detecta por uno o más fotodetectores (por ejemplo, por PMTm 32 ubicados en la parte superior e inferior del compartimento frontal del detector). Un compartimento posterior 36 del detector está aislado ópticamente un compartimento frontal 35 por un deflector de luz 34, y la luz de centelleo procedente de los rayos X detectados en el compartimento posterior 36 se recogen por un segundo conjunto de uno o más fotodetectores (por ejemplo, PMT 37 montados en la cara posterior del detector. El compartimento posterior puede forrarse con pantalla de fósforo de centelleo, por ejemplo, o, en otras realizaciones de la invención, puede contener plástico o líquido centelleador.

Una adición útil a una unidad de retrodispersión estándar sería un colimador de "persiana veneciana" fabricado de centelleador. Las lamas interceptan la radiación que no entra directamente a través de los huecos entre las lamas de manera que los detectores de caja detectan preferiblemente objetos interiores más profundos. Los colimadores activos registran la radiación rechazada. La luz procedente de los colimadores activos se detecta por PMT, cuya eficacia de recogida disminuye rápidamente a medida que disminuye el hueco entre colimadores. Reemplazar los PMT y hojas de centelleador con hojas que consisten en detectores de Sc-WSF resuelve carencias importantes y hace prácticos los colimadores de persiana veneciana. En primer lugar, la recogida de luz es independiente de la anchura del hueco entre hojas. En segundo lugar, la zona activa de los PMT o fotomultiplicadores de silicio usados para recoger la luz procedente de los colimadores activos es generalmente mucho menor que la zona activa de los PMT necesarios, de manera que el coste de los fotodetectores es menor. En tercer lugar, la colocación del fotodetector en el extremo de los manojos de WSF no es esencial para la eficacia de la recogida de luz. En cuarto lugar, las señales procedentes de los WSF desde cada lama pueden procesarse independientemente, proporcionando un alcance considerable para maximizar la información acerca del interior del objeto inspeccionado. En quinto lugar, la luz de las pantallas de centelleador delgadas en la parte frontal y trasera de cada hoja puede recogerse mediante WSF independientes, lo que puede mejorar significativamente la discriminación de profundidad.

Las figuras 18C y 18D ilustran (en perspectiva y en sección transversal, respectivamente) un colimador de WSF activo 181 sensible al impacto de rayos X desde ambos lados del centelleador. La luz de centelleo desde ambas regiones de centelleador 182 se acopla a fotodetectores por medio de fibras ópticas de desplazamiento de longitud de onda 183. Las figuras 18A y 18B muestran (en perspectiva y en sección transversal, respectivamente) un colimador de WSF activo 185 con lecturas independientes 187 separadas por un absorbedor de rayos X hermético a la luz 189 para distinguir la radiación que incide en cada cara. Por ejemplo, cada colimador 185 puede consistir, en una realización, en dos capas de detectores de Sc-WSF 182, conteniendo cada uno una densidad de zona de 60mg BaFCI:Eu por cm². El absorbedor de rayos X hermético a la luz 189 puede consistir en una capa delgada de estaño, que también proporciona soporte estructural.

Detectores para minisistemas de inspección de retrodispersión

La delgadez de los detectores de Sc-WSF proporciona un potencial único para aplicaciones en las que bajo peso y potencia sean esenciales. Haciendo referencia a las figuras 19A y 19B, un sistema de obtención de imágenes manual 193 es un ejemplo de tal aplicación. Los requisitos de potencia, tiempo de inspección y calidad de la imagen, se ven todas afectadas por el ángulo sólido de detección. Un detector tradicional con, por ejemplo, una sección transversal de 10 cm x 10 cm (100 cm²) pesa aproximadamente medio kilogramo. Un cubo de 10 cm de Sc-WSF, que pese no más del doble, puede fabricarse de detectores de Sc-WSF de 10 cm x 10 cm individuales, cada uno de ellos con menos de 5mm de grosor, que puede desdoblarse para presentar una zona de detección de

retrodispersión de al menos 2.000 cm², un aumento de veinte veces en este ejemplo. La cobertura de detección adicional puede realizar una mejora de orden de magnitud en el rendimiento del sistema manual.

El perfil delgado de los detectores de Sc-WSF descritos en el presente documento hace posible encajar detectores contorneados en espacios estrechos. Por ejemplo, pueden adaptarse detectores para escáneres de personal limitados a encajar en espacios de inspección de aeropuerto angostos.

La figura 19 muestra un ejemplo en el que cuatro detectores 191 se pliegan o se deslizan fuera del escáner manual 193 para aumentar sustancialmente la eficacia de detección, especialmente para objetos ocultos más profundamente en el objeto que se inspecciona. Los detectores de retrodispersión 195 se extiende sobre ambos lados del haz irradiador 197.

Inspección de retrodispersión del lado inferior de vehículos detenidos

La inspección del lado inferior de vehículos por un sistema de retrodispersión de rayos X portátil presenta problemas especiales. El espacio con respecto a la carretera de los coches no es de más de 8" y puede ser tan pequeña como 6". Sistemas de inspección fijos, tales como portales, pueden colocar un detector en el suelo, o, tal como se describió anteriormente, pueden colocarse en el suelo usando Sc-WSF. No se han desarrollado nunca sistemas de inspección bajo vehículos móviles, sin embargo, que son necesarios para la seguridad en muchas áreas. Los inspectores dependen de herramientas de inspección pasivas tales como espejos y cámaras, que pueden pasar por alto contrabando en el depósito de combustible o que está camuflado para parecer inocuo.

Los detectores Sc-WSF hacen práctico un sistema de retrodispersión de rayos X que no es de más de 6" de alto. Se describe ahora un boceto de un sistema práctico con referencia a las figuras 20A y 20B. La fuente de rayos X consiste en un escáner electromagnético 221 de un haz de electrodo a través de un ánodo. El escáner electromagnético 221 está impulsado por un módulo de electrónica 223. Los rayos X se someten a colimación por un grupo de aberturas lineales 225 que abarcan, por ejemplo, 30" del lado inferior en una pasada. Los detectores de Sc-WSF 227 se montan en cada lado del tubo de rayos X para detectar rayos X 236 retrodispersados desde el vehículo 229. Pueden montarse apropiadamente suministros de alimentación, procesadores de impulso e imagen. El bastidor 234 de la unidad de inspección 230 sobre ruedas 232 puede adaptarse para maniobrase bajo el vehículo 229 mediante control a motor o manual.

Inspección de transmisión móvil con segmentos de grupo de detectores en forma de L

Según otro ejemplo no cubierto por la presente invención, se describe ahora un sistema de inspección móvil, designado generalmente por el número de referencia 240, con referencia a las figuras 21A y 21B. Se transmite una fuente de radiación penetrante (no mostrada, y descrita, en el presente documento, sin limitación, en términos de rayos X) dentro de una unidad de inspección móvil 241, que, normalmente, puede moverse por sus propios medios, aunque también puede remolcarse o transportarse de otra manera, dentro del alcance de la presente invención. Se emite un haz 242 de radiación penetrante desde la unidad de inspección móvil 241, o bien como un haz estrecho barrido o bien como un haz en abanico, emitido en cualquiera de los dos casos en el plano designado como que representa al haz 242 en la figura 21A. El objeto inspeccionado 244, que puede ser un vehículo tal como se muestra, o de otro modo (tal como mercancía transportada), atraviesa el haz 242 durante el transcurso de la inspección, y, a medida que atraviesa, pasa por una unidad de detector en forma de L solidaria 245, como se describe ahora adicionalmente. La unidad de detector 245 tiene un segmento horizontal 246 y un segmento vertical 247, tal como se indica en la figura 21B.

Cada de uno de los segmentos horizontal y vertical 246 y 247 de la unidad de detector en forma de L 245 puede componerse por múltiples capas paralelas 249, que proporcionan resolución de energía doble, o más generalmente, múltiple, de rayos X detectados, para proporcionar identificación de materiales, tal como se describió anteriormente con referencia a la figura 12. Adicionalmente, el segmento de grupo de detectores vertical 247 puede tener múltiples segmentos de detector 248 en una dirección transversal a la dirección del haz 242 y sustancialmente a lo largo de la dirección del movimiento relativo entre el objeto inspeccionado 244 y el haz 242 para proporcionar una indicación de desviación o desplazamiento lateral de los detectores con respecto al haz, tal como se describió anteriormente con referencia a las figuras 14A- 14C. La unidad de detector en forma de L solidaria 245 puede transportarse a un sitio de inspección incorporado en la unidad de inspección móvil 241 o en un remolque 250 remolcado o que lo acompañe de otro modo, y puede ensamblarse, en parte, tras el despliegue en el sitio de inspección. Pueden emplearse elementos de ayuda para la alineación, tales como un láser de alineación 251, para establecer una posición y orientación apropiadas de la unidad de detector 245 en relación con la unidad de inspección móvil 241 y el haz 242.

Cuando los ejemplos presentados en el presente documento implican combinaciones específicas de actos de método o elementos de sistema, debe entenderse que esos actos y esos elementos pueden combinarse de otras maneras para lograr los mismos objetivos de detección de rayos X. Se pretende que las realizaciones de la invención descritas en el presente documento sean meramente a modo de ejemplo; para los expertos en la técnica serán evidentes variaciones y modificaciones.

REIVINDICACIONES

1. Detector de radiación de rayos X que tiene un grosor y un área, comprendiendo el detector de rayos X:
 - a. un primer volumen de medio de centelleo (403, 1404) para convertir energía de radiación de rayos X incidente en una primera luz de centelleo;
 - 5 b. una primera pluralidad de guías de ondas ópticas de desplazamiento de longitud de onda (701, 1406), alineadas sustancialmente en paralelo entre sí en una primera región de extracción de luz de centelleo contigua al primer volumen (403, 1404) de medio de centelleo, para guiar luz derivada de, y en una primera longitud de onda más larga que la de, la primera luz de centelleo;
 - 10 c. un segundo volumen de medio de centelleo (403, 1404) para convertir energía de radiación de rayos X incidente que ha atravesado el primer volumen de medio de centelleo (403, 1404) en una segunda luz de centelleo;
 - d. una segunda pluralidad de guías de ondas ópticas de desplazamiento de longitud de onda (702, 1406), alineadas sustancialmente en paralelo entre sí en una segunda región de extracción de luz de centelleo contigua al segundo volumen de medio de centelleo, para guiar luz derivada de, y en una segunda longitud de onda más larga que la de, la segunda luz de centelleo;
 - 15 e. un primer fotodetector (805, 1408) para detectar fotones en la primera longitud de onda guiada por la primera pluralidad de guías de ondas (701, 1406) y para generar una primera señal de detector; y
 - f. un segundo fotodetector (805, 1408) para detectar fotones en la segunda longitud de onda guiada por la segunda pluralidad de guías de ondas (702, 1406) y para generar una segunda señal de detector;
 - 20 en el que los volúmenes primero y segundo (403, 1404) de medio de centelleo están caracterizados por sensibilidades espectrales distintas a la radiación de rayos X incidente.
2. Detector según la reivindicación 1, que comprende además un circuito integrador para integrar la señal de detector a lo largo de un periodo de tiempo especificado.
3. Detector según la reivindicación 1, en el que al menos uno del primer medio de centelleo y el segundo medio de centelleo incluye fluorocloruro de bario.
4. Detector según la reivindicación 1, en el que al menos uno de los fotodetectores primero y segundo (805, 1408) incluye un fotomultiplicador.
5. Detector según la reivindicación 1, en el que el cuadrado del grosor del detector dividido por el área del detector es menor de 0,001.
- 30 6. Detector según la reivindicación 1, en el que al menos una de las guías de ondas ópticas de desplazamiento de longitud de onda (1406) carece de revestimiento y el medio de centelleo desde el cual se deriva la luz guiada por la al menos una guía de ondas ópticas de desplazamiento de longitud de onda está caracterizado por un índice de refracción de valor inferior a un índice de refracción que caracteriza la al menos una guía de ondas óptica de desplazamiento de longitud de onda (1406).
- 35 7. Detector según la reivindicación 1, en el que las pluralidades de guías de ondas ópticas (701, 702, 1406) están dispuestas en múltiples planos paralelos, conteniendo cada uno de los planos paralelos un subconjunto de las pluralidades de guías de ondas ópticas.
8. Detector según la reivindicación 1, en el que volúmenes alternos de centelleador incluyen $\text{Li}^6\text{F}:\text{ZnS}(\text{Ag})$ que se alterna con al menos uno de $\text{BaFCl}(\text{Eu})$ acoplado mediante fibra y $\text{BaFl}(\text{Eu})$ acoplado mediante fibra.
- 40 9. Detector según la reivindicación 1, en el que el primer volumen de medio de centelleador (403, 1404) es preferiblemente sensible a rayos X de baja energía, y el segundo volumen de medio de centelleador (403, 1404) que es el último volumen es un centelleador plástico.

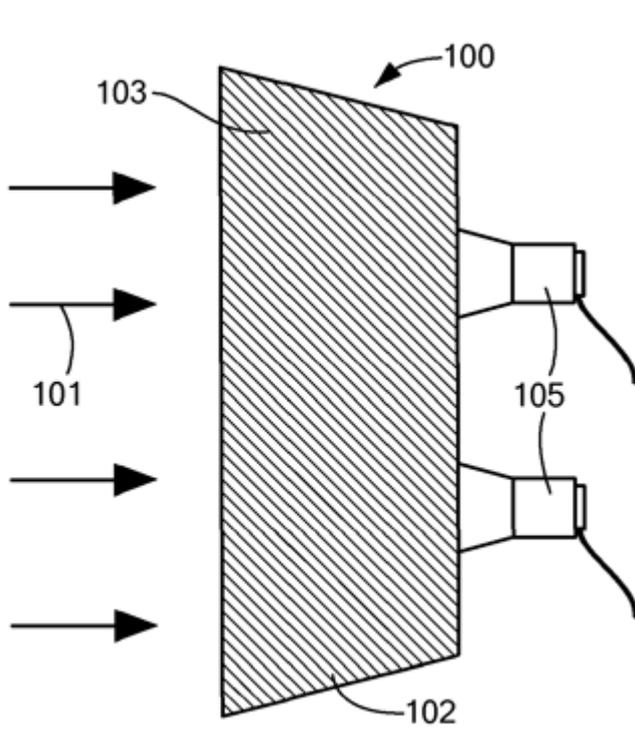


FIG. 1A
TÉCNICA ANTERIOR

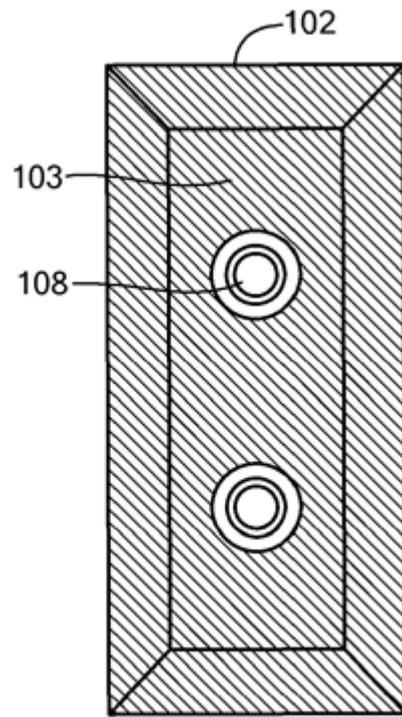


FIG. 1B
TÉCNICA ANTERIOR

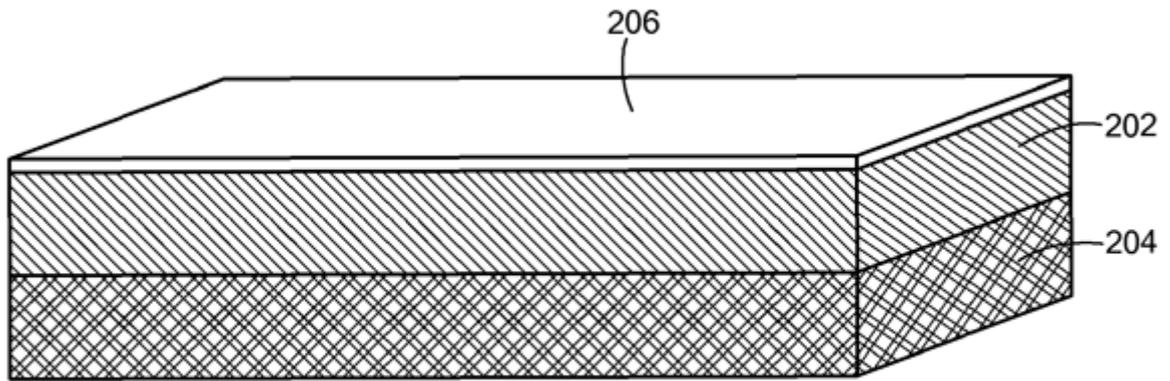


FIG. 2
TÉCNICA ANTERIOR

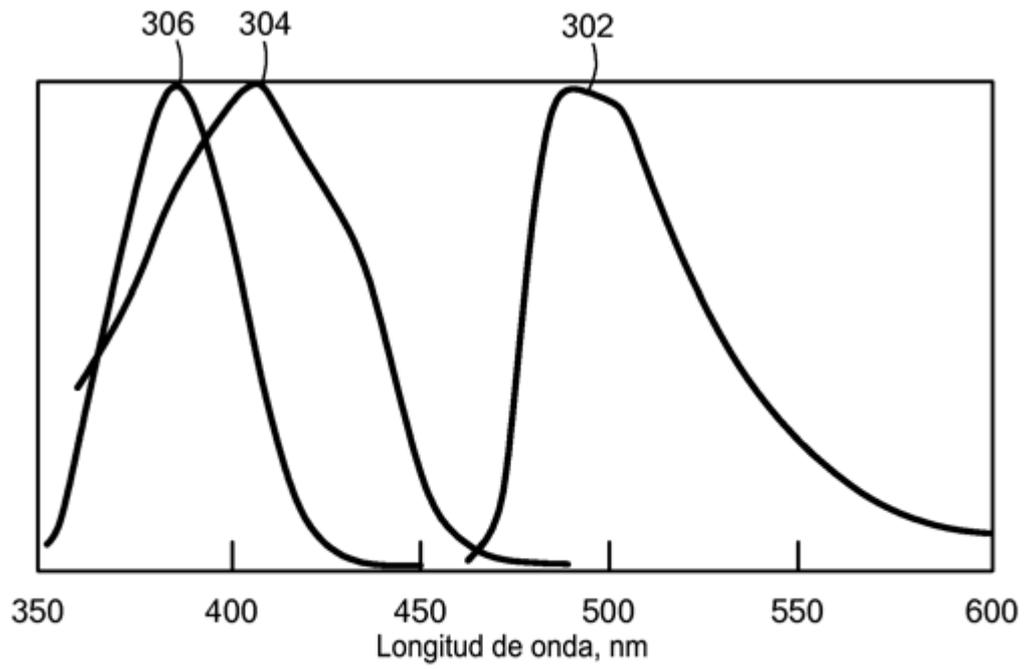


FIG. 3
TÉCNICA ANTERIOR

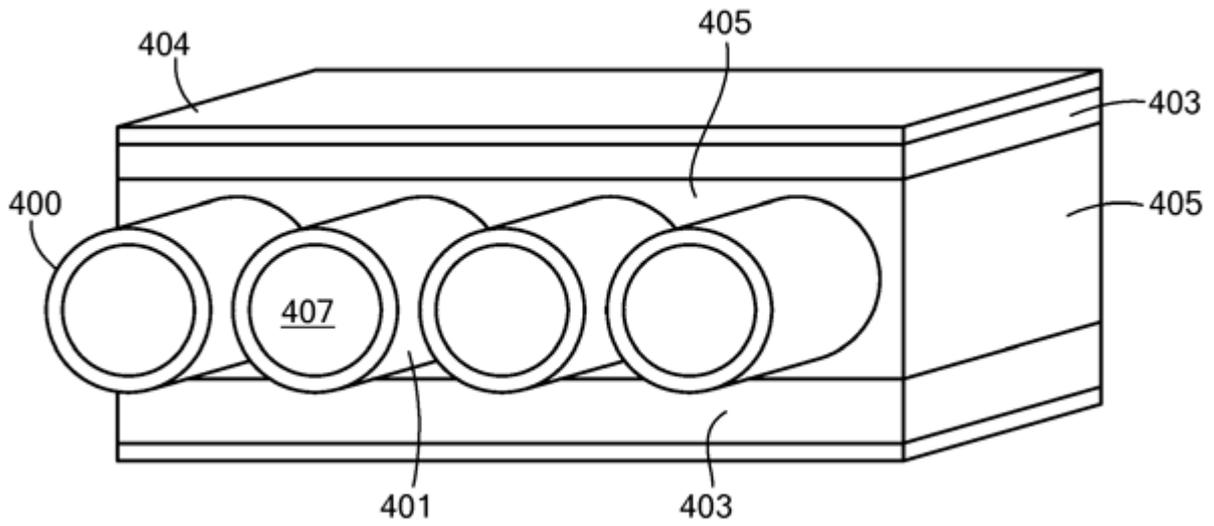


FIG. 4

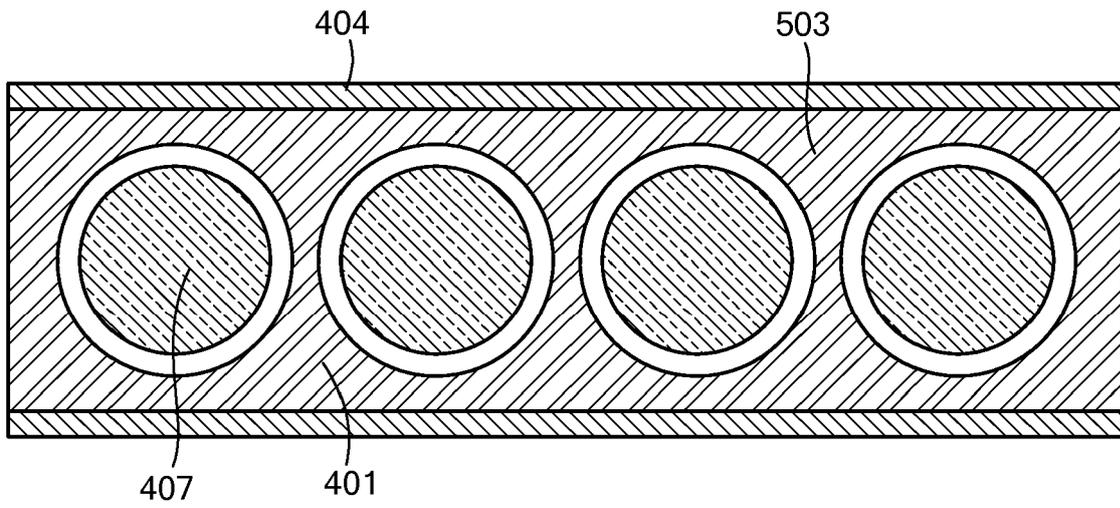


FIG. 5

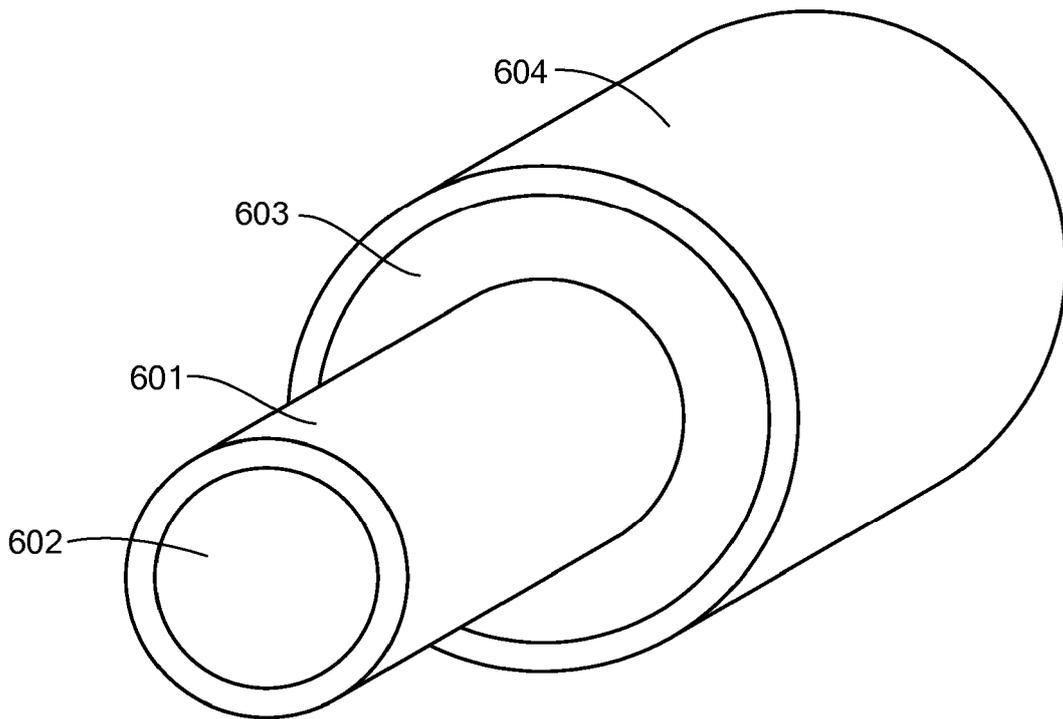


FIG. 6A

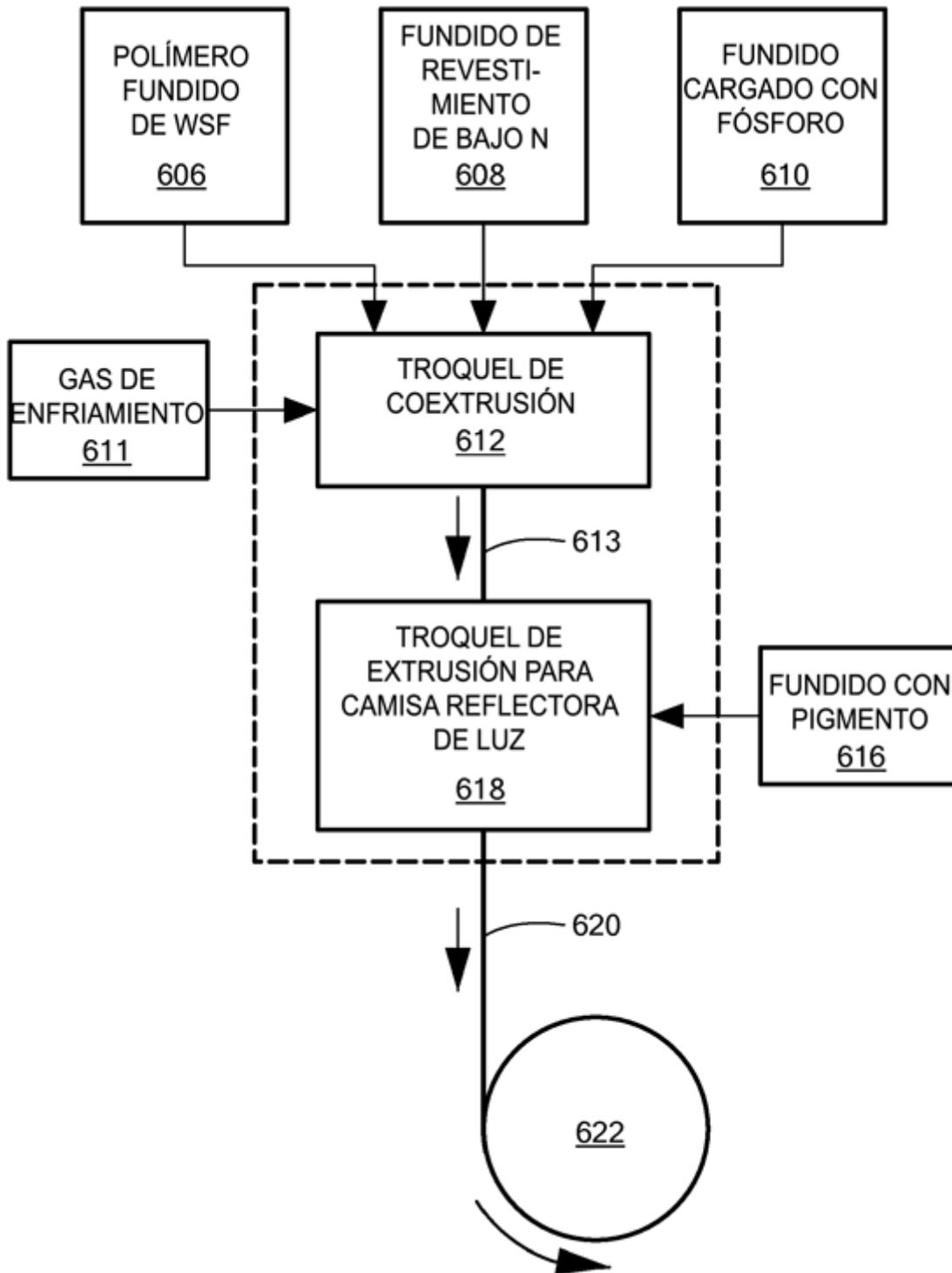


FIG. 6B

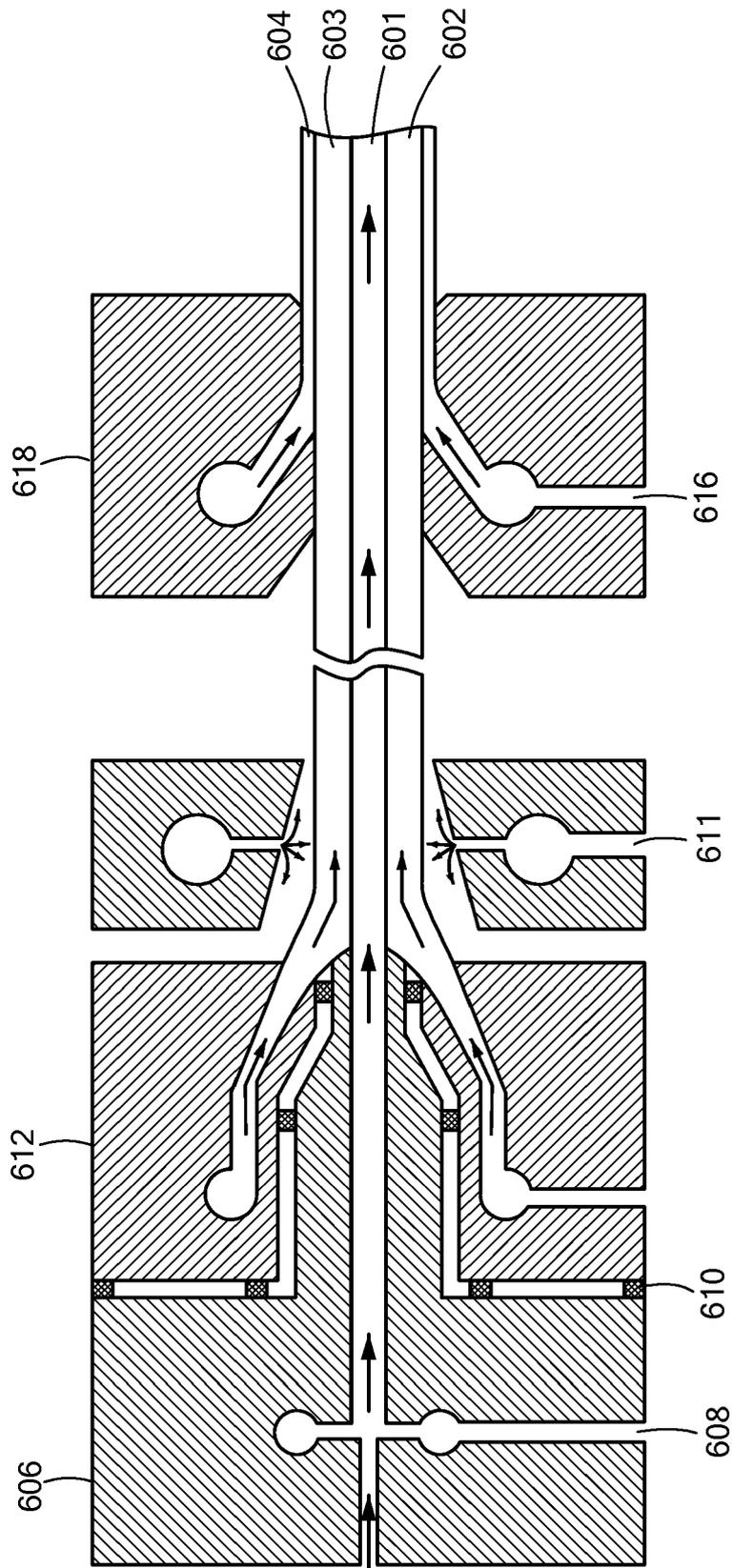


FIG. 6C

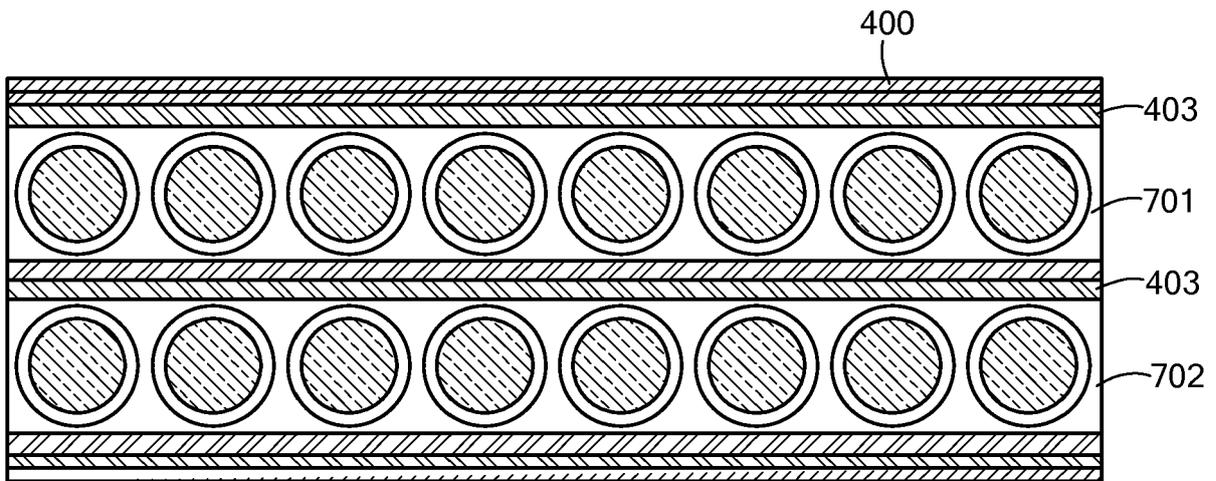


FIG. 7

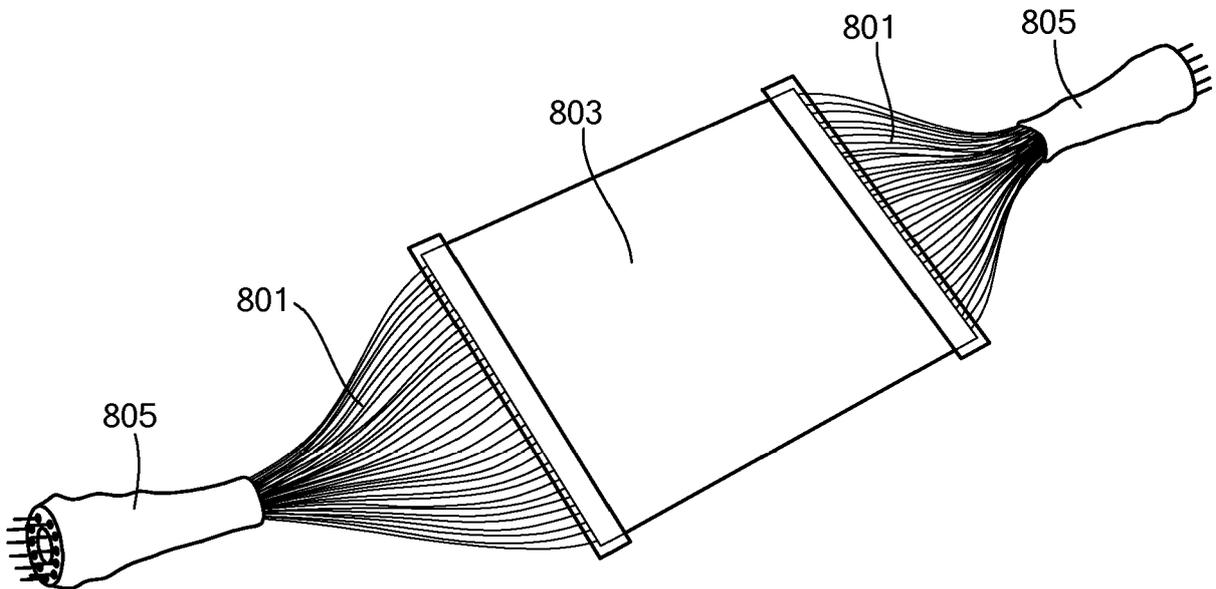


FIG. 8

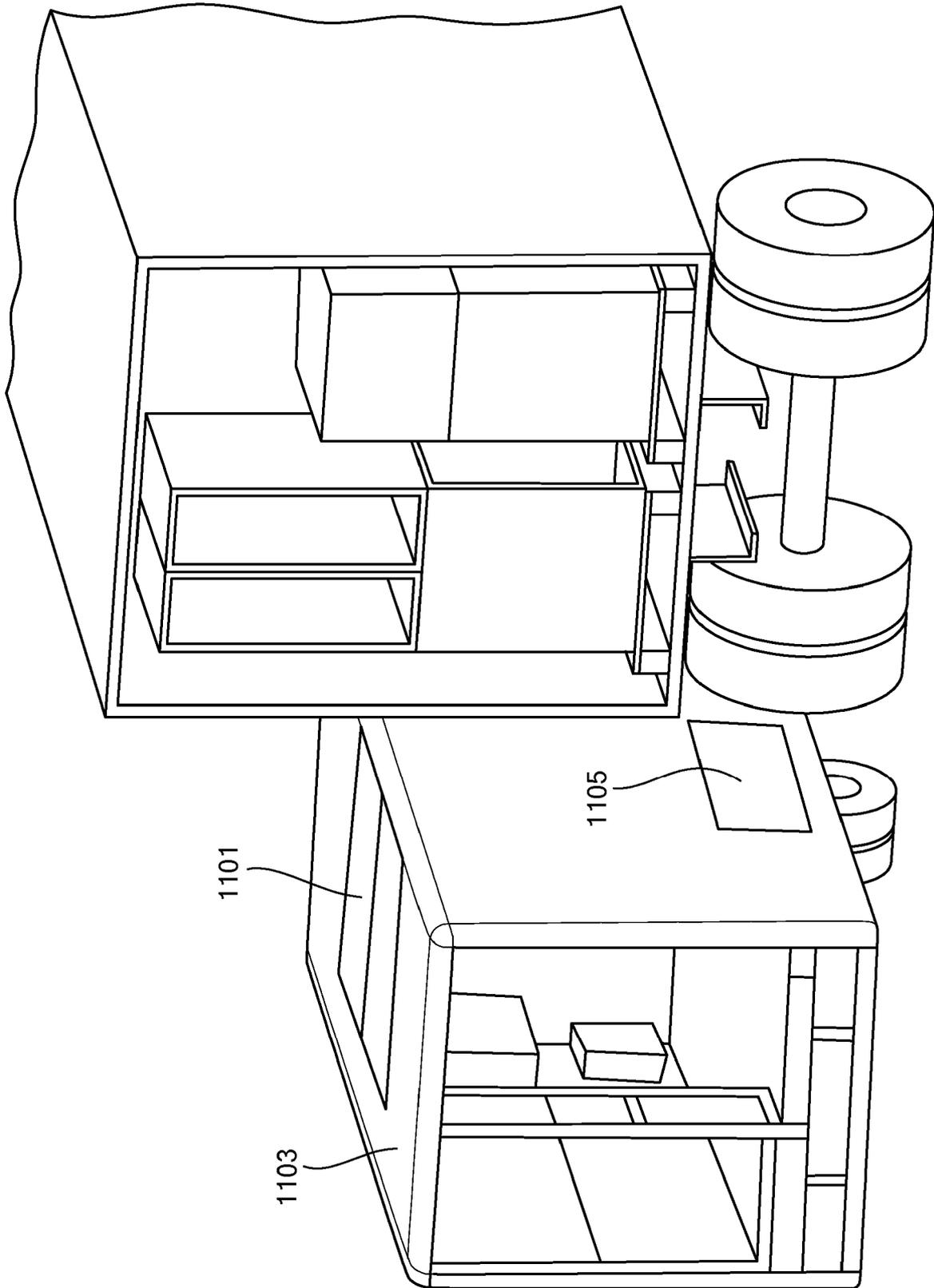


FIG. 9

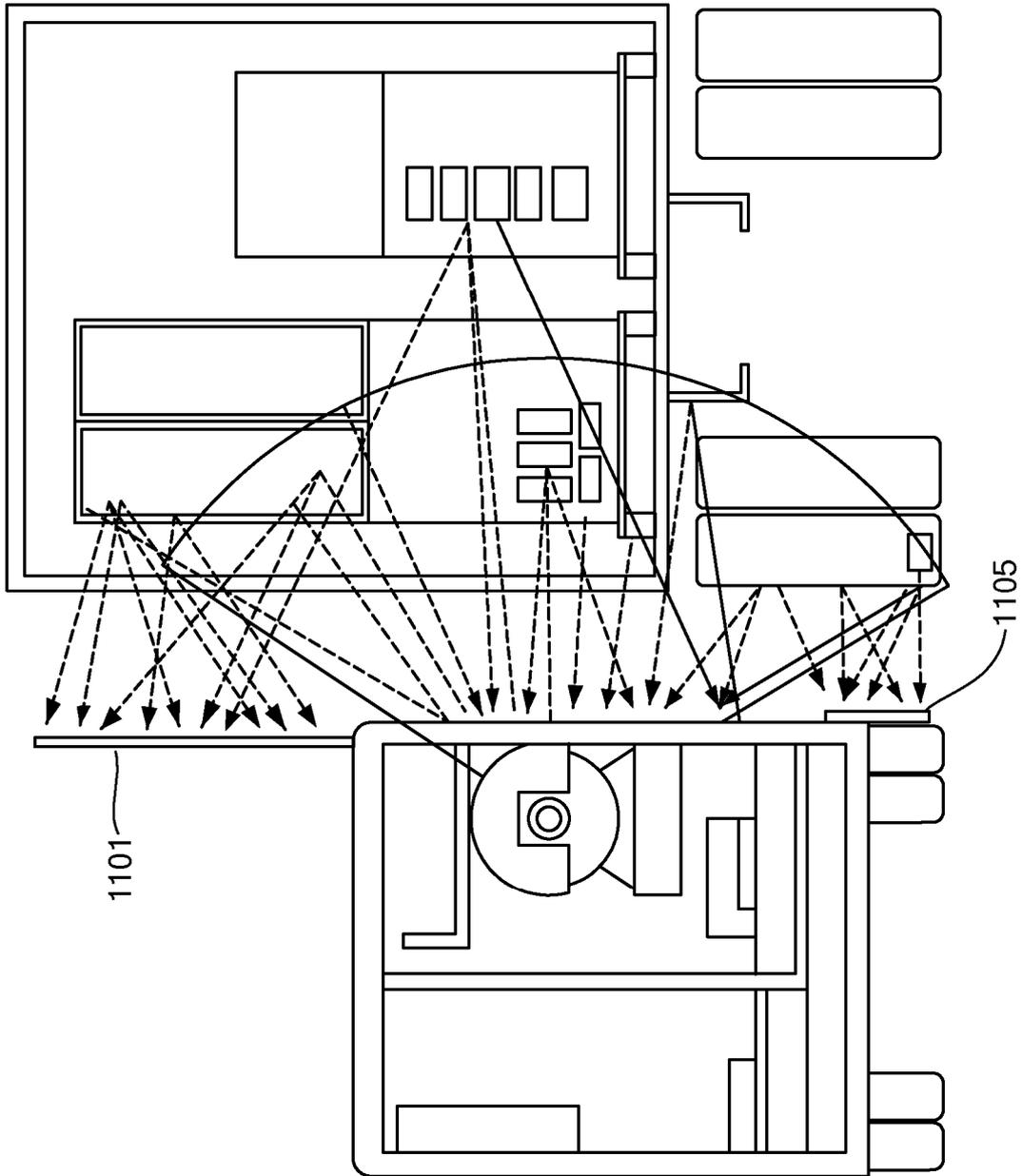


FIG. 10

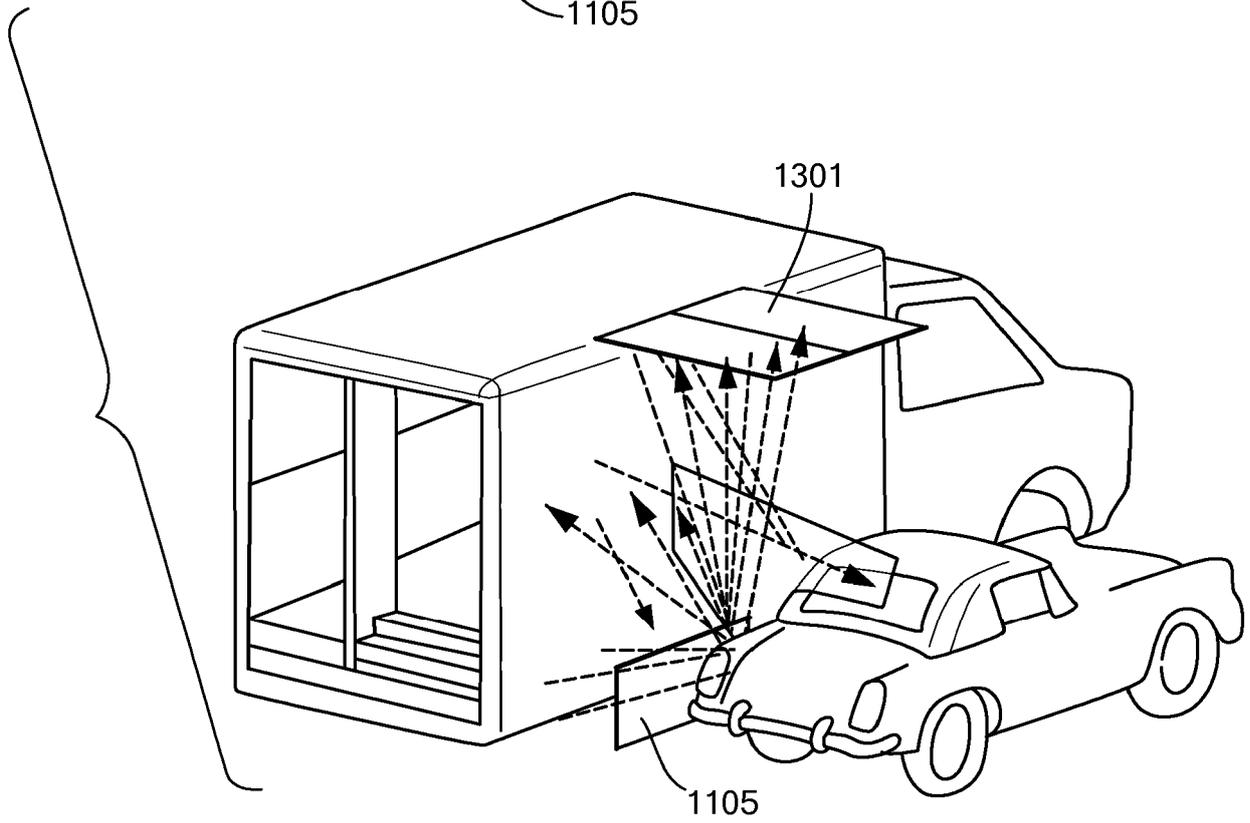
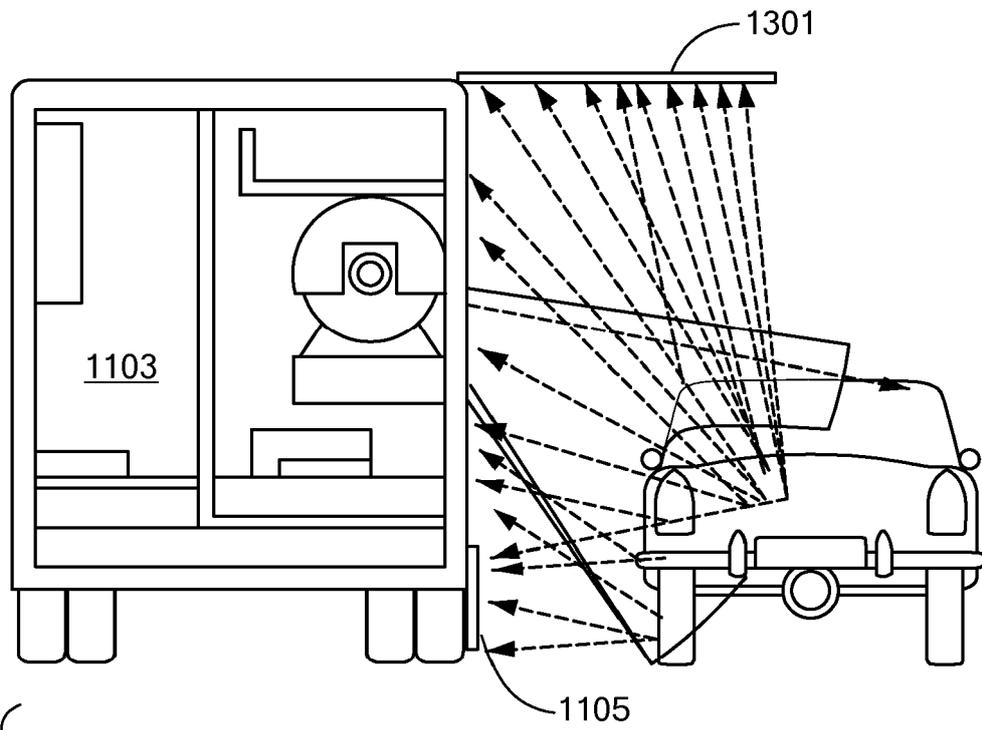


FIG. 11

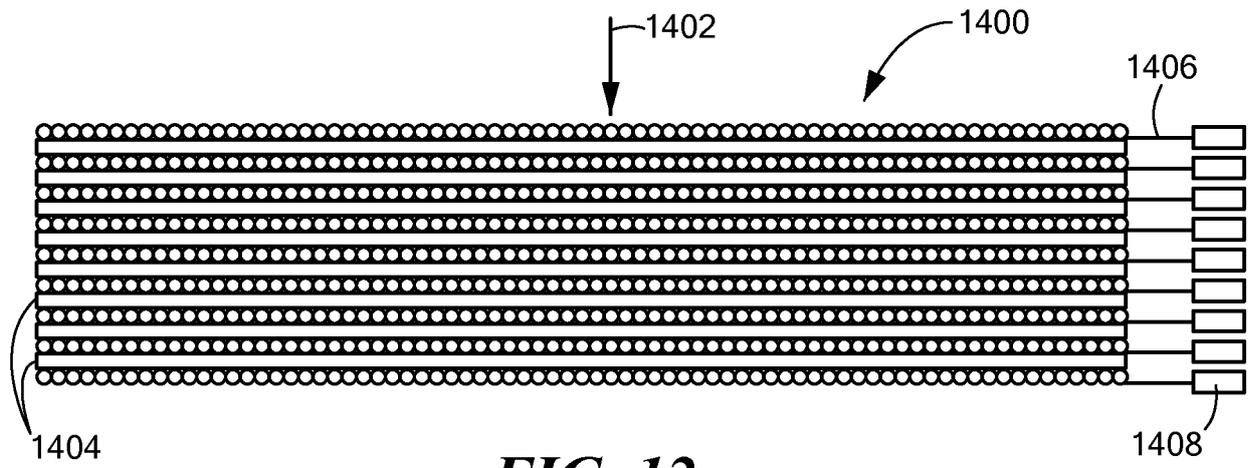


FIG. 12

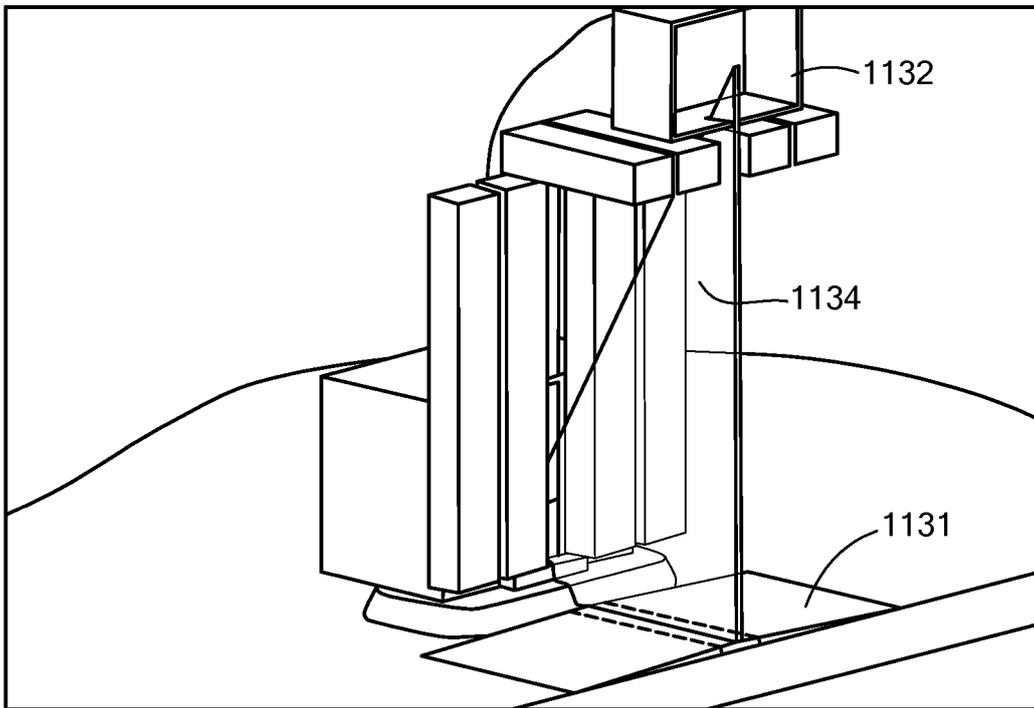


FIG. 13A

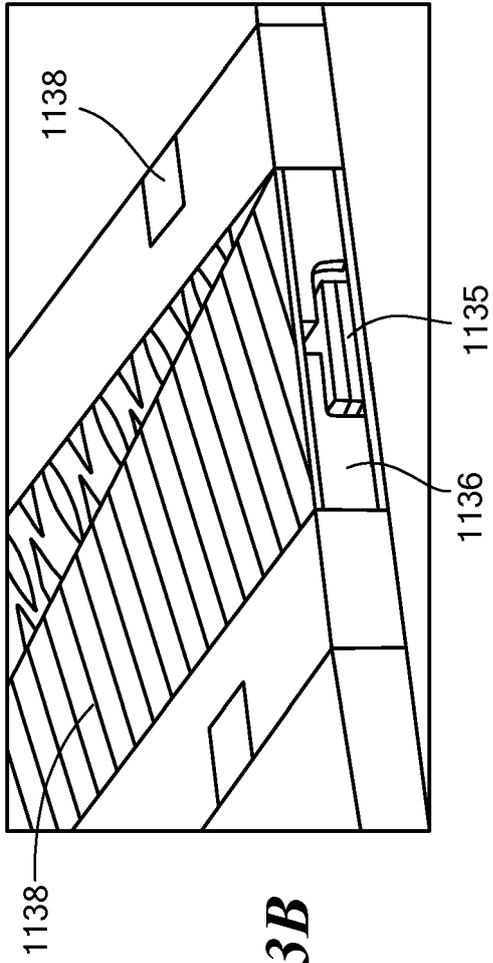


FIG. 13B

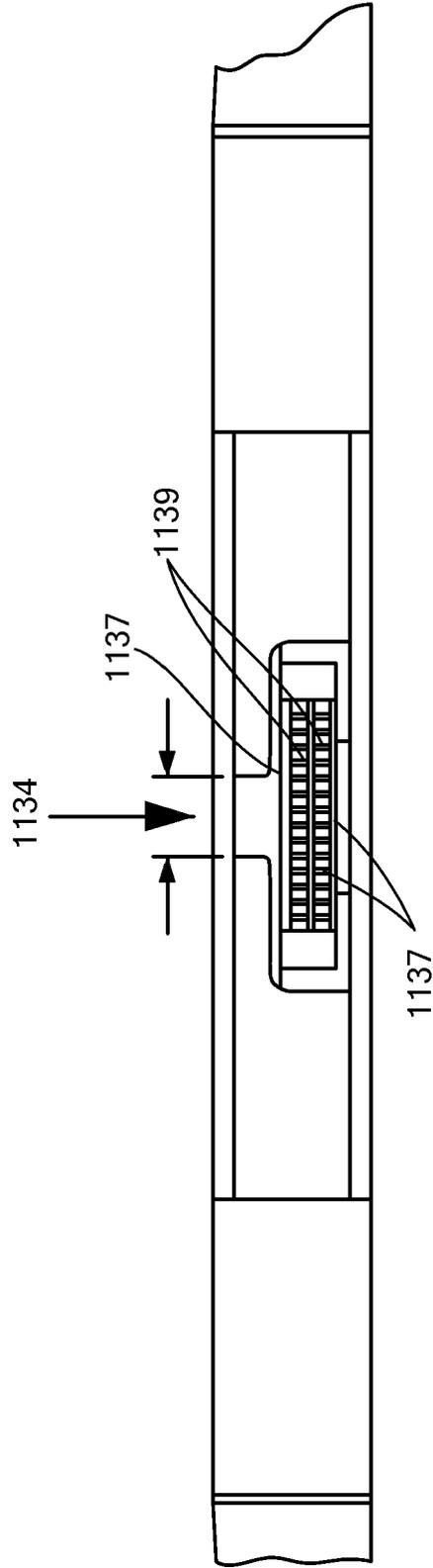


FIG. 13C

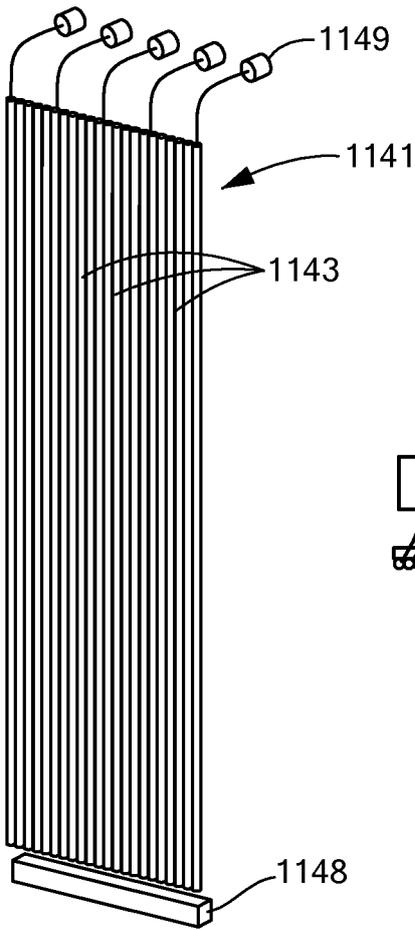


FIG. 14A

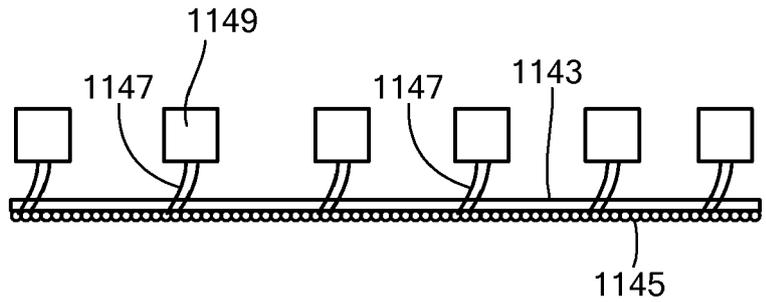


FIG. 14B

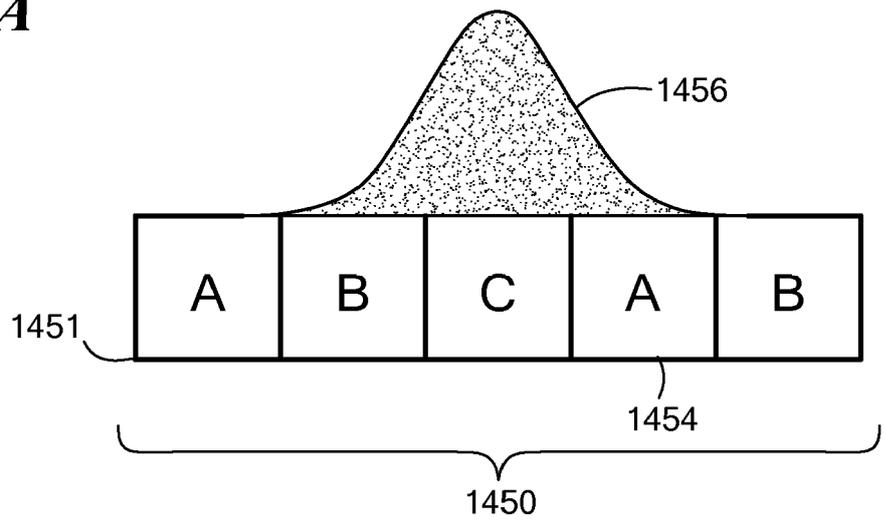


FIG. 14C

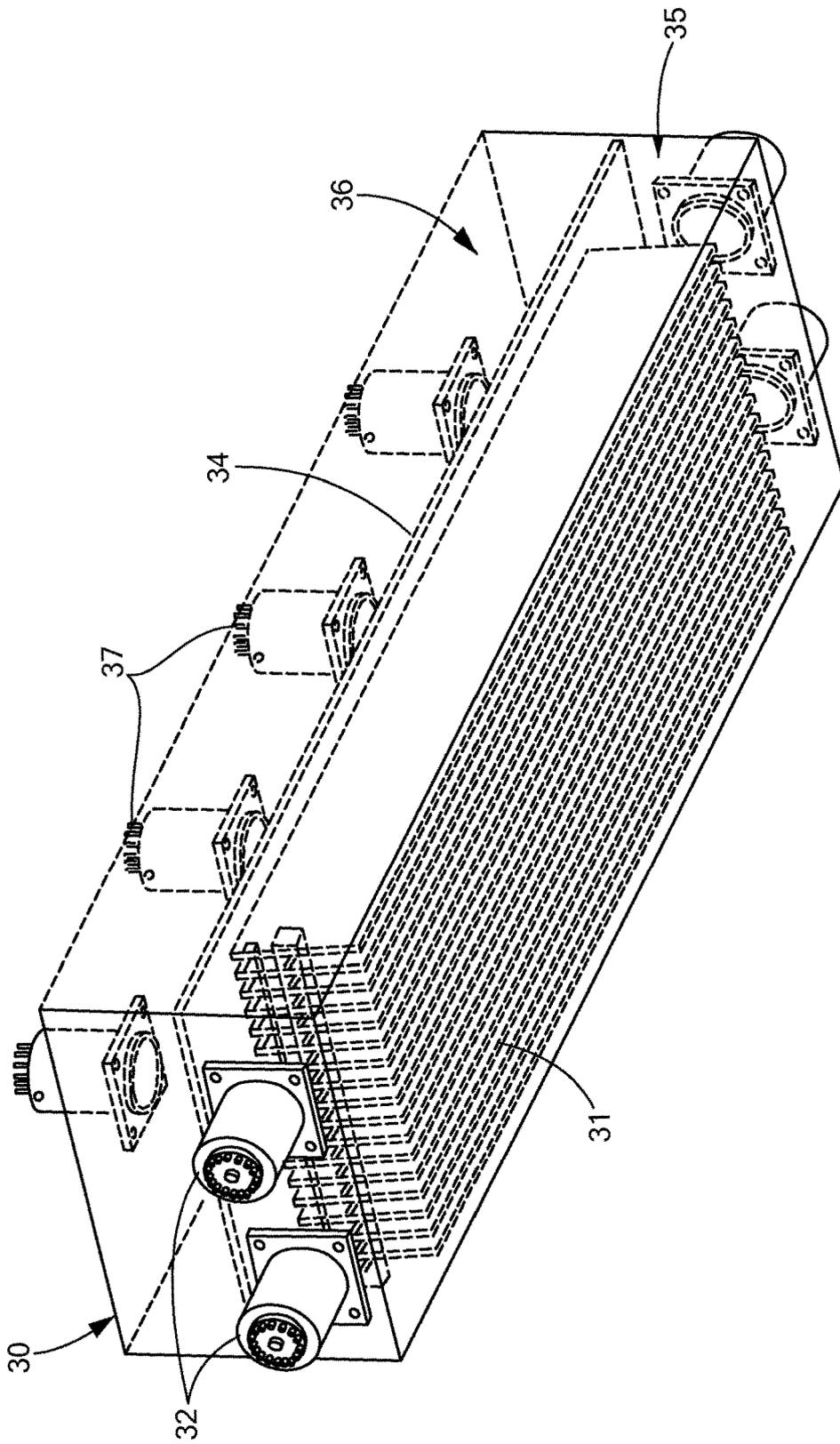


FIG. 17

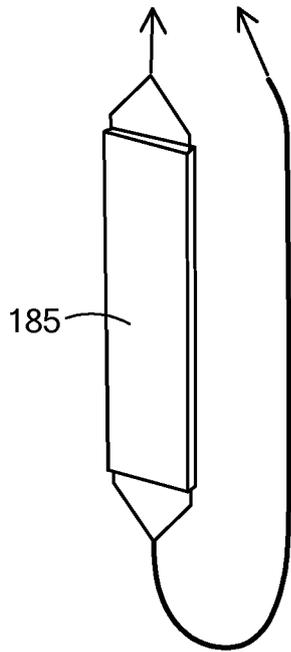


FIG. 18A

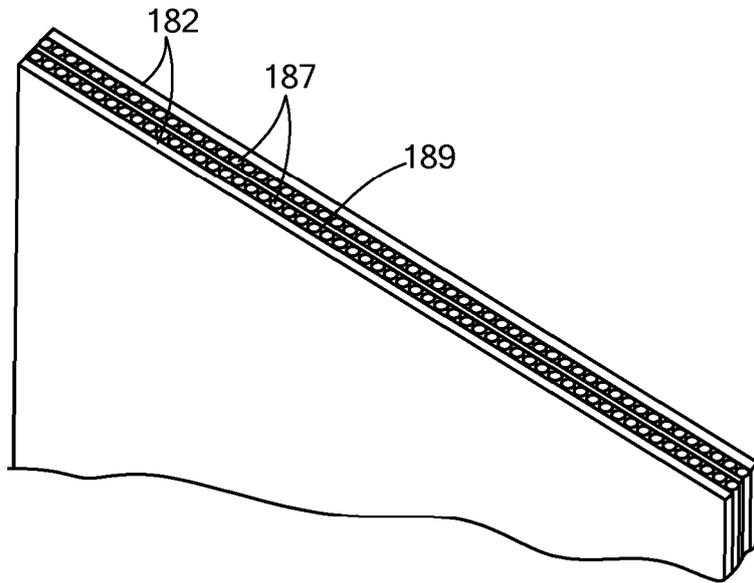


FIG. 18B

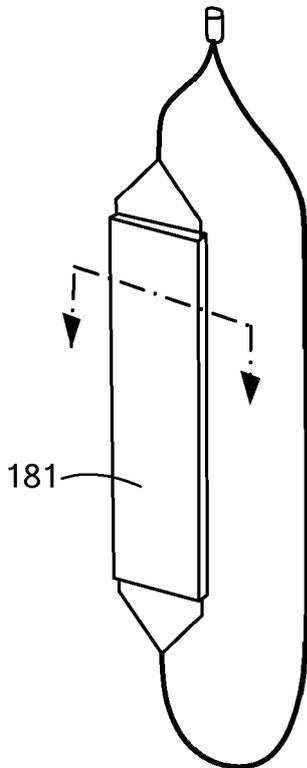


FIG. 18C

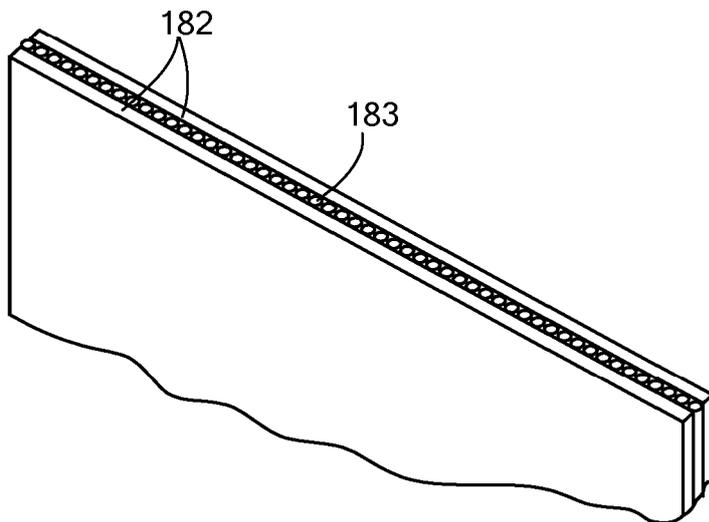


FIG. 18D

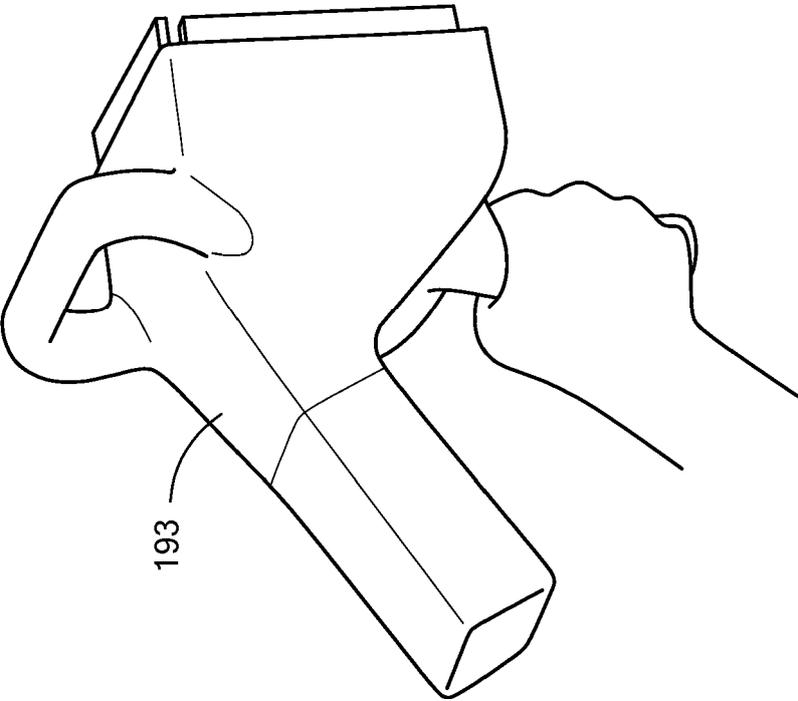


FIG. 19A

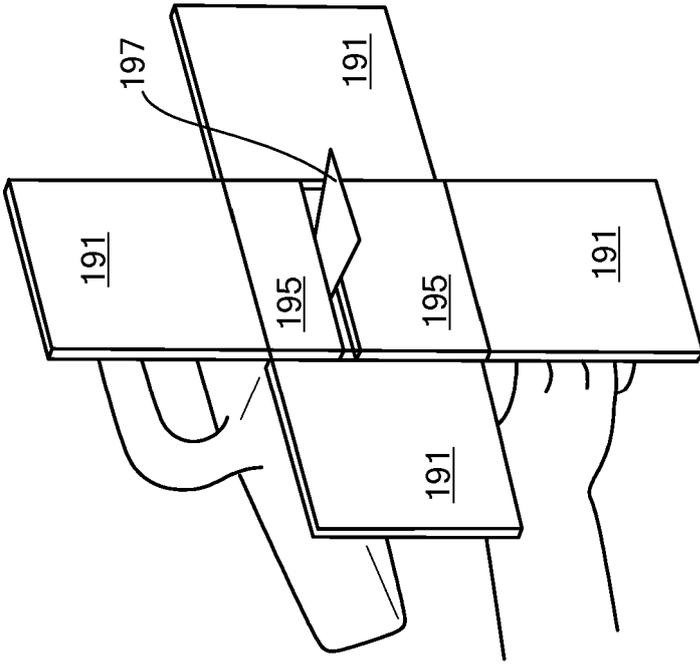


FIG. 19B

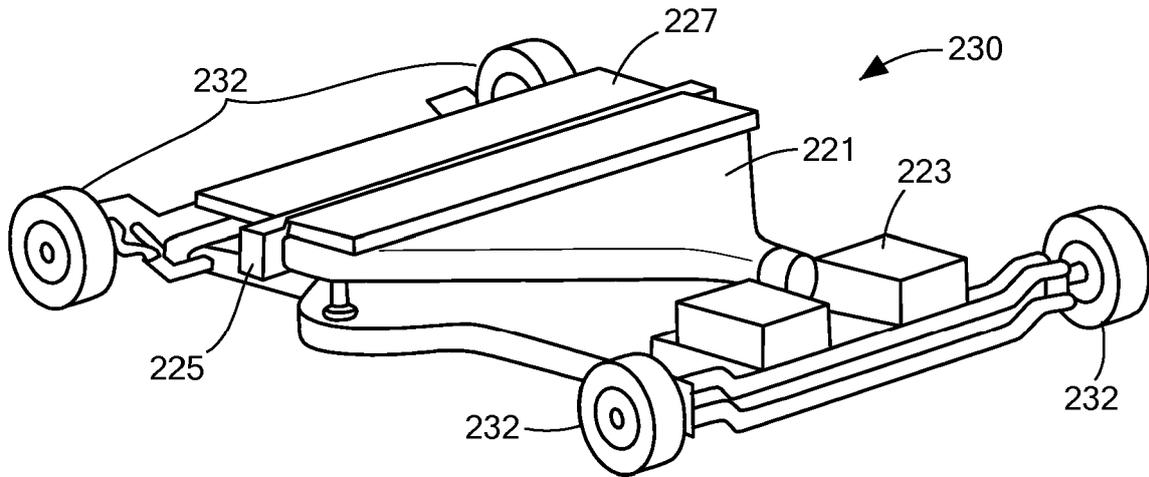


FIG. 20A

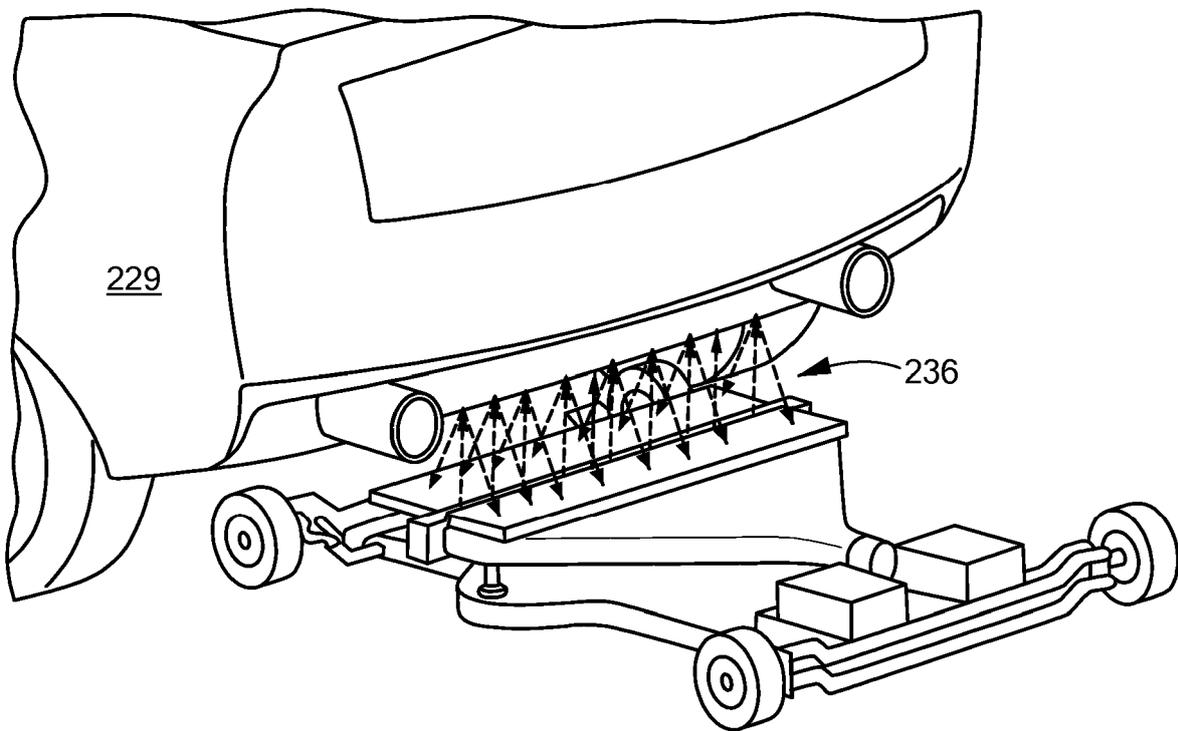


FIG. 20B

