

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 901 791**

51 Int. Cl.:

G01N 23/087 (2008.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.07.2016 PCT/FR2016/051720**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.01.2017 WO17006059**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.07.2016 E 16747830 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.10.2021 EP 3320331**

54 Título: **Método de identificación de un material**

30 Prioridad:

08.07.2015 FR 1556461

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

23.03.2022

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (100.0%)
Bâtiment "Le Ponant D", 25 rue Leblanc
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

PAULUS, CAROLINE

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 901 791 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

Método de identificación de un material

5 CAMPO TÉCNICO

El campo técnico de la invención es la identificación de un material mediante irradiación electromagnética ionizante, seguida de un análisis espectrométrico de la radiación transmitida por el material irradiado. Más concretamente, la invención es un método de análisis que pone en práctica una combinación de datos espectrométricos medidos, seguida de una proyección de los datos combinados utilizando vectores de proyecciones previamente determinados.

TÉCNICA ANTERIOR

La determinación de la naturaleza de los materiales mediante irradiación utilizando rayos X es una técnica común, que se ha practicado durante décadas. No contamos el número de sistemas industriales basados en la irradiación de un objeto por rayos X, y el análisis de la radiación transmitida por el objeto, estando este último interpuesto entre una fuente de rayos X y un detector. Estos sistemas se suelen utilizar, por ejemplo, en el control de equipajes en los aeropuertos.

Inicialmente destinados para discriminar materiales densos, por ejemplo, metales, estas tecnologías han progresado y han hecho posible identificar materiales ligeros, susceptibles de presentar un riesgo. Un avance notable ha sido la puesta en práctica de detectores espectrométricos, que permiten la adquisición de espectros utilizables, estando expuestos a altos flujos.

Por ejemplo, la patente EP2510338 describe un método que permite determinar la naturaleza de un material, y su espesor, sobre la base de un espectro de una radiación X transmitida por dicho material. Los coeficientes $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, denominados coeficientes de atenuación o de transmisión, se calculan sobre la base del espectro. También está disponible una base de datos de calibración, realizada sobre diferentes muestras de calibración, conociendo la naturaleza y el espesor de cada muestra de calibración. Para un material del mismo tipo, se disponen de varias muestras de calibración de diferentes espesores. De este modo, cada muestra de calibración corresponde a un par $(\alpha_1^{u,v}, \dots, \alpha_n^{u,v})$, indicando los exponentes u y v , respectivamente, la naturaleza del material que constituye la muestra de calibración, así como su espesor.

A partir de los coeficientes $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ de un espectro de la radiación transmitida por un material desconocido, se identifica, en la base de datos, la muestra de calibración (material u - espesor v) cuyos coeficientes de atenuación $(\alpha_1^{u,v}, \dots, \alpha_n^{u,v})$ son los más próximos a los coeficientes medidos $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$. La naturaleza del material que constituye el objeto, así como su espesor, se consideran entonces los correspondientes a la muestra de calibración que presenta los coeficientes más próximos del objeto.

Más recientemente, el documento WO2015091083 describe un método que permite estimar el número atómico efectivo Z_{eff} de un material. Por número atómico efectivo se entiende una combinación de los números atómicos de los elementos químicos que constituyen el material. La combinación toma, en particular, la forma de una suma ponderada, asignando al número atómico de cada elemento químico de un coeficiente de ponderación que depende de la fracción másica o atómica de dicho elemento químico en el material. De este modo, si cada elemento químico que constituye el material está indexado por el índice k , una posible definición de Z_{eff} puede ser:

$$Z_{eff} = \left(\sum_{k=1}^K \eta_k (Z_{eff}^k)^z \right)^{1/z}$$

con:

η_k : fracción de masa del elemento químico k en el material;
 K : número de elementos químicos en el material;
 z : constante igual a 4,62.

Esta estimación puede establecerse aplicando una función de verosimilitud al espectro de la radiación X transmitida por el material analizado. La función de verosimilitud se establece de antemano, utilizando medidas de calibración, poniendo en práctica materiales de calibración, cuyo número atómico y espesor son conocidos. El número atómico efectivo del material analizado se puede obtener en particular mediante la puesta en práctica de un algoritmo del tipo de máxima verosimilitud, siendo el número atómico efectivo y el espesor los que maximizan la función de verosimilitud. Además, los documentos WANG XIAOLAN ET AL: "Separación de materiales en TC de rayos X con detectores de conteo de fotones resueltos por energía", MEDICAL PHYSICS, vol. 38, nº 3, 24 de febrero de 2011, páginas 1534-1546, XP012145145, DOI: 10.1118/1.3553401 y

ALESSIO ADAM M ET AL: "Caracterización cuantitativa de materiales a partir de TC con recuento de fotones de energía múltiple", MEDICAL PHYSICS, vol. 40, nº 3, 28 de febrero de 2013, páginas 31108-31108, XP012171013, DOI: 10.1118/1.4790692 también divulgan métodos similares.

- 5 Los inventores han buscado mejorar los métodos descritos con anterioridad, proponiendo una evaluación más precisa de la naturaleza del material, permitiendo establecer una estimación de la naturaleza del material, con independencia de su espesor.

SUMARIO DE LA INVENCION

10

Un objeto de la invención es un método de clasificación de un material que comprende las siguientes etapas:

- i) irradiación de una muestra, que comprende dicho material, utilizando una radiación electromagnética ionizante, denominada radiación incidente, producida por una fuente de irradiación;
- 15 ii) detección de una radiación transmitida por dicha muestra mediante un detector espectrométrico, colocándose dicha muestra entre dicha fuente de irradiación y dicho detector, y la adquisición de un espectro de la radiación así detectada, denominado espectro de transmisión, representativo de la distribución de energía de dicha radiación transmitida, comprendiendo el espectro varios canales y que representa una cantidad de fotones detectados por canal, correspondiendo cada canal a un margen de energía;
- 20 iii) determinación de un conjunto de parámetros a partir del espectro de transmisión, formando este conjunto de parámetros las coordenadas de un vector de parámetros, que representa dicho espectro de transmisión, en un espacio inicial siendo el número de parámetros del conjunto de parámetros estrictamente menor que el número de canales del espectro de transmisión;
- 25 iv) proyección de dicho vector de parámetros según al menos un vector de proyección, para obtener al menos un dato proyectado, resultando cada dato proyectado de la proyección de dicho vector de parámetros según un vector de proyección;
- 30 v) clasificación del material en función de cada dato proyectado, siendo el método tal que cada vector de proyección se determina durante una fase de aprendizaje, realizada utilizando materiales de calibración de naturaleza conocida, definiendo dichos materiales de calibración al menos dos clases distintas de materiales, comprendiendo dicha fase de aprendizaje:
 - 35 - la obtención de espectros de calibración, siendo cada espectro de calibración representativo de la distribución de energía de la radiación transmitida por un material de calibración cuando dicho material de calibración se coloca entre dicha fuente de irradiación y dicho detector espectrométrico;
 - 40 - la determinación de un conjunto de parámetros de calibración de cada espectro de calibración, formando este conjunto de parámetros las coordenadas de un vector de calibración, para obtener una pluralidad de vectores de calibración correspondientes a cada clase;
 - 45 - siendo determinado al menos un vector de proyección calculando, y en particular maximizando, a partir de cada vector de calibración, un criterio discriminante, determinado por una comparación entre:
 - un primer término, representativo de una dispersión inter-clases;
 - un segundo término, representativo de una dispersión intra-clase.

50

Según una forma de realización, existe una pluralidad de vectores de proyección, etapa iv) que permite obtener una pluralidad de datos proyectados, resultando cada dato proyectado de la proyección del vector de parámetros según un vector de proyección.

55

En particular, es posible tener un número predeterminado de clases de materiales, etapa v) que consiste en clasificar el material según una de dichas clases de material. Una clase de materiales puede corresponder a un material en particular o a un grupo de materiales.

60

La etapa iv) puede incluir la proyección de dicho vector de parámetros en un espacio de llegada, formando entonces cada vector de proyección una base, denominada base de llegada, de dicho espacio de llegada. El número de vectores que forman dicha base de llegada puede, en particular, ser estrictamente menor que el número de clases de materiales.

65

Según una forma de realización, el espectro de transmisión se normaliza, término a término, por un espectro de la radiación incidente, siendo este último representativo de la distribución de energía de dicha radiación incidente.

El espectro de transmisión comprende N canales, siendo el número P de parámetros del conjunto de parámetros estrictamente menor que N , y de manera preferible menor que $N/2$ o incluso $N/4$. En condiciones normales, el número P de parámetros es menor que 50, o incluso menor que 30, o incluso menor que 20. P puede estar comprendido, por ejemplo, entre 2 y 20.

Según una forma de realización, el espectro de transmisión se define en una pluralidad de canales, y al menos un parámetro corresponde a:

- una referencia del canal del espectro de transmisión que comprende el número máximo de fotones detectados;
- o una relación entre los contenidos de dos canales diferentes;
- o una tasa de variación entre los contenidos de dos canales diferentes.

Se puede obtener al menos un vector de proyección determinando, a partir de cada vector de calibración:

- una primera matriz representativa de una dispersión inter-clases de los vectores de calibración,
- una segunda matriz, representativa de una dispersión intra-clase de los vectores de calibración,
- una tercera matriz, formada por un producto matricial de una matriz inversa de dicha segunda matriz por dicha primera matriz.

De manera preferible, cada vector de proyección se determina mediante análisis discriminante lineal, que se lleva a cabo considerando cada vector de calibración. Un vector de proyección puede ser un vector propio de dicha tercera matriz. El análisis discriminante lineal permite obtener una discriminación óptima de los datos proyectados, según las diferentes clases consideradas.

Otro objeto de la invención es un dispositivo para caracterizar el material contenido en una muestra que comprende:

- una fuente de irradiación, capaz de emitir una radiación electromagnética ionizante, denominada radiación incidente, hacia dicha muestra,
- un detector espectrométrico, capaz de detectar la radiación transmitida por la muestra cuando la muestra, expuesta a dicha radiación incidente, se interpone entre la fuente de irradiación y el detector espectrométrico,
- caracterizándose el dispositivo porque comprende un procesador, capaz de recibir datos medidos por el detector espectrométrico y configurado para poner en práctica el método descrito con anterioridad y en el resto de la descripción, estando conectado el procesador a una memoria en donde al menos se almacena un vector de proyección.

Otro objeto de la invención es un soporte de grabación de información, legible por ordenador, que comprende instrucciones para la ejecución de un método descrito con anterioridad y en el resto de la descripción.

FIGURAS

La Figura 1 representa una forma de realización de un dispositivo que permite la puesta en práctica de un método según la invención.

La Figura 2 representa los espectros de la radiación transmitida por un material de polietileno, para diferentes espesores k , respectivamente iguales a 2 cm, 4 cm, 8 cm y 12 cm. El eje de abscisas corresponde a la referencia para cada canal en el espectro, mientras que el eje de ordenadas representa el número de fotones detectados por canal.

La Figura 3 representa las etapas principales de un método según la invención.

La Figura 4 representa los espectros de transmisión de diferentes materiales de naturaleza j y de diferentes espesores k . En cada una de estas figuras, el eje de abscisas corresponde a la referencia de cada canal del espectro, mientras que el eje de ordenadas "Nb Fotones" representa el número de fotones detectados por canal.

La Figura 5 representa dos poblaciones pertenecientes a dos clases diferentes C_1 y C_2 , así como dos ejes FA y PA adaptados a la clasificación de estas poblaciones según una de estas clases.

La Figura 6 representa puntos, representando cada punto un espectro de calibración asociado con el material de calibración, en un plano definido por dos vectores de proyección w_1 y w_2 .

La Figura 7 representa puntos, representando cada punto un espectro de prueba asociado con un material de prueba, en un plano definido por dos vectores de proyección w_1 y w_2 .

La Figura 8 representa puntos correspondientes a espectros de prueba, en un plano definido por dos ejes. El eje de abscisas representa una estimación del número atómico efectivo y el eje de ordenadas y representa una estimación de una longitud equivalente de polietileno multiplicada por la densidad del polietileno.

5 DESCRIPCIÓN DE LAS FORMAS DE REALIZACIÓN PREFERIDAS

La Figura 1 muestra una forma de realización de un dispositivo 1 que pone en práctica un método según la invención. Una fuente de irradiación 11 emite una radiación electromagnética ionizante 12, denominada radiación incidente, hacia una muestra 10 que comprende un material a identificar. El término radiación electromagnética ionizante designa una radiación electromagnética con una energía superior a 1 keV, y de manera preferible inferior a 100 MeV. El margen de energía de la radiación ionizante puede estar comprendido entre 1 keV y 5 MeV, pero con mayor frecuencia se extiende entre 1 keV y 150 keV o 300 keV. La radiación ionizante puede ser una radiación X o γ . De manera preferible, la fuente de radiación ionizante es polienérgica, siendo la radiación incidente emitida en un margen de energía que suele extenderse a lo largo de varias decenas o incluso centenas de keV. Estos incluyen un tubo emisor de rayos X.

El espesor de la muestra 10 está comprendido entre unos pocos mm y unos pocos cm, o incluso decenas de cm. Suele ser inferior a 30 cm, o incluso a 50 cm.

La muestra 10 transmite parte de la radiación incidente 12 hacia un detector espectrométrico 16. De hecho, la radiación incidente puede sufrir, en la muestra, diferentes interacciones, por ejemplo, un efecto fotoeléctrico, una difusión inelástica de Compton, o incluso un efecto de creación de pares cuando la energía de la radiación incidente lo permite.

Además, bajo el efecto de la irradiación por la radiación incidente 12, la muestra transmite una radiación 14, denominada radiación transmitida, hacia un detector espectrométrico 16. El detector espectrométrico 16 es capaz de detectar la radiación transmitida 14 y de formar un espectro de energía de la radiación 14 así detectados.

La radiación 14 transmitida comprende una pluralidad de fotones X cuya energía está comprendida entre una energía mínima $E_{\min}$ y una energía máxima $E_{\max}$. El detector 16 detecta los fotones que constituyen esta radiación y genera, por cada fotón detectado, un pulso electrónico cuya amplitud depende de la energía del fotón. Más concretamente, la amplitud es proporcional a la energía perdida por el fotón en el detector, dependiendo este última de la energía de dicho fotón. Este detector 16 comprende un circuito electrónico de espectrometría 18, capaz de registrar la amplitud de cada pulso generado durante un período de adquisición T , y de establecer un histograma de la amplitud de los pulsos formados durante este período de adquisición. A continuación, se obtiene un espectro de amplitud, o espectro de energía Sp , representativo de la distribución de energía de la radiación transmitida 14. Se puede obtener una relación entre la amplitud A y la energía E mediante una función de calibración de energía f tal que $E = f(A)$, según los principios conocidos por los expertos en esta técnica.

Dicho espectro Sp está representado en la Figura 2, que ilustra un espectro de la radiación 14 transmitido por muestras de polietileno, cuyo espesor k varía entre 2 cm y 12 cm. El eje de abscisas corresponde a la amplitud A (o la energía $E = f(A)$), discretizada en una pluralidad de canales de amplitud, mientras que el eje de ordenadas representa el contenido de cada canal, es decir, el número de pulsos detectados, o el número de pulsos detectados por unidad de tiempo. Por tanto, un espectro de energía representa, para una pluralidad de canales, un número de fotones detectados por canal, correspondiendo cada canal a un margen de energía. Cada canal puede ser identificado por un índice n tal como $1 \leq n \leq N$, siendo el número de canales N mayor o igual a 2. A cada canal E_n se le asigna el número de pulsos $Sp(E_n)$ cuya energía está incluida en el margen E_n y $E_n + \Delta E_n$. Para cualquier n comprendido entre 1 y $N-1$, $E_n \leq E_{n+1}$.

Es frecuente normalizar, término por término, el espectro de energía de la radiación 14 transmitido por la muestra 10 mediante un espectro Sp_0 establecido sin la muestra 10 interpuesto entre la fuente 11 y el detector 16. El espectro Sp_0 es representativo de la distribución de energía de los fotones que constituyen la radiación incidente 12. Se obtiene entonces una función espectral de transmisión TR , tal que, para cada canal de energía E_n , se verifica

$$TR(E_n) = \frac{Sp(E_n)}{Sp_0(E_n)}$$

Entonces, es posible determinar una función espectral de atenuación Att de la muestra 10, tal que para cada canal de energía E_n , $Att(E_n) = -\ln [TR(E_n)]$.

En el resto de la descripción, se describe un método, cuyos datos de entrada son el espectro Sp de la radiación transmitida por el material, denominado espectro de transmisión, sabiendo que este método se aplica a cualquier función espectral que ponga en práctica este espectro, y en particular a las funciones espectrales de transmisión o de atenuación, tales como las definidas con anterioridad.

Un procesador 20, por ejemplo, un microprocesador, es capaz de procesar cada espectro de transmisión medido por el detector espectrométrico 16. En particular, el procesador es un microprocesador conectado a una memoria

programable 22 en donde se almacena una secuencia de instrucciones para realizar las operaciones de procesamiento de espectros y de cálculo descritas en esta descripción. Estas instrucciones se pueden guardar en un soporte de grabación legible por el procesador, tal como un disco duro, un CDROM u otro tipo de memoria. El procesador puede estar conectado a una unidad de visualización 24, por ejemplo, una pantalla.

En relación con la Figura 3, se describirá a continuación las etapas principales de una forma de realización de un método según la invención.

La primera etapa 100 es una etapa de irradiación de la muestra utilizando el tubo generador de fotones X.

La segunda etapa 200 es una etapa de adquisición, que consiste en adquirir, mediante el detector espectrométrico 16, un espectro de transmisión Sp de una muestra 10, que comprende un material cuya naturaleza se desea determinar. Esta etapa se pone en práctica de manera simultánea con la primera etapa 100. Este espectro Sp lleva información sobre la naturaleza del material examinado, pero esta información se difunde a través de los N canales de energía $E_1...E_n...E_N$ según los cuales el espectro es definido. Este número N es mayor o igual a 2, pero suele ser superior que 10, o incluso superior que 100. En el ejemplo considerado, $N = 130$.

Los inventores consideraron que era preferible concentrar la información reduciendo el número de variables, de modo que un espectro de transmisión Sp se pueda representar por un número P de parámetros ($x^1, ..., x^P$), con, de manera preferible, $2 \leq P \leq 20$ y $P < N$.

Además, durante una tercera etapa 300 de reducción del número de variables, o de reducción de la dimensionalidad, se determinan a partir del espectro de transmisión Sp , P parámetros ($x^1, ..., x^P$) representativos de este espectro. En este ejemplo:

- el primer parámetro x^1 corresponde al índice del canal que recoge el mayor número de pulsos. De este modo, $x_1 = \arg\max_n (Sp(E_n))$
- el segundo parámetro x^2 corresponde a una relación entre la integral de los canales extendiéndose según un margen espectral $[x_1 - \delta; x_1 + \delta]$, de mitad de anchura δ , a cada lado del canal referenciado por el primer parámetro x^1 , en la integral del espectro con, en este ejemplo, $\delta = 10$.

$$x_2 = \frac{\sum_{n=x_1-\delta}^{n=x_1+\delta} Sp(E_n)}{\sum_{n=1}^N Sp(E_n)} = \frac{\sum_{n=x_1-10}^{n=x_1+10} Sp(E_n)}{\sum_{n=1}^N Sp(E_n)}$$

De este modo,

- el tercer parámetro x^3 corresponde a una relación entre el contenido de los canales ubicados entre dos canales de índice r y $r + s$ respectivos, en la integral del espectro. Por ejemplo, $r = s = 30$, entonces:

$$x_3 = \frac{\sum_{n=r}^{n=r+s} Sp(E_n)}{\sum_{n=1}^N Sp(E_n)} = \frac{\sum_{n=30}^{n=60} Sp(E_n)}{\sum_{n=1}^N Sp(E_n)}$$

- el cuarto parámetro x_4 corresponde a una relación entre el contenido de canales en un margen de baja energía, es decir, reunir canales de índices bajos, y el contenido de canales en un margen de energía alta, es decir, reunir canales de mayores índices. El margen de índices bajos se extiende entre los índices n_{inf1} y n_{inf2} , mientras que el margen de índices altos se extiende entre n_{sup1} y n_{sup2} , con $n_{sup2} > n_{inf2}$ y de manera preferible $n_{inf2} \leq n_{sup1}$. Por ejemplo, n_{inf1} , n_{inf2} , n_{sup1} y n_{sup2} son, respectivamente, iguales a 1, 30, 50 y 130, se tiene:

$$x_4 = \frac{\sum_{n=n_{inf1}}^{n=n_{inf2}} Sp(E_n)}{\sum_{n=n_{sup1}}^{n=n_{sup2}} Sp(E_n)} = \frac{\sum_{n=1}^{n=30} Sp(E_n)}{\sum_{n=50}^{n=130} Sp(E_n)}$$

- los parámetros quinto, sexto y séptimo son tasas de variación entre dos canales diferentes, ubicados, respectivamente, en un margen de índice bajo $[m_{inf1}, m_{inf2}]$, en un margen de energía media $[m_{ave1}, m_{ave2}]$ y en un margen de energía alta $[m_{sup1}, m_{sup2}]$, con $m_{inf2} < m_{ave2} < m_{sup2}$ y de manera preferible $m_{inf2} \leq m_{ave1}$ y/o $m_{ave2} \leq m_{sup1}$. Por ejemplo, m_{inf1} , m_{inf2} , m_{ave1} , m_{ave2} , m_{sup1} , m_{sup2} son, respectivamente, iguales a 1, 40, 40, 80, 80, 120, de modo que se verifica

$$x_5 = \frac{Sp(E_{n=m_{inf2}}) - Sp(E_{n=m_{inf1}})}{m_{inf2} - m_{inf1}} = \frac{Sp(E_{n=40}) - Sp(E_{n=1})}{39}$$

$$x_6 = \frac{Sp(E_{n=m_{ave2}}) - Sp(E_{n=m_{ave1}})}{m_{ave2} - m_{ave1}} = \frac{Sp(E_{n=80}) - Sp(E_{n=40})}{40}$$

$$x_7 = \frac{Sp(E_{n=msup2}) - Sp(E_{n=msup1})}{m_{sup2} - m_{sup1}} = \frac{Sp(E_{n=120}) - Sp(E_{n=80})}{40}$$

Se entiende que el término "tasa de variación" significa una relación entre una diferencia de los contenidos de dos canales sobre una diferencia en el índice de estos dos canales.

- El octavo parámetro x_8 corresponde a una estimación del número atómico efectivo Z_{eff} del material. Dicha estimación puede establecerse, a partir del espectro de transmisión Sp , según un método descrito en la solicitud de patente WO2015091083 mencionada con anterioridad como técnica anterior, y en particular entre las páginas 16 y 19 de esta solicitud. Tal como se indica en relación con la descripción de la técnica anterior, el número atómico efectivo corresponde a una combinación, en particular sobre la base de una suma ponderada, de los números atómicos de los distintos elementos químicos que constituyen un material, siendo los términos de ponderación las fracciones másicas o atómicas de cada elemento químico. El método descrito en la solicitud WO2015091083 tiene como objetivo establecer una función de verosimilitud durante una fase de calibración y estimar el valor del número atómico efectivo maximizando esta función de verosimilitud.

- Según una variante, se utiliza un noveno parámetro x_9 que representa el espesor EP_{ref} en un material de referencia, multiplicado por la densidad de este material de referencia. La solicitud de patente FR 15 55438, presentada el 15/06/2015, describe cómo, a partir de un espectro de transmisión Sp , se puede considerar que el material examinado es equivalente a dos espesores (EP_1 , EP_2), denominados espesores equivalentes, de dos materiales de referencia (Ref_1 , Ref_2). Esta solicitud de patente describe el establecimiento de una función de verosimilitud, durante una fase de calibración, basada en materiales de referencia conocidos y de diferentes espesores. Esta función de verosimilitud se pone en práctica a continuación para determinar los espesores equivalentes en dichos materiales de referencia, a partir del espectro de transmisión Sp de una muestra examinada, en particular según un criterio de máxima verosimilitud. Uno de estos materiales de referencia puede ser polietileno PE, en cuyo caso el noveno parámetro x_9 corresponde al espesor equivalente de polietileno EP_{PE} , determinado mediante la puesta en práctica de un método tal como el descrito en esta solicitud de patente, multiplicado por la densidad del polietileno ρ_{PE} . De este modo, $x_9 = EP_{PE} \times \rho_{PE}$. Este noveno parámetro es opcional.

Estos 9 parámetros definen un punto M, representativo del espectro de transmisión Sp , en un espacio ζ denominado espacio inicial. La base B de este espacio inicial ζ está formada por vectores base ($v_1, \dots, v_P$) respectivamente asociados a cada parámetro, de manera que la proyección del punto M sobre cada uno de estos vectores base corresponde al valor del parámetro al que este vector base está asociado. Dicho de otro modo, los parámetros ($x_1, \dots, x_P$) representan el punto de coordenadas M en el espacio inicial ζ . También corresponden a las coordenadas de un vector V_M , asociado al punto M, de dimensión (P, 1) y que comprende las coordenadas ($x_1, \dots, x_P$) del punto M. Este vector V_M se denomina vector de parámetros, porque reúne parámetros representativos del espectro de transmisión Sp .

La cuarta etapa 400 es una etapa de proyección, durante la cual el vector de parámetros V_M se proyecta según al menos un vector de proyección w_i , para permitir la clasificación de este punto en una clase que representa un material dado. Lo que antecede también corresponde a una proyección del punto M a lo largo de dicho vector de proyección.

Más concretamente, un objetivo del método es determinar la naturaleza de un material clasificándolo en una clase predeterminada de materiales. Entonces se dispone de un número C de clases C_j , con $1 \leq j \leq C$, correspondiendo cada clase a un material, y el método permite identificar la clase a la que pertenece el material examinado. Previamente se ha determinado un número W de vectores de proyección $w_1, \dots, w_W$, siendo cada vector de proyección de dimensión (P, 1), para proyectar el vector de parámetros V_M según cada uno de estos vectores de proyección. Estos vectores de proyección se definen durante una fase de calibración del método descrito a continuación, en relación con las etapas 100' a 400' representadas en la Figura 3. Definen una base de un espacio de llegada ζ' . Estos vectores de proyección se almacenan en una memoria 22 conectada al procesador 20.

La proyección, según cada uno de los vectores de proyección, equivale a determinar las coordenadas ($y_1, \dots, y_W$) del vector de parámetros V_M en el espacio de llegada ζ' , permitiendo estas coordenadas una clasificación del punto en una de las C clases de materiales. Cada coordenada y_w , con $1 \leq w \leq W$, representa un parámetro de clasificación. Se entiende por "parámetro de clasificación" un parámetro a partir del cual se realiza la clasificación.

Conviene señalar que la radiación transmitida 14 se muestra en primer lugar:

- por un espectro de transmisión Sp , de dimensión (N, 1),
- a continuación por un vector de parámetros V_M , ζ de dimensiones (P, 1), que representan las coordenadas ($x_1, \dots, x_P$) de un punto M, representativo del espectro Sp , en el espacio inicial ζ , con $P \leq N$;
- a continuación, mediante un vector de parámetros V_M , ζ de dimensión (W, 1) que representan las coordenadas ($y_1, \dots, y_W$) de dicho punto M en el espacio de llegada ζ' , de dimensión W, estando este espacio asociado a una

base B' definida por los W vectores de proyección ($w_1...w_i...w_w$). Las coordenadas ($y_1,..., Y_w$) constituyen entonces los parámetros de clasificación.

El número W de vectores de proyección es menor o igual que P. De manera preferible, el número W de vectores de proyección es igual al número C de clases menos uno, pero también puede ser menor. Además, de manera preferible, $W = C-1$, pero también se puede tener $W \leq C-1$. En este ejemplo, se considera que $W = C-1$.

La quinta etapa 500 es una etapa de clasificación, que permite asignar una clase C_j al material analizado, siendo esta clase representativa de la naturaleza de este material, o de un grupo de materiales. Se determina en función de los parámetros de clasificación ($y_1,..., Y_w$), que constituye las coordenadas del vector de parámetros V_M, ξ' en el espacio de llegada ξ' .

Esta etapa es convencional y equivale a identificar, en el espacio de llegada ξ' , la clase a la que pertenece el vector de parámetros V_M, ξ' que representa el espectro S_p en este espacio. Entonces se considera que la naturaleza del material analizado es la del material asociado con esta clase. La identificación de la clase más cercana se puede realizar calculando una distancia entre el vector de parámetros y un vector que representa el centro de cada clase, pudiendo ser ponderada esta distancia por un término de dispersión específico para cada clase. Este tipo de operación es bien conocida por los expertos en esta técnica.

En este ejemplo, el número de clase C es igual a 6, representando cada clase C_j , $1 \leq j \leq 6$, respectivamente, el TNT (acrónimo de Trinitrotolueno), polietileno, PMMA (metacrilato de metilo), PTFE (politetrafluoroetileno), agua y nailon.

La etapa de proyección 400 requiere el uso de al menos un vector de proyección w_i , o un conjunto de vectores de proyección ($w_1...w_i...w_w$).

Estos vectores de proyección se definen durante una fase de aprendizaje, realizada antes de la proyección, y comprende las etapas 100' a 400', mostradas en la Figura 3, y descritas a continuación.

La primera etapa 100' de la fase de aprendizaje tiene como objetivo determinar una pluralidad de muestras de calibración, cuya naturaleza es conocida y representativa de los materiales que se desean identificar posteriormente.

En este ejemplo, se utilizaron 24 muestras de calibración Cal_j^k , correspondiendo cada muestra de calibración Cal_j^k de naturaleza j a una clase C_j , y de espesor k, expresándose este último en cm.

En este ejemplo, se dispone de:

- cuatro muestras de calibración $Cal_1^{k=2}, Cal_1^{k=4}, Cal_1^{k=8}, Cal_1^{k=12}$ de TNT, correspondiente a la clase C_1 ;
- cuatro muestras de calibración $Cal_2^{k=2}, Cal_2^{k=4}, Cal_2^{k=8}, Cal_2^{k=12}$ de polietileno, correspondiente a la clase C_2 ;
- cuatro muestras de calibración $Cal_3^{k=2}, Cal_3^{k=4}, Cal_3^{k=8}, Cal_3^{k=12}$ de PMMA, correspondiente a la clase C_3 ;
- cuatro muestras de calibración $Cal_4^{k=2}, Cal_4^{k=4}, Cal_4^{k=8}, Cal_4^{k=12}$ de PTFE, correspondiente a la clase C_4 ;
- cuatro muestras de calibración $Cal_5^{k=2}, Cal_5^{k=4}, Cal_5^{k=8}, Cal_5^{k=12}$ de agua, correspondiente a la clase C_5 ;
- cuatro muestras de calibración $Cal_6^{k=2}, Cal_6^{k=4}, Cal_6^{k=8}, Cal_6^{k=12}$ de nailon, correspondiente a la clase C_6 .

La segunda etapa 200' de la fase de aprendizaje es una etapa de determinar una pluralidad de espectros de calibración, por ejemplo 20 espectros de calibración $Sp(Cal_j^k, l)$, para cada muestra de calibración Cal_j^k . Cada espectro de calibración $Sp(Cal_j^k, l)$ corresponde a la forma de realización l de un espectro de calibración relativo a la muestra de calibración Cal_j^k de naturaleza j y espesor k. Siendo l un número entero mayor o igual que 1. En este ejemplo, $1 \leq l \leq 20$.

Estos espectros de calibración se pueden realizar de forma experimental o simulados utilizando un código de cálculo, por ejemplo, en un código de cálculo estadístico basado en un método de tipo Monte Carlo u otro código conocido por los expertos en esta técnica. En el caso de una simulación, cada espectro de calibración se ve afectado por un ruido, que puede modelarse mediante un ruido de Poisson. La Figura 4 representa ejemplos de espectros de calibración, obtenidos para diferentes muestras de calibración, de diferentes espesores k, correspondientes, respectivamente, a las clases $j=1, j=2, j=3, j=4, j=5$ y $j=6$.

En este ejemplo, cada clase está asociada con un material en particular. Sin embargo, es posible que una clase esté asociada con una mezcla de materiales, o con materiales del mismo grupo, por ejemplo, materiales considerados inofensivos, potencialmente peligrosos o incluso muy peligrosos.

La tercera etapa 300' de la fase de aprendizaje es una etapa de reducción del número de variables, o de reducción de la dimensionalidad, en donde se determina, a partir de cada espectro de calibración $Sp(Cal_j^k, l)$, P parámetros de calibración $\{x_1^{j,k,l}, \dots, x_P^{j,k,l}\}$ representativos de este espectro. Se entenderá que estos parámetros son idénticos a los descritos en relación con la etapa 300. Por lo tanto, cada espectro de calibración $Sp(Cal_j^k, l)$ puede ser representado por un punto $M(Cal_j^k, l)$, cuyas coordenadas son $\{x_1^{j,k,l}, \dots, x_P^{j,k,l}\}$, constituyendo estas coordenadas también los términos de un vector de calibración $V_M(Cal_j^k, l)$.

La cuarta etapa 400' consiste en determinar W vectores de proyección $w_1, \dots, w_W$, con $W \leq C-1$, que permite obtener una clasificación óptima de cada espectro de calibración $Sp(Cal_j^k, l)$. La clasificación óptima significa que un número máximo de espectros de calibración $Sp(Cal_j^k, l)$ se clasifican en la clase C_j correspondiente a la naturaleza j de la muestra de calibración.

Estos vectores de proyección se pueden obtener mediante una técnica de análisis discriminante predictiva, conocida por el acrónimo LDA (Linear Discrimination Analysis, en inglés, que significa análisis discriminante lineal), este método confiere un poder discriminante que es particularmente interesante en comparación con otras técnicas de reducción de dimensionalidad, por ejemplo, la descomposición en componentes principales (o PCA: Principal Component Analysis).

Aplicada a dos clases, la clasificación por LDA equivale a determinar un eje, denominado eje discriminante de Fisher, que permite una separación entre las poblaciones pertenecientes a dos clases. La Figura 5 es un ejemplo que muestra dos clases C_1 y C_2 , representadas en un espacio inicial ξ en dos dimensiones. Cada clase incluye una población representada por puntos, formando dos conjuntos ovoides. También se han mostrado el eje principal PA, determinado por PCA, así como el eje discriminante de Fisher FA, determinado por LDA. Cuando la población de cada clase se proyecta sobre el eje principal PA, se observa un margen de superposición $\Delta_{PA/FA}$, en donde ciertos puntos de las clases C_1 y C_2 se superponen después de la proyección. Por tanto, esta proyección no permite una separación clara entre las dos clases. Por el contrario, cuando la población de cada clase se proyecta sobre el eje discriminante de Fisher FA, los puntos proyectados de cada clase no se superponen y están espaciados por una distancia $\delta_{PA/FA}$ no nula, lo que atestigua una separación correcta entre las dos clases. En este ejemplo, el espacio de llegada ξ' , de dimensión 1, corresponde al eje FA.

En general, la clasificación por LDA se basa en un criterio discriminante, determinado por una comparación, generalmente en forma de una relación entre:

- un primer término, representativo de una dispersión inter-clases,
- y un segundo término, representativo de una dispersión intra-clase.

Este criterio puede ser un criterio discriminante denominado de Fisher, tal como se define a continuación.

Dicho criterio discriminante permite definir un vector de proyección, que define un eje de discriminación, de modo que los datos proyectados a lo largo de este eje se utilicen como parámetros de clasificación.

Las dispersiones inter-clases o intra-clase mencionadas con anterioridad se determinan utilizando los vectores de calibración $V_M(Cal_j^k, l)$ asociados con materiales de calibración Cal_j^k de clases j diferentes.

O sea, m_j es el vector de dimensión (P, 1), que representa la media de los vectores de calibración $V_M(Cal_j^k, l)$ asociados con la misma clase C_j . El vector m_j es tal que para cualquier número entero p , tal como 1 se verifica $\leq p \leq P$, $m_j(p) = \text{mean}_{k,l}[V_M(Cal_j^k, l)(p)]$. Se puede definir una matriz de dispersión inter-clases Σ_{inter} , de dimensión $C \times C$, como:

$$\Sigma_{inter} = \frac{1}{C} \sum_{j=1}^C (m_j - m)(m_j - m)^T$$

m indica el vector medio de los vectores medios m_j asociados con cada clase j , de tal modo que designando el operador la media aritmética, el exponente T designando el operador transportado.

También se define una matriz de dispersión intra-clase Σ_{intra} , de dimensión (P, P) tal que

$$\Sigma_{intra} = \sum_{j=1}^c S_j$$

Con, para cada clase j ,

$$S_j = \sum_{k,l} (v_M(Cal_j^k, l) - m_j) (v_M(Cal_j^k, l) - m_j)^T$$

Los vectores de proyección deseados, de dimensión $(P,1)$, son los que maximizan el criterio de Fisher $J(w)$, mencionado con anterioridad, tal como

$$J(w) = \frac{w^T \Sigma_{inter} w}{w^T \Sigma_{intra} w}$$

Los vectores de w soluciones corresponden a los vectores propios de una matriz Σ de dimensión (P, P) tal que

$$\Sigma = \Sigma_{intra}^{-1} \times \Sigma_{inter}$$

A continuación, se determina un conjunto $w_1, \dots, w_W$ de W de vectores de proyección w_i , con $1 \leq i \leq W$, y $W \leq C-1$. En este ejemplo, $W = C-1$, de modo que se determina un conjunto de vectores de proyección $w_1, \dots, w_{C-1}$

El vector de proyección w_i puede ser el vector propio asociado al valor propio cuyo valor absoluto es el más alto, estando asociados los vectores w_i con los índices más bajos, respectivamente, con los valores propios de los cuales el valor absoluto es cada vez menos alto. Dicho de otro modo, cada vector de proyección w_i es tal que el valor propio asociado con el mismo presenta un valor absoluto mayor que el asociado con el vector de proyección w_{i+1} , con $1 \leq i \leq W-1$.

Los vectores de proyección definidos durante la etapa 400' se almacenan en la memoria 22, para ser utilizados durante la etapa de proyección 400 cuando se determina un material desconocido.

Esta etapa de determinación de los vectores de proyección $w_1, \dots, w_W$ requiere la inversión de la matriz Σ_{intra} . La etapa de reducción de dimensionalidad 300' es importante cuando el número N de canales de los espectros de calibración es mayor que 10 o 20, lo que suele ser el caso. De hecho, si la matriz Σ_{intra} se determina directamente a partir de los espectros de calibración (Cal_j^k, l) , de dimensión $(N, 1)$, probablemente no sería invertible, debido al valor excesivamente alto de N . La etapa 300' permite entonces utilizar un número reducido de parámetros P . La reducción de dimensionalidad permite por tanto la definición de los vectores de proyección w_i .

Para probar la relevancia de los vectores de proyección determinados después de la etapa 400', se llevó a cabo una primera prueba proyectando los espectros de calibración $Sp(Cal_j^k, l)$ establecidos durante la etapa 200'. Durante esta primera prueba, se llevan a cabo las etapas 200 a 400 descritas con anterioridad, en base a estos espectros de calibración. La Figura 6 representa cada punto $M(Cal_j^k, l)$, representativo de un espectro de calibración, en un plano definido por los dos primeros vectores de proyección w_1 y w_2 . En primer lugar, se observa que cada punto $M(Cal_j^k, l)$ de la misma clase de material j se agrupa junto con los otros puntos de la misma clase, correspondientes a un espesor k y/o a una forma de realización diferente. Por lo tanto, cada clase C_j aparece bien agrupada.

O sea $y_{1,j}^k$, la coordenada del punto $M(Cal_j^k, l)$ a lo largo del eje w_1 , es decir, la proyección de $M(Cal_j^k, l)$ a lo largo de este eje. Se observa que las coordenadas $y_{1,j}^k$ permiten una separación correcta de cada clase, asociando los puntos con las clases $j = 1, j = 2, j = 3, j = 4, j = 5$ y $j = 6$ que se proyectan, respectivamente, en los márgenes de valores: [5,1 - 5,5]; [4,4 - 4,8]; [4,8 - 5,1]; [6 - 6,5]; [5,5 - 5,8]; [4,5 - 4,8].

De este modo, según este ejemplo, una sola proyección, según un único vector de proyección, en este caso w_1 , puede permitir realizar una clasificación correcta.

Un resultado notable es que la clasificación es sólida con respecto al espesor k del material.

Se llevó a cabo una segunda prueba, simulando espectros de prueba $Sp(Test_j^k)$, correspondiendo cada espectro a un material de naturaleza j y espesor k . Estos espectros de prueba son simulados. Se considera que cada simulación corresponde a una realización de la etapa 200 de adquisición de espectro.

Para cada espectro de prueba $Sp(Test_j^k)$, se ponen en práctica las etapas 300 y 400 descritas con anterioridad, permitiendo la etapa 400 obtener las coordenadas $(y_1, \dots, y_{c-1})$ que representan cada espectro según los vectores de proyección $w_1, \dots, w_{c-1}$ obtenidos utilizando espectros de calibración.

5 La Figura 7 representa cada punto $M(Test_j^k)$, representativo de cada espectro $Sp(Test_j^k)$, en un plano definido por los vectores de proyección w_1, w_2 . Se observa de nuevo que cada espectro está correctamente clasificado. Conviene señalar que la proyección, según el primer vector de proyección w_1 , lo que permite determinar un parámetro de clasificación $y_{1,j}^k$, permite una clasificación más fiable que una proyección según el segundo vector de proyección w_2 , dando lugar a un parámetro de clasificación $y_{2,j}^k$.

10 Los espectros de prueba $Sp(Test_j^k)$ además fueron tratados utilizando los métodos, con anterioridad mencionados, respectivamente descritos en las solicitudes de patente WO2015091083 y FR1555438 mencionadas con anterioridad. De este modo, se obtuvo una estimación del número atómico efectivo Z_{eff} y una estimación del espesor equivalente LPE en un material de referencia del tipo de polietileno.

15 La Figura 8 representa puntos representativos de cada uno de estos espectros en un plano cuyo eje de abscisas representa la estimación del número atómico efectivo Z_{eff} y cuyo eje de ordenadas representa el espesor equivalente LPE del polietileno multiplicado por la densidad del polietileno.

20 Conviene señalar que la clasificación en base a la estimación del número atómico efectivo permite una estimación correcta de la naturaleza j del material, mientras que la clasificación según el espesor equivalente LPE del Polietileno permite una segmentación de los materiales según su espesor k .

25 Se ha comparado el rendimiento de la clasificación realizada, en base a los espectros de prueba $Sp(Test_j^k)$, respectivamente según la estimación del número atómico efectivo Z_{eff} y según un método de clasificación según la invención, mediante la puesta en práctica de 5 vectores de proyección $w_1, \dots, w_5$.

El rendimiento de cada clasificación se estima calculando un indicador $DP_{j,j'}$, que representa el poder discriminante de un método para discriminar dos clases j y j' diferentes.

30 El poder discriminante de cada parámetro de clasificación Z se define mediante la expresión:

$$DP(Z)_{j,j'} = \frac{(mean(Z_j) - mean(Z_{j'}))}{\sigma_{Z_j}^2 - \sigma_{Z_{j'}}^2},$$

35 con:

- media (Z_j) y media $(Z_{j'})$: media de los parámetros de clasificación Z obtenidos utilizando materiales de clase j y j' respectivamente;
- 40 - $\sigma_{Z_j}^2$ y $\sigma_{Z_{j'}}^2$: varianzas de los parámetros de clasificación Z obtenidos utilizando materiales de clase j y j' respectivamente.

Cuanto mayor sea esta potencia de discriminación $DP(Z)_{j,j'}$, mejor será el parámetro de clasificación Z que permita discriminar dos clases j y j' .

45 La tabla 1 representa el poder de discriminación $DP(Z)_{j,j'}$ con $Z = Z_{eff}$, siendo entonces el parámetro de clasificación la estimación del número atómico efectivo Z_{eff} .

La Tabla 2 representa la potencia de discriminación $DP(Z)_{j,j'}$ con $Z = \sum_{i=1}^5 y_i$, siendo cada término y_i determinado por la proyección de un vector de parámetros de un espectro de prueba $V_M(Test_j^k)$ de conformidad con un vector de proyección w_i tal como se describió con anterioridad.

Tabla 1

j \ j'	1	2	3	4	5	6
1	X	87.7	6.5	30.8	5.0	22.7
2	X	0	65.7	204.5	155.9	44.1
3	X	0	0	67.7	26.1	5.9
4	X	0	0	0	13.3	107.9
5	X	0	0	0	0	57.9
6	X	0	0	0	0	0

5

Tabla 2

j \ j'	1	2	3	4	5	6
1	X	144.0	14.4	49.3	8.8	45.4
2	X	X	79.5	251.4	251.2	42.7
3	X	X	X	100.3	50.2	9.1
4	X	X	X	X	26.7	149.7
5	X	X	X	X	X	110.0
6	X	X	X	X	X	X

10 Los poderes discriminantes informados en la Tabla 2 son en promedio 1,6 veces más altos que los informados en la Tabla 1.

De este modo, la invención permite conseguir una clasificación más fiable.

15 La invención se puede poner en práctica en el campo del control no destructivo de materiales, en particular el control de equipajes.

REIVINDICACIONES

1. Método de clasificación de un material que comprende las siguientes etapas:
 - 5 i) irradiación de una muestra (10) que comprende dicho material utilizando una radiación electromagnética ionizante (12), denominada radiación incidente, producida por una fuente de irradiación (11);
 - 10 ii) detección de una radiación transmitida (14) por la muestra utilizando un detector espectrométrico (16), estando dicha muestra (10) dispuesta entre dicha fuente de irradiación (11) y dicho detector espectrométrico (16), y la adquisición de un espectro (Sp) de la radiación así detectada, denominado espectro de transmisión, representativo de la distribución de energía de dicha radiación transmitida (14), comprendiendo el espectro un número de canales (N), y representando una cantidad de fotones detectados por canal, correspondiendo cada canal a un margen de energía;
 - 15 iii) determinación de un conjunto de parámetros ($x_1, \dots, x_P$) a partir del espectro de transmisión (Sp), formando este conjunto de parámetros las coordenadas de un vector de parámetros (V_M), que representa dicho espectro de transmisión (Sp), en un espacio inicial (ξ), siendo el número de parámetros (P) del conjunto de parámetros estrictamente menor que el número de canales (N) del espectro de transmisión;
 - 20 iv) proyección de dicho vector de parámetros (V_M) según al menos un vector de proyección ($w_1, \dots, w_W$), para obtener al menos un dato proyectado ($y_1, \dots, y_W$), con cada dato proyectado resultante de la proyección de dicho vector de parámetros (V_M) según un vector de proyección;
 - 25 1. clasificación del material en función de cada dato proyectado ($y_1, \dots, y_W$), estando el método caracterizado porque cada vector de proyección (w_i) se determina durante una fase de aprendizaje, realizada con el uso de materiales de calibración (Cal_j^k) cuya naturaleza (j) es conocida, definiendo dichos materiales de calibración al menos dos clases distintas (C_j) de materiales, comprendiendo dicha fase de aprendizaje:
 - la obtención de espectros de calibración ($Sp(Cal_j^k, l)$), siendo cada espectro de calibración representativo

30 de la distribución de energía de una radiación transmitida (14) por un material de calibración (Cal_j^k) cuando dicho material de calibración está dispuesto entre dicha fuente de irradiación (11) y dicho detector espectrométrico (16);
 - la determinación de un conjunto de parámetros de calibración ($x_1^{j,k,l}, \dots, x_P^{j,k,l}$) a partir de cada espectro de

35 calibración ($Sp(Cal_j^k, l)$), formando este conjunto de parámetros las coordenadas de un vector de calibración ($V_M(Cal_j^k, l)$), para obtener una pluralidad de vectores de calibración ($V_M(Cal_j^k, l)$) correspondiente a cada clase (C_j);
 - siendo al menos un vector de proyección (w_i) determinado calculando, y en particular maximizando, a partir

40 de cada vector de calibración ($V_M(Cal_j^k, l)$), un criterio discriminante ($J(w)$), determinado por una comparación entre:
 - o un primer término (Σ_{inter}), representativo de una dispersión inter-clases;
 - o un segundo término (Σ_{intra}), representativo de una dispersión intra-clase.
 - 45 2. Método según la reivindicación 1, en donde se dispone de un número predeterminado (C) de clases de materiales, consistiendo la etapa v) en clasificar el material según una de dichas clases de material.
 3. Método según la reivindicación 2, en donde la etapa iv) comprende la proyección de dicho vector de parámetros (V_M) en un espacio de llegada (ξ'), formando entonces los vectores de proyección una base ($w_1, \dots, w_W$), denominada la base de llegada, de dicho espacio de llegada.
 4. Método según la reivindicación 3, en donde el número de vectores que forman dicha base de llegada es estrictamente menor que el número (C) de clases de materiales.
 - 55 5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el espectro de transmisión (Sp) se normaliza, término a término, por un espectro (Sp_0) de la radiación incidente, siendo este último representativo de la distribución de energía de dicha radiación incidente.
 - 60 6. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el número de parámetros (P) es menor que el número de canales dividido por 2 ($N/2$).

7. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde, estando definido el espectro de transmisión (S_p) sobre una pluralidad de canales, al menos un parámetro (x_p) comprende:

- 5 - una referencia del canal del espectro de transmisión que comprende el número máximo de fotones detectados;
- o una relación entre los contenidos de dos canales diferentes;
- o una tasa de variación entre los contenidos de dos canales diferentes;

8. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde se obtiene al menos un vector de proyección (w_i) determinando, a partir de cada vector de calibración ($V_M(Cal_j^k, l)$),

- una primera matriz (Σ_{inter}), representativa de una dispersión inter-clases,
- una segunda matriz (Σ_{intra}), representativa de una dispersión intra-clase,
- 15 - una tercera matriz (Σ), formada por un producto matricial de una matriz inversa de dicha segunda matriz por dicha primera matriz,

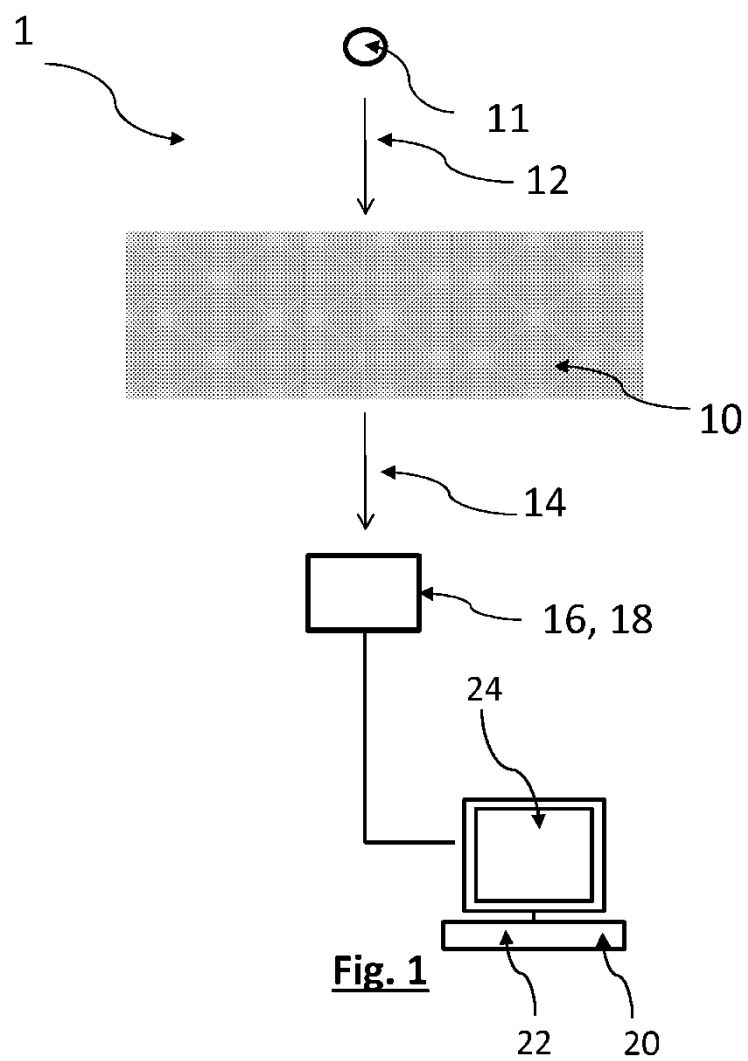
siendo dicho vector de proyección un vector propio de dicha tercera matriz.

9. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde cada vector de proyección (w_i) se determina mediante análisis discriminante lineal, considerando cada vector de calibración ($V_M(Cal_j^k, l)$).

10. Dispositivo de caracterización del material contenido en una muestra (10) que comprende:

- 25 - una fuente de irradiación (11), capaz de emitir una radiación electromagnética ionizante, denominada radiación incidente (12), hacia dicha muestra (10),
- un detector espectrométrico (16), capaz de detectar una radiación transmitida (14) por la muestra (10) cuando la muestra (10), expuesta a dicha radiación incidente (12), se interpone entre la fuente de irradiación y el detector espectrométrico,
- 30 - estando caracterizado el dispositivo porque comprende un procesador (20), capaz de recibir datos medidos por el detector espectrométrico y configurado para poner en práctica las etapas de procesamiento de datos del método objeto de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, estando el procesador conectado a una memoria (22) en donde se almacena al menos un vector de proyección ($w_1, \dots, w_W$).

11. Soporte de registro de información, que comprende instrucciones para la ejecución de las etapas de procesamiento de datos de un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, pudiendo estas instrucciones ser ejecutadas por un procesador (20).



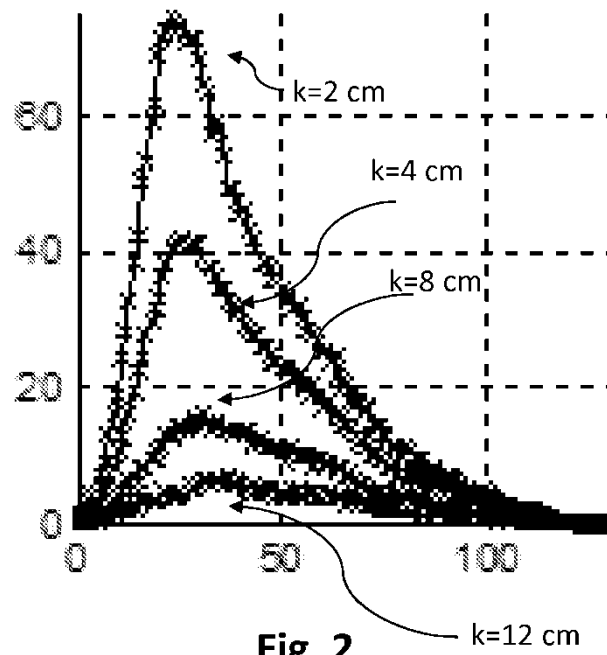


Fig. 2

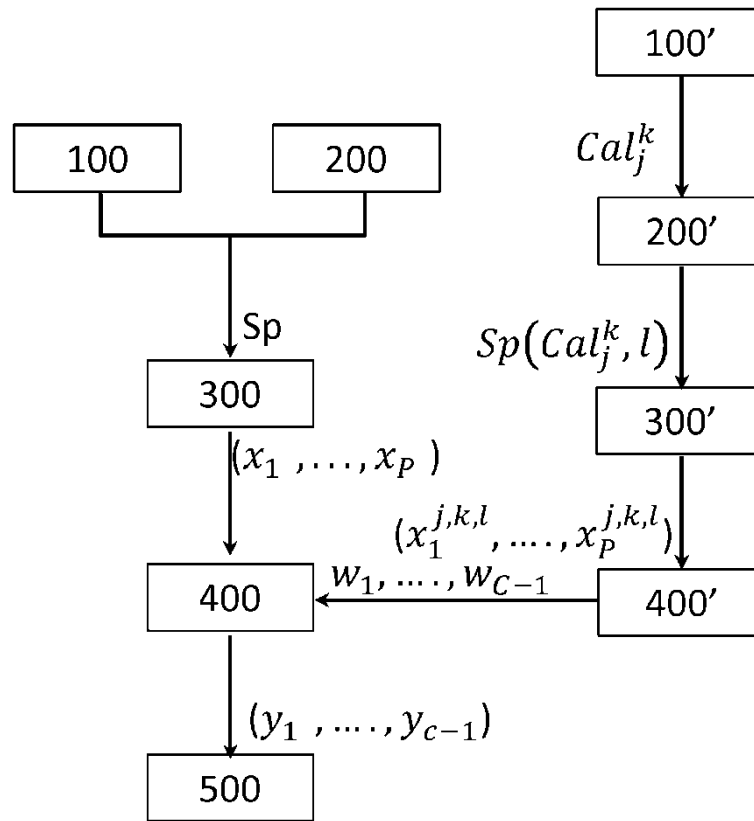


Fig. 3

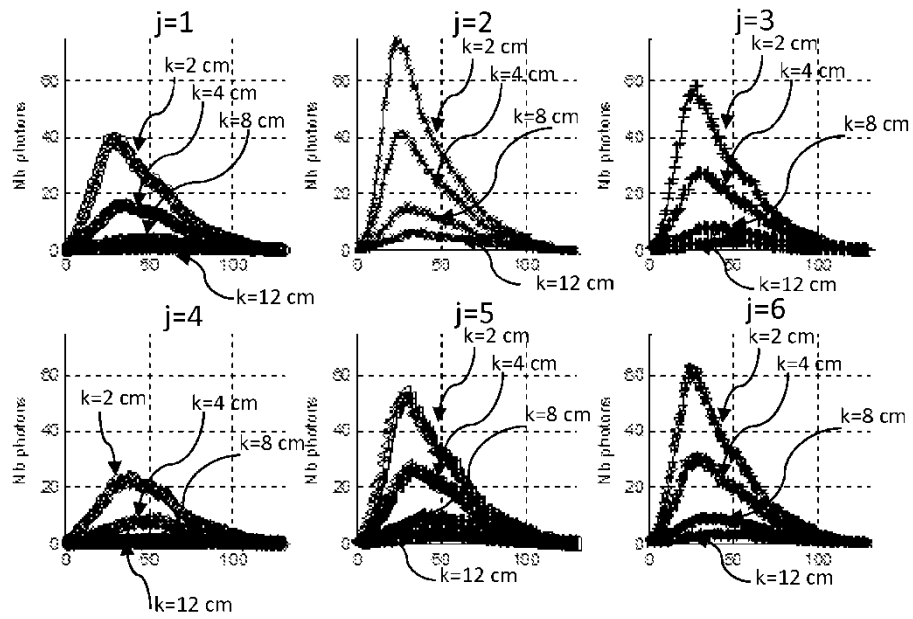


Fig. 4

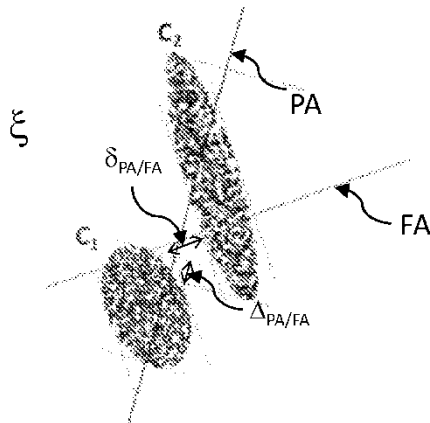


Fig. 5

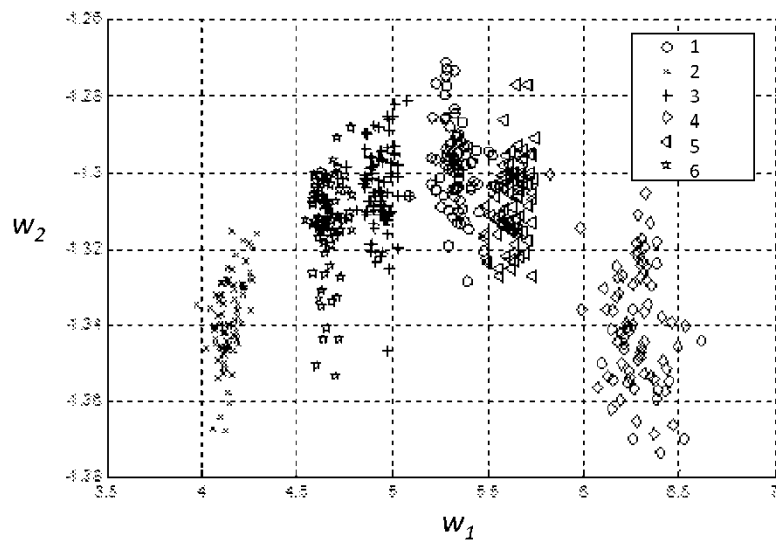


Fig. 6

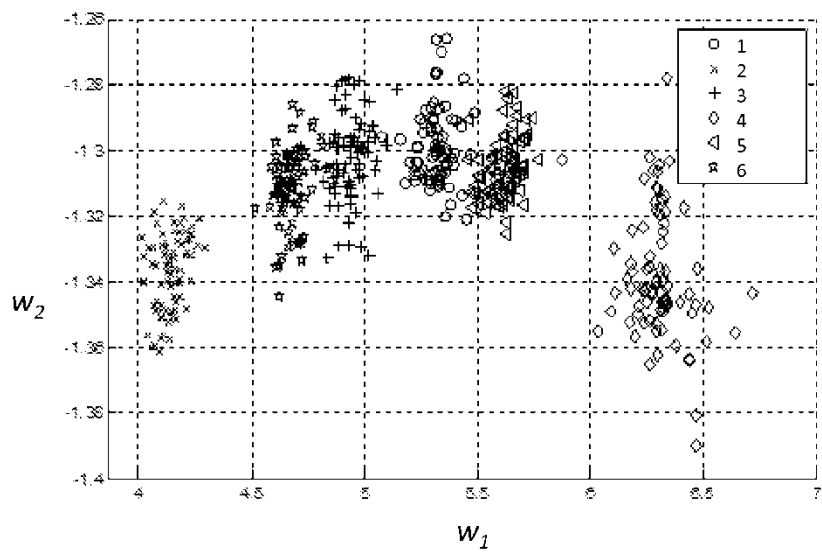


Fig. 7

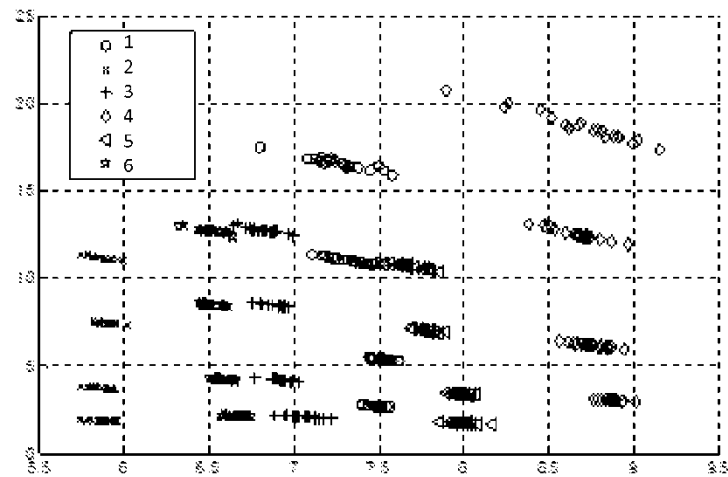


Fig. 8