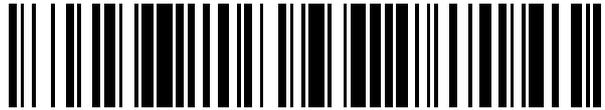


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 573 955**

21 Número de solicitud: 201431646

51 Int. Cl.:

G01J 11/00 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

11.11.2014

43 Fecha de publicación de la solicitud:

13.06.2016

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2015/000148

71 Solicitantes:

**UNIVERSITAT DE VALÈNCIA (50.0%)
Av. Blasco Ibañez, 13
46010 VALÈNCIA (Valencia) ES y
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
(50.0%)**

72 Inventor/es:

**MUÑOZ MATUTANO, Guillermo;
SALES MAICAS, Salvador;
GARCÍA CALZADA, Raúl;
CANET FERRER, Josep y
MARTÍNEZ PASTOR, Juan P.**

74 Agente/Representante:

TORNER LASALLE, Elisabet

54 Título: **Sistema, método y programa de ordenador para la medida y análisis de señales luminosas temporales**

57 Resumen:

Sistema, método y programa de ordenador para la medida y análisis de señales luminosas temporales. El sistema está previsto para el análisis de señales luminosas pulsadas moduladas temporalmente según una frecuencia f_e y comprende:

- medios de conversión tiempo-espacio que comprenden:

- unos medios de deflexión (3) para recibir una señal luminosa variable temporalmente (S_r) y convertirla en una variable espacialmente (O_r), y

- unos medios de control (6) que controlan a los medios de deflexión (3) para que operen con una frecuencia de deflexión f_d tal que:

$$\frac{f_e}{f_d} = n$$

donde n es un número natural distinto de cero;
- medios de foto-detección multicanal (4) para detectar la señal luminosa variable espacialmente (O_r); y

- medios de procesamiento (5) para procesar la señal luminosa variable espacialmente (O_r).

El método está adaptado para utilizar el sistema de la invención y el programa de ordenador implementa el procesamiento de datos del método.

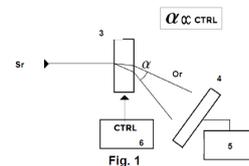


Fig. 1

DESCRIPCIÓN

Sistema, método y programa de ordenador para la medida y análisis de señales luminosas temporales

5

Sector de la técnica

La presente invención concierne en general, en un primer aspecto, a un sistema para la medida y análisis de señales luminosas temporales, que comprende medios de conversión tiempo-espacio para transformar, por deflexión, una señal luminosa variable temporalmente en una señal luminosa variable espacialmente, y medios para detectar y analizar esta última, y más particularmente a un sistema previsto para el análisis de señales luminosas pulsadas moduladas temporalmente que permite variar la frecuencia de deflexión para sincronizarla con la de la modulación temporal de las señales luminosas pulsadas.

15 En un segundo aspecto, la presente invención concierne un método adaptado para utilizar el sistema del primer aspecto.

Un tercer aspecto de la presente invención concierne a un programa de ordenador que implementa el procesamiento de datos del método del segundo aspecto de la invención.

20

La invención es particularmente aplicable a la medida de señales luminosas emitidas por fotoluminiscencia por una muestra.

Estado de la técnica anterior

25 Las técnicas de fotoluminiscencia (o fluorescencia) resuelta en tiempo son técnicas de análisis usuales de estados electrónicos con transiciones ópticas de especies en Química Orgánica, Química Inorgánica, Bioquímica, Biología Molecular, así como también en Ciencia de Materiales y Estado Sólido. Dicha técnica es una herramienta de gran capacidad pues ofrece un análisis directo de la longitud de onda, de la intensidad del pico de fotoluminiscencia/fluorescencia, como del tiempo de vida del estado electrónico responsable de la fotoluminiscencia/fluorescencia. Típicamente, el dispositivo experimental de fotoluminiscencia está compuesto por un láser de excitación, un espectrómetro y un detector monocanal o multicanal (aunque en este último caso la combinación de espectrómetro + CCD se denominaría espectrógrafo).

35

El valor del tiempo de vida puede depender de muchos factores, como por ejemplo de la interacción de la molécula responsable de la fluorescencia con el medio que la rodee, por lo

que también se puede utilizar como magnitud representativa en técnicas de bio-diagnóstico usando bio-marcadores fluorescentes. Su medida experimental se extrae del transitorio de fotoluminiscencia/fluorescencia del sistema emisor bajo estudio, cuando es excitado ópticamente (láser) o eléctricamente (diodo). En el caso de usar una fuente óptica de excitación, se usan láseres pulsados, con una anchura de pulso y una frecuencia de repetición adecuada a la resolución temporal necesitada (las más usuales varían entre los nanosegundos (ns) y los microsegundos (μ s)). Además del láser de excitación, suele usarse un espectrómetro para seleccionar la longitud de onda de la fotoluminiscencia/fluorescencia (o bien un filtro pasa-banda adecuado), así como una electrónica de correlación temporal de fotones (conocida típicamente como tarjeta TCSPC), que usa la señal del láser de excitación en su puerta de disparo (o parada) y la señal a analizar en su puerta de parada (o disparo), usando en esta última puerta un detector monocanal para contaje de fotones adecuado a las necesidades concretas de sensibilidad y resolución temporal requerida (tipo APD –fotodiodo de avalancha- o un fotomultiplicador). La electrónica TCSPC es el elemento principal de la técnica, usada por la mayoría de sistemas comerciales.

La interferometría de intensidad usando dispositivos experimentales del tipo Hanbury Brown & Twiss (conocido como HBT), es otra de las técnicas de caracterización de luz que se basa en el uso de las tarjetas TCSPC. Desde que Hanbury, Brown & Twiss propusieron su montaje experimental para medir extensiones estelares, la técnica se ha desarrollado en múltiples campos, como por ejemplo la óptica cuántica, la física de partículas o en nanotecnología. Actualmente es una técnica ampliamente usada en la caracterización de nanoestructuras cuánticas, las cuales podrían ser la base de posibles diodos emisores de fotones uno a uno o fotones entrelazados, o para el estudio de la interacción entre fotones una vez han sido emitidos. En la técnica HBT, la señal a analizar se divide en dos caminos, uno que se conectará a la puerta de disparo (START) de la tarjeta TCSPC y otro, que añade un retraso temporal respecto al primero, que se conectará a la puerta de parada (STOP) de esta misma tarjeta. Con estos sistemas se consigue medir experimentalmente la función de correlación de segundo orden ($g^2(\tau)$) de un emisor dado. El patrón de $g^2(\tau)$ en función del retraso entre los canales START y STOP está directamente relacionado con la estadística de emisión de fotones. Se dice que para una estadística de emisión térmica se obtiene un patrón de “fotones agrupados” (en inglés “bunched”), para una estadística de emisión aleatoria se obtiene un patrón plano ($g^2(\tau) = 1$), mientras que para una emisión de fotones uno a uno se obtiene un patrón de “fotones anti-agrupados” (en inglés “antibunched”). Hoy día en la técnica HBT se usan habitualmente los detectores APD, pues tienen altas eficiencias de detección y son suficientemente rápidos para poder resolver temporalmente el proceso físico de la emisión (del orden del ns), como es el caso del tiempo de vida de un

punto cuántico semiconductor, pero también de muchas otras moléculas orgánicas (con tiempos más cercanos a los μs). En estos experimentos, debido a que el rango temporal de análisis y la intensidad de la emisión del sistema físico son pequeños, la obtención de una muestra que permita reconstruir una estadística de emisión fiable suele requerir tiempos de integración del orden de las horas.

En la actualidad la técnica más usada para realizar medidas ópticas de tiempo de vida se basan en la técnica de correlación temporal de contaje de fotones (Time Correlated Single Photon Counting (TCSPC)), aunque existen otras como las basadas en el uso de Cámaras “Streak”, técnicas de “up-conversion”, sincronizado estroboscópico o métodos “boxcar”.

A continuación se citan una serie de referencias, que incluyen artículos y documentos de patente, que reflejan el estado de la técnica de la presente invención.

En el artículo “Stroboscopic fluorescence lifetime imaging”, Holton M D et al, OPTICS EXPRESS, Vol. 17, N°. 7, 2009, se describe un dispositivo para la medida de imagen de tiempo de vida de fluorescencia con condición estroboscópica que usa la respuesta integrada en tiempo de una excitación óptica periódica. El láser pulsado se acopla a un microscopio de fluorescencia y una cámara. La muestra no se ilumina directamente. Tienen un espejo dicróico pero no lo rotan. Además, este sincronizado estroboscópico se basa en el barrido de la frecuencia de repetición del láser (o LED modulado) de excitación, para contrastar la señal de fluorescencia detectada con un detector monocanal dc en función de dicho barrido. La medida quedará, por tanto, determinada por dos frecuencias, la característica del tiempo de vida del emisor estudiado ($\gamma = 1/\tau$, donde τ es el tiempo de vida de la fluorescencia) y la frecuencia de repetición del láser de la fuente de excitación (frep). El funcionamiento del dispositivo propuesto en dicho artículo no incluye hacer rotar el espejo ni utilizarlo para relacionar una medida temporal con una espacial.

En la solicitud US20010050334 se describe un método y aparato para medir pulsos electromagnéticos como una función del tiempo. Se usa un modulador óptico en combinación con una cámara “Streak”. El modulador electro-óptico transforma la intensidad óptica en una señal eléctrica proporcional que se defleca por la interacción con un campo eléctrico. Este dispositivo permite medir tiempos de vida pero no usa ningún espejo.

En el artículo “Versatile high speed rotating mirror cameras”, A. Skinner, J. SCI. Instrum., VOL. 39, 1962, y en la patente US8107809 se describen tecnologías de fotografía de ultra-

alta velocidad utilizando espejos rotatorios, siendo un tipo de dispositivo de captura de sucesión de imágenes que comparte algunos elementos con las cámaras con espejo rotatorio pero sin la matriz de lentes. En el artículo mencionado se expone un método para realizar capturas individualizadas de una imagen estática en una película fotográfica fija, y se menciona su utilidad para capturar eventos rápidos y registrarlos en una película fotográfica. El método propuesto en dicho artículo incluye el uso de un fotomultiplicador, así como la sincronización de la captura del evento al ser fotografiado con la rotación del espejo, pero no la sincronización de la excitación y el elemento deflector. Además, este tipo de captura se realiza con una sola adquisición. Por otra parte, en US8107809 usan una CCD. Ni en el citado artículo ni en US8107809 se propone la medición de tiempos de vida.

En la patente US6809816 se propone un dispositivo para medir el tiempo de caída de fluorescencia, que comprende un láser, un espejo dicróico y un fotomultiplicador. No se propone en dicha patente la realización de ninguna sincronización ni aplicar una condición estroboscópica.

En la solicitud US20130087718 se describe un dispositivo de medida de imagen de tiempo de vida de fluorescencia confocal, que comprende una fuente de excitación de luz que ilumina un área concreta y usa un espejo para escanear y obtener información de distintas partes de la muestra, así como un detector dispuesto para funcionar en sincronización con la luz pulsada de la fuente de excitación que permite la medida de la fluorescencia resuelta en el tiempo. No se propone en dicha solicitud sincronizar la frecuencia de la excitación con la frecuencia de giro del espejo.

En la patente US7453567 se describe un dispositivo y método de medida de imagen de distribución de tiempo de vida de fluorescencia. Consta de un láser pulsado y una cámara "Streak", usan un espejo mediante el que realizan un escaneado en superficie. El periodo del pulso de excitación de la luz emitida se sincroniza con el periodo de barrido de la cámara "Streak".

Finalmente, en la patente US5636050 se describe el uso de una cámara "Streak" para la medida de pulsos electromagnéticos que incluye un colimador óptico, un deflector óptico, un detector y un elemento de visualización. Se basan en la variación del índice de refracción del medio en función del tiempo. Sin embargo no realizan la deflexión con un sistema que varía la frecuencia de deflexión. La sincronización se realiza entre la excitación y la captura en el elemento de visualización. En este caso la deflexión se realiza sin usar una conversión

a electrones. El sistema descrito en esta patente reúne los elementos del preámbulo de la reivindicación 1 de la presente invención.

Explicación de la invención

- 5 Resulta necesario ofrecer una alternativa al estado de la técnica, que permita obtener un sistema y un método más eficientes y ventajosos que los conocidos, en particular que los divulgados por US5636050, y más en particular en relación al mecanismo de sincronización utilizado, que incluya la variación controlada de la frecuencia de deflexión.
- 10 Con tal fin, la presente invención concierne, en un primer aspecto, a un sistema para la medida y análisis de señales luminosas temporales, que comprende:
- medios de conversión tiempo-espacio que comprenden unos medios de deflexión configurados y dispuestos para recibir una señal luminosa variable temporalmente y convertirla en una señal luminosa variable espacialmente;
 - 15 - medios de foto-detección multicanal configurados y dispuestos para detectar dicha señal luminosa variable espacialmente; y
 - medios de procesamiento en conexión con dichos medios de foto-detección multicanal y configurados y dispuestos para recibir y procesar unos datos proporcionados por éstos y correspondientes o asociados a unos valores que la señal luminosa variable
 - 20 espacialmente tiene en cada uno de los canales de los medios de foto-detección multicanal.

A diferencia de los sistemas conocidos, el propuesto por el primer aspecto de la invención está previsto para el análisis de señales luminosas pulsadas moduladas temporalmente según una frecuencia de excitación f_e y dichos medios de conversión tiempo-espacio

25 comprenden unos medios de control que controlan a dichos medios de deflexión para que operen sincronizadamente con dicha modulación temporal con una frecuencia de deflexión f_d tal que:

$$\frac{f_e}{f_d} = n$$

donde n es un número natural distinto de cero.

- 30 Según un ejemplo de realización, los medios de deflexión comprenden como mínimo un elemento deflector de luz configurado y dispuesto para dirigir secuencialmente, bajo el control de los medios de control, diferentes porciones temporales de la señal luminosa variable temporalmente a unas correspondientes diferentes zonas de foto-detección de los medios de foto-detección multicanal, cada una asociada como mínimo a uno de los canales
- 35 de foto-detección.

De acuerdo a un ejemplo de realización preferido, el elemento (o elementos) deflector de luz es desplazable bajo el control de los medios de control para producir el citado direccionamiento de las diferentes porciones temporales de la señal luminosa variable temporalmente a las correspondientes diferentes zonas de foto-detección de los medios de foto-detección multicanal.

Para una variante de dicho ejemplo de realización preferido, el elemento (o elementos) deflector de luz es desplazable rotatoriamente alrededor de como mínimo un eje de giro, y está dispuesto para que en función de su posición angular dirija a la señal luminosa variable temporalmente, incidente sobre el mismo, hacia una u otra de las zonas de foto-detección de los medios de foto-detección multicanal, donde f_d corresponde a la frecuencia de giro del elemento deflector de luz alrededor de dicho eje de giro.

El elemento (o elementos) deflector de luz desvía la luz por reflexión y/o por transmisión, en función del ejemplo de realización.

De acuerdo con un ejemplo de realización, el elemento (o elementos) deflector de luz comprende como mínimo un espejo con una o más caras reflectantes.

Por lo que se refiere a los medios de deflexión, éstos comprenden, en función del ejemplo de realización, uno o más de los siguientes dispositivos: actuadores galvanométricos, electromecánicos, micro-electromecánicos (MEMS), o mecánicos, que contengan medios deflectores basados en reflexión, difracción o transmisión de luz, como también deflectores acusto-ópticos y/o electro-ópticos, resonadores de micro-anillos o una combinación de cualquiera de estos elementos, en variedad o número.

El sistema propuesto por el primer aspecto de la invención está aplicado, de manera preferida, a la medida y el análisis de los tiempos de vida de transiciones ópticas, o de variables relacionadas con dichos tiempos de vida.

Aunque el sistema propuesto por el primer aspecto de la invención es aplicable, para un ejemplo de realización, a una señal luminosa modulada temporalmente de manera previa mediante unos medios de modulación temporal no incluidos en el sistema, para un ejemplo de realización preferido el sistema propuesto por el primer aspecto de la invención comprende unos medios de modulación temporal encargados de llevar a cabo la citada

modulación temporal de las señales luminosas pulsadas según dicha frecuencia de excitación f_e .

5 Preferentemente, el sistema propuesto por el primer aspecto de la presente invención está aplicado a la medida de señales luminosas emitidas por fotoluminiscencia por una muestra. Los medios de modulación temporal comprenden una fuente de excitación óptica pulsada, que en particular constará de un láser. La fuente de luz quedará configurada y dispuesta para excitar a dicha muestra con una determinada frecuencia de excitación f_e . La emisión óptica de la muestra, quedará modulada temporalmente por medio de dicha excitación
10 pulsada.

Según un ejemplo de realización, los medios de foto-detección multicanal comprenden una disposición ordenada de elementos foto-detectores, por ejemplo del tipo CCD (siglas de los términos en inglés "Charge-Coupled Device": dispositivo con carga acoplada). Los medios
15 de procesamiento están programados para realizar el mencionado análisis de la señal luminosa modulada temporalmente mediante una integración, durante un tiempo determinado, de los datos recibidos en cada uno de dichos elementos foto-detectores. Este tiempo determinado de integración repercutirá en la relación señal ruido de la medida. Esto se debe a que el sistema ha convertido previamente los fenómenos temporales en
20 fenómenos espaciales.

Para un ejemplo de realización, el sistema propuesto por el primer aspecto de la invención comprende un divisor óptico configurado y dispuesto para separar la señal luminosa en dos correspondientes sub-señales luminosas y dirigirlas a dos regiones diferenciadas de los
25 medios de deflexión, estando los medios de deflexión configurados y dispuestos para, bajo el control de los medios de control, enviar una de dichas sub-señales luminosas a una de dos agrupaciones de canales de los medios de foto-detección multicanal y enviar la otra sub-señal luminosa a la otra agrupación de canales de los medios de foto-detección multicanal.

30

Para otro ejemplo de realización, que no es aplicable a medidas de correlación, el número de sub-señales luminosas es superior a dos.

Según una variante de dicho ejemplo de realización, el sistema comprende un elemento
35 óptico retardador configurado y dispuesto en el camino de una de dichas sub-señales luminosas para retardar su llegada a los medios de deflexión con respecto a la llegada de la otra sub-señal luminosa.

De acuerdo con un ejemplo de realización, relativo a la mencionada aplicación del sistema a la medida de señales luminosas emitidas por fotoluminiscencia por una muestra y a la inclusión de como mínimo dicho divisor óptico (ventajosamente también de dicho elemento óptico retardador), y en particular a la realización de medidas de correlación, los medios de foto-detección multicanal comprenden una disposición ordenada de elementos foto-detectores que incluye dos sub-disposiciones diferenciadas (que se denominarán R y L en lo subsecuente), cada una de ellas constituyendo una respectiva de dichas dos agrupaciones de canales receptoras de las dos sub-señales luminosas, y los medios de procesamiento están programados para realizar el análisis de señales luminosas temporales implementando técnicas de análisis de estadística de emisión de fotones, procesando los datos proporcionados por los medios de foto-detección multicanal en cada una de dichas sub-disposiciones ordenadas de elementos foto-detectores utilizando una función de correlación de orden 2, $g^2(\tau)$, donde τ equivale al retardo existente entre cada una de las sub-señales luminosas

Para otro ejemplo de realización, el sistema propuesto por el primer aspecto de la invención comprende un elemento óptico separador configurado y dispuesto para separar espacialmente a la señal luminosa en un continuo de sub-señales luminosas con diferentes longitudes de onda, dispersándolas según un eje Y, y dirigiéndolas a unas respectivas regiones diferenciadas de los medios de deflexión, estando los medios de deflexión configurados y dispuestos para, bajo el control de los medios de control, enviar cada una de las sub-señales luminosas a unas respectivas agrupaciones de canales de los medios de foto-detección multicanal ordenadas según un eje Y.

De acuerdo con una variante de dicho ejemplo de realización, relativo a la mencionada aplicación del sistema a la medida de señales luminosas emitidas por fotoluminiscencia por una muestra, los medios de foto-detección multicanal comprenden una disposición ordenada de elementos foto-detectores en forma de cuadrícula (por ejemplo una matriz CCD) donde cada una de dichas agrupaciones de canales está formada por una respectiva fila de elementos de foto-detección que se extiende según un eje X y que se encuentran apiladas la una sobre la otra según dicho eje Y, conformando dicha cuadrícula, de manera que los datos proporcionados por la cuadrícula de elementos foto-detectores se corresponden respectivamente con variaciones de longitud de onda, según el eje Y, y con variaciones temporales, según el eje X, y los medios de procesamiento están programados para realizar dicho análisis de señales luminosas temporales implementando técnicas de

fotoluminiscencia resuelta en tiempo y espectralmente, procesando los datos proporcionados por la cuadrícula de elementos foto-detectores.

5 Un segundo aspecto de la presente invención concierne a un método para la medida y análisis de señales luminosas temporales, que comprende:

- recibir una señal luminosa variable temporalmente y convertirla en una señal luminosa variable espacialmente, utilizando unos medios de conversión tiempo-espacio que comprenden unos medios de deflexión;

10 - detectar dicha señal luminosa variable espacialmente en unos medios de foto-detección multicanal; y

- recibir y procesar, mediante unos medios de procesamiento, unos datos proporcionados por dichos medios de foto-detección multicanal y correspondientes o asociados a unos valores que la señal luminosa variable espacialmente tiene en cada uno de los canales de los medios de foto-detección multicanal.

15

A diferencia de los métodos conocidos, el propuesto por el segundo aspecto de la invención está previsto para el análisis de señales luminosas pulsadas moduladas temporalmente según una frecuencia de excitación f_e y comprende controlar a dichos medios de deflexión para que operen sincronizadamente con dicha modulación temporal con una frecuencia de deflexión f_d tal que:

20

$$\frac{f_e}{f_d} = n$$

donde n es un número natural distinto de cero.

El método propuesto por el segundo aspecto de la invención está adaptado para utilizar el sistema del primer aspecto.

25

Para un ejemplo de realización relativo a la realización de medidas de correlación, el método propuesto por el segundo aspecto de la invención comprende utilizar el sistema del primer aspecto de acuerdo con el ejemplo de realización explicado anteriormente asociado a la implementación de técnicas de análisis de estadística de emisión de fotones, para:

30

- generar dos conjuntos de valores R y L, cada uno de ellos con los datos proporcionados por una respectiva sub-disposición ordenada de X_c elementos foto-detectores (píxeles) que contendrán como máximo n y al menos un pulso de luz; y

- calcular la función de correlación de orden 2, $g^2(\tau)$, mediante la siguiente expresión:

$$g^2(t) = \frac{(\sum_{i=1}^n R_i L_i)/n}{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} * \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n}}$$

Donde R y L representan los subconjuntos de datos que contienen como máximo n medidas y al menos una medida cada uno, correspondiente a la deflexión de como máximo n pulsos y al menos un pulso a lo largo del fotodetector de Xc píxeles. $R_i L_i$ corresponderá a la multiplicación de los elementos i de cada subconjunto R y L, donde i variará entre 1 i n de forma consecutiva.

Para una variante preferida de dicho ejemplo de realización, el método del segundo aspecto de la invención comprende:

- realizar m adquisiciones de cada una de dichas sub-señales luminosas en cada una de dichas dos sub-disposiciones ordenadas de elementos foto-detectores;
- generar cada uno de dichos subconjuntos R y L y calcular con ellos la respectiva función de correlación $g^2(t)$, para cada adquisición, calculándose en total m funciones de correlación; y
- obtener un valor final de correlación calculando el valor medio de los valores obtenidos con las m funciones de correlación.

Otros ejemplos de realización del método propuesto por el segundo aspecto de la invención comprenden la realización de medidas de fotoluminiscencia resuelta en tiempo o resuelta en tiempo y espectralmente, según los ejemplos de realización explicados arriba con respecto al sistema propuesto por el primer aspecto de la invención.

Un tercer aspecto de la presente invención concierne a un programa de ordenador que incluye instrucciones de código que cuando se ejecutan en un ordenador (o en cualquier otra clase de sistema computacional) implementan el procesamiento de datos del método del segundo aspecto de la invención.

Breve descripción de los dibujos

Las anteriores y otras ventajas y características se comprenderán más plenamente a partir de la siguiente descripción detallada de unos ejemplos de realización con referencia a los dibujos adjuntos, que deben tomarse a título ilustrativo y no limitativo, en los que:

La Fig. 1 es una representación esquemática del sistema propuesto por el primer aspecto de la invención, para un ejemplo de realización.

La Fig. 2 muestra los resultados experimentales obtenidos mediante una adquisición estándar por los presentes inventores, usando un APD (detector monocanal) y una tarjeta TCSPC, sobre una muestra fotoluminiscente, ilustrándose los resultados mediante sendas gráficas, mostrando la gráfica de la izquierda el espectro de fotoluminiscencia bajo
5 excitación continua y la de la derecha los transitorios resueltos temporalmente para las bandas observadas A-E.

La Fig. 3 muestra el espectro registrado con la técnica de modulación espacial implementada según la presente invención, para la misma muestra utilizada en la Figura 2
10 para la banda de emisión etiquetada allí como B, para un ejemplo de realización del sistema del primer aspecto de la invención para el que los medios de deflexión comprenden un espejo hexagonal girando a 2 kHz y la muestra es excitada con un láser pulsado con frecuencia de repetición de 500 kHz.

15 La Fig. 4 muestra, esquemáticamente, un ejemplo de realización del sistema propuesto por el primer aspecto de la invención, para la medida de la fotoluminiscencia resuelta en tiempo, también denominado en adelante como esquema o diseño experimental A.

La Fig. 5 muestra, esquemáticamente, otro ejemplo de realización del sistema propuesto por
20 el primer aspecto de la invención, en este caso aplicable a la realización de medidas de correlación de fotones mediante contaje de coincidencias, también denominado en adelante como esquema o diseño experimental B.

La Fig. 6 muestra, esquemáticamente, otro ejemplo de realización del sistema propuesto por
25 el primer aspecto de la invención, en este caso aplicable a la realización combinada de medidas de la fotoluminiscencia resuelta en tiempo y resuelta espectralmente, también denominado en adelante como esquema o diseño experimental C. En esta Figura, ni en las dos anteriores, no se han ilustrado ni los medios de procesamiento ni los de control de los medios de deflexión.

30

La Fig. 7 muestra el proceso de medida de la correlación de fotones en general usando el diseño experimental B de la Fig. 5.

La Fig. 8 muestra el proceso de medida concreto de la correlación de fotones por medio del
35 análisis de la función de correlación de segundo orden, que implica la definición de los operadores 1 y 2 descritos en la Fig. 7.

La Fig. 9 muestra las funciones de probabilidad de la emisión de fotones para tres distribuciones concretas: distribución Bose-Einstein (gráfica (a)), distribución de Poisson (gráfica (b)) y distribución sub-Poisson (gráfica (c)).

5 La Fig. 10 muestra los resultados obtenidos mediante unas simulaciones realizadas con el sistema y método de la presente invención, usando el análisis de la función de correlación de segundo orden descrito en las Figs. 7 y 8, usando como parámetro de entrada las funciones de probabilidad de a emisión de fotones descritas en la Fig. 9, mostrando tanto el caso ideal sin pérdidas ni ruido (Fig. 10(a)), como el caso realista en el que se incorpora el
10 50% de pérdidas del sistema y un ruido del 20% respecto a la señal óptica (Fig. 10(b)).

Descripción detallada de unos ejemplos de realización

Mediante la presente invención se presenta una nueva técnica de análisis de luz/fotones
15 basada en el multiplexado espacial de una señal óptica modulada temporalmente bajo las condiciones anteriormente descritas, que seguidamente vuelven a describirse bajo las denominaciones de “Conversión tiempo – espacio” y “Sincronización estroboscópica”.

Para ello, los detectores APD usados típicamente en las técnicas de análisis de señales
20 ópticas de baja intensidad se remplazan por un detector multicanal (caso de una CCD o de una disposición lineal de fotodiodos – en inglés PDA -) y un conversor tiempo- espacio. Los elementos básicos de esta técnica de medida pueden ser diseñados para implementar distintas configuraciones de medición, lo cual presenta una versatilidad o modularidad del equipo. Estas configuraciones son: fotoluminiscencia resuelta en tiempo, medida de la $g^2(0)$
25 y simulación de cámara “streak”. A continuación se exponen en detalle los principios de funcionamiento y las referidas condiciones 1 y 2, así como las distintas configuraciones de medida del sistema propuesto por el primer aspecto de la presente invención, para unos correspondientes ejemplos de realización.

30 *Fundamentos básicos de la tecnología:*

Un láser en régimen pulsado excitando un sistema emisor de fotones (en procesos de fotoluminiscencia/fluorescencia) fuerza a éste a emitir con la misma frecuencia de repetición, es decir f_e . Esta condición permite el control del periodo de la señal de interés. La técnica
35 aquí presentada se basa en un proceso de medida que cumple dos condiciones: 1) conversión tiempo-espacio y 2) “sincronización estroboscópico”.

Estas dos condiciones resultan necesarias para obtener una adquisición óptica resuelta en tiempo con la técnica propuesta por la presente invención. Desde el punto de vista formal, ambas condiciones se pueden definir clasificando los procesos por medio de propiedades básicas de funciones.

5

Condición 1: Conversión tiempo – espacio.

La señal óptica resuelta en tiempo que se muestra en la izquierda de la Fig. 7(a) se puede abstraer como un conjunto infinito de elementos, los cuales representan la posición temporal equiespaciada de cada pulso óptico. Por otra parte, el conversor tiempo-espacio allí ilustrado se puede identificar como una función generalizada que asocia cada elemento de este primer conjunto con un elemento del conjunto de píxeles de la CCD donde se realiza la adquisición CCD indicada. Es decir, la adquisición de los datos espaciales es resultado de la conversión de los datos temporales por parte del conversor tiempo-espacio. Formalmente, se puede escribir:

15

$$f_A: T \rightarrow X, t_i \rightarrow x_i = f_A(t_i), \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ \vdots \\ t_\infty \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ \vdots \\ x_C \end{pmatrix}$$

Bajo esta notación, el conjunto T está caracterizado por un número infinito de elementos equiespaciados, donde se cumple que $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = t_{i+1} - t_i = T_L$, donde $T_L = 1/f_e$ es el período de repetición de la señal óptica pulsada. Por otra parte, el conjunto X está compuesto por un número finito de elementos, donde x_C corresponde con el número de píxeles de la CCD.

20

La primera condición obliga a que f_A sea una función sobreyectiva entre los conjuntos T y X para $t_i \rightarrow \infty$.

25

Condición 2: Sincronización estroboscópica.

La segunda condición, sincronizado estroboscópico, fija un ratio entero positivo entre la frecuencia de la señal óptica pulsada modulada temporalmente (f_e) y la frecuencia de modulación del conversor tiempo-espacio (f_d). Llamando al factor $n = f_e/f_d$, la condición de sincronizado estroboscópico implica que $n \in \mathbb{N}$ (números naturales). Por otra parte, el factor

30

n corresponderá con el número de pulsos fijados en la modulación espacial. Esta segunda condición modifica las características de la función f_A anteriormente descrita, ya que para un x_i determinado existirán infinitos t_i que cumplan $f_A(t_i) = x_i$. En concreto, se cumplirá:

$$f_A(t_i + jT_E) = x_i ; j \in \mathbb{N}$$

5

Donde $T_E = 1/f_d$ representa el período de repetición de la modulación del conversor tiempo-espacio. En concreto, la función f_A sufre la siguiente modificación en función del valor de n:

$$\left\{ \begin{array}{l} i) f_A \text{ dejará de ser función sobreyectiva} \rightarrow n < X_C \\ ii) f_A \text{ seguirá siendo función sobreyectiva} \rightarrow n \geq X_C \end{array} \right.$$

La señal óptica únicamente podrá ser resuelta en el tiempo usando el “array” de detección (es decir la disposición ordenada de fotodetectores CCD) si se cumple la anterior condición *i*). La condición *ii*) implica que el sistema no posee la suficiente capacidad de resolución temporal para discriminar la señal óptica pulsada, ya que el número de pulsos sincronizados estroboscópicamente es mayor que el número de píxeles del array. El caso superior extremo de la condición *i*) será aquel que cumple $n = X_C/2$. Por tanto, la condición de sincronizado estroboscópico se puede resumir con:

15

$$n \leq \frac{X_C}{2}, n \in \mathbb{N}$$

Generalización:

Con objeto de reagrupar las condiciones 1 y 2 bajo un único criterio, se puede realizar una relación de equivalencia en el conjunto T. Para ello, el conjunto infinito T se divide en n subconjuntos, cuyos elementos serán equivalentes entre sí en la nueva transformación. De esta forma la dimensión del nuevo conjunto T' será finita, con cardinal n. La relación de equivalencia propuesta es:

25

$$t'_i = t_{i+j*T_E} ; j \in \mathbb{N}$$

De forma que la nueva función f_B se definirá entre los conjuntos T' y X como:

$$f_B: T' \rightarrow X, t'_i \rightarrow x_i = f_B(t'_i), \begin{pmatrix} t'_1 \\ t'_2 \\ t'_3 \\ t'_4 \\ t'_5 \\ \vdots \\ t'_{T_E} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ \vdots \\ x_C \end{pmatrix}$$

Bajo esta notación, el efecto de la conversión temporal-espacial y del sincronizado estroboscópico, se resumen bajo las características de la función f_B :

Condición 1 \wedge Condición 2: $f_B: T' \rightarrow X$ es una función inyectiva creciente y lineal

5

Se aprecia que en el caso de que no se cumpla la condición 2, f_B no cumple la condición de función, ya que existirán distintos valores de x_i asociados a un único valor de t'_i . Mientras que cuando se cumpla la condición 2, f_b será una función inyectiva, y solo será una función sobreyectiva cuando $n = X_C$.

10

Este tipo de función relaciona una variable temporal (el instante de cada uno de los pulsos ópticos) con una variable espacial (la posición/píxel de un detector multicanal). Por tanto, la ventaja básica proviene de eliminar la variable tiempo en el estudio dinámico de una señal óptica. De esta forma, la resolución temporal del sistema se asocia con la resolución espacial del sistema completo, y no con la resolución temporal de detección. El parámetro tiempo, en este caso, únicamente se asocia con el tiempo de integración de la adquisición, usado para mejorar el contraste entre señal y ruido.

15

Diseño de la técnica experimental:

20

En la Fig. 1 se ha ilustrado de manera esquemática al sistema propuesto por el primer aspecto de la invención, para un ejemplo de realización para el que los medios de conversión comprenden unos medios de deflexión (3) y unos medios de control (6) que configuran los medios de deflexión enviándoles una señal de control (CTRL), que puede ser de muy diversa índole (tensión acústica, corriente eléctrica, etc.), en función del tipo de elemento de deflexión. En este caso, el elemento de deflexión ilustrado actúa por transmisión. Es decir, deja pasar a su través la señal luminosa pulsada modulada temporalmente (Sr), variando su índice de refracción con el fin de redirigir las distintas porciones temporales de la señal (según un ángulo α proporcional al valor de la señal de control CTRL), en la forma de señal Or, hacia unos correspondientes fotodetectores que

25

30

configuran los distintos canales de los medios de detección multicanal (4) (que en general serán los píxeles de una matriz CCD). Finalmente, la información recibida se analiza por los medios de procesamiento (5).

- 5 Los medios de control (6) son los encargados de que los medios de deflexión (3) operen con una frecuencia de deflexión (fd) que cumpla la anteriormente descrita “sincronización estroboscópica”, mediante la generación y envío de una señal de control (CTRL) adecuada para tal fin.
- 10 La utilización de un dispositivo de conversión tiempo-espacio bajo la condición de sincronizado estroboscópico permite construir distintos esquemas experimentales del sistema propuesto por el primer aspecto de la invención, que ofrecen distintas capacidades de análisis de la luz modulada temporalmente, por medio de sistemas de detección multicanal. A continuación se citan y describen (de manera no exhaustiva) una serie de
 15 posibles elementos de deflexión que pueden funcionar como medios de deflexión (3) de los medios o dispositivo de conversión tiempo-espacio, así como una serie de esquemas experimentales propuestos para diferentes ejemplos de realización del sistema de la presente invención.
- 20 Ejemplos de dispositivos de deflexión:

Espejos rotatorios: Un espejo rotatorio sobre un eje es el sistema más sencillo para generar una conversión tiempo-espacio. En este caso la conversión se realiza mediante una conversión tiempo-ángulo, que, a una determinada distancia del espejo, en un detector
 25 multicanal se convierte en conversión tiempo-píxel. Mediante una calibración, el píxel en el detector multicanal puede adquirir las dimensiones de tiempo. Este tipo de espejos permite realizar una multiplicación de la frecuencia de giro a través de una multiplicación de las caras reflectantes. Por ejemplo, un espejo hexagonal generará una frecuencia de conversión tiempo espacio seis veces mayor que la frecuencia de giro del hexágono. Además presentan
 30 varias ventajas destacables. La velocidad de giro se puede mantener constante con una precisión alta, por lo que la dispersión de la luz para cada ángulo es lineal. Por otra parte la tecnología para construir este tipo de espejos es muy barata, por lo que reduce considerablemente los costes de un equipo de análisis temporal de la luz.

35 *Espejos galvanométricos:* Otra opción para construir el conversor tiempo – espacio es usar espejos galvanométricos. Este tipo de espejo no genera un giro completo como en el caso anterior, sino una oscilación modulable en amplitud y frecuencia. Con este dispositivo las

frecuencias de oscilación son algo más bajas que en el caso de los espejos rotantes y, por otra parte, el ángulo de deflexión no tiene una correspondencia lineal.

5 *Sistemas Microelectromecánicos (MEMS):* Otra de las opciones es usar sistemas más complejos microelectromecánicos, que permiten una mayor flexibilidad en el control de la señal óptica, aunque a expensas de encarecer considerablemente el coste del dispositivo. En esta categoría pueden encontrarse sistemas que están implementados para trabajar con fibra óptica, como también sistemas que trabajan en óptica libre.

10 Otros posibles elementos de deflexión que implementen los medios de deflexión del conversor tiempo-espacio del sistema propuesto por el primer aspecto de la presente invención son, por ejemplo, los deflectores acusto-ópticos/electro-ópticos por transmisión o los resonadores de micro-anillos.

15 *Esquemas de montajes experimentales:*

Los presentes inventores han realizado una serie de montajes experimentales del sistema propuesto por el primer aspecto de la presente invención, para realizar distintas medidas de fotoluminiscencia, o en general de señales ópticas (luminosas) pulsadas moduladas
20 temporalmente.

A continuación se indican tres de tales montajes o esquemas experimentales que ofrecen la posibilidad de obtener tres análisis diferenciados de una señal óptica pulsada. En los tres esquemas se ha utilizado como elemento de deflexión un espejo rotatorio (3) que gira
25 alrededor de un eje vertical (E1).

A) Esquema básico: Medida de la fotoluminiscencia resuelta en tiempo.

Este caso representa la construcción más simple que se puede diseñar con la nueva técnica
30 propuesta por la presente invención. La Fig. 4 muestra el esquema experimental correspondiente. Para excitar al sistema emisor se usa un láser pulsado (1), que emite una señal de excitación (Se) que al llegar a la muestra (2) genera una señal óptica resuelta en el tiempo (Sr). La señal Sr atraviesa un elemento de transmisión (Am) (que en este caso no altera la señal) y se dirige al elemento de deflexión (3) del conversor tiempo-espacio,
35 desviándola éste de forma dinámica y bajo criterio de sincronizado estroboscópico (mediante unos medios de control no ilustrados), en la forma de señal modulada espacialmente (Or) y dirigida y focalizada sobre el detector multicanal (4). La focalización se

realiza mediante una lente (no ilustrada) que puede disponerse antes o después del elemento de deflexión (3). De esta forma, el transitorio de la señal óptica S_r se puede obtener realizando una adquisición espacial en dicho detector multicanal (4), integrando el tiempo necesario.

5

B) Esquema contaje de coincidencias: Medida de la $g^2(0)$ de un sistema emisor de fotones uno a uno.

El anterior diseño experimental proporcionaba un montaje para el análisis temporal de la fotoluminiscencia de un emisor óptico, independientemente de la naturaleza estadística de la luz emitida. Para el caso particular de señales generadas mediante emisores cuánticos, como podría ser la luz proveniente de un punto cuántico o una molécula aislada, cada uno de estos pulsos ópticos estaría formado por un solo fotón. La técnica convencional HBT se usa para analizar las fluctuaciones de la intensidad de la luz emitida, y así poder discriminar la tipología de la estadística de emisión de fotones por un sistema dado. Utilizando las características del conversor tiempo-espacio se puede realizar un montaje alternativo al HBT típico para determinar el valor de la función de correlación de segundo orden. El esquema básico es similar al caso anterior, con la única diferencia de que en el elemento transmisor del montaje (A_m en Fig. 4) se ha añadido un divisor de haz (B_m) que divide la señal S_r en dos sub-señales S_{r1} y S_{r2} . A la señal S_{r1} se le aplica un retardo respecto a la señal S_{r2} por medio de un generador de retardo sintonizable (B_r), generando la señal S_{r1t} . En la Fig. 5 se muestra el diseño sugerido para realizar mediciones de la función de correlación de segundo orden.

Como se observa en la Fig. 5, todos los elementos de 1 a 4 son equivalentes a los del esquema de la Fig. 4. En este caso, el montaje B únicamente añade el divisor de haz (B_m) y el retardador (B_r) en uno de los caminos ópticos. De esta forma, la señal óptica (S_r) que llega al elemento de deflexión del conversor tiempo-espacio, es decir el espejo (3), queda dividida en dos puntos, la correspondiente al canal L y al canal R, asociadas a la propagación de la señal óptica (S_r) por cada uno de los brazos del divisor de haz (B_m). Es decir, correspondientes a las sub-señales S_{r1t} y a S_{r2} , las cuales inciden sobre el espejo (3) en dos respectivos puntos distanciados a lo largo del eje E_1 . Por tanto, se producen dos deflexiones, una para cada canal. En este caso, el detector multicanal (4) debe ser un detector 2D en forma de matriz, como una CCD convencional, ya que la deflexión de cada una de las sub-señales S_{r1t} y S_{r2} moduladas temporalmente se traducirán como dos señales moduladas espacialmente O_{r1t} y O_{r2} , cada una de ellas deflectadas y focalizadas sobre una respectiva fila de la CCD 4. Del análisis de la adquisición en cada canal se puede

35

obtener una medida experimental de las coincidencias de fotones para un retraso temporal ajustable entre canal 1 y 2.

C) Esquema combinado tiempo y longitud de onda: modo simulación cámara "Streak".

5

Las cámaras "Streak" funcionan realizando una conversión de luz a electrones, modulando estos electrones con campo eléctrico, para, finalmente, reconvertir estos electrones a luz y ser detectada por una CCD. Además, la luz incidente queda dispersada en λ por un monocromador, de forma que los dos ejes finales devuelven la relación entre tiempo y longitud de onda. Este último diseño, ilustrado en la Fig. 6, ofrece construir un sistema experimental que simula el funcionamiento de una cámara "Streak", sin realizar ninguna conversión luz-electrones, por medio del efecto combinado de un monocromador y el conversor tiempo-espacio. Las ventajas del uso de las cámaras "Streak" provienen de la alta resolución temporal obtenida con este tipo de medida experimental. Sin embargo, el presente diseño puede resultar útil en aquellas medidas que no precisen de una alta resolución temporal, ofreciendo, por otra parte, un equipo mucho más económico y robusto. Como en el caso anterior, este diseño experimental comparte todos los elementos numerados del 1 al 4 en las Figs. 4 y 5. La única variante corresponde al módulo Cm, donde se ha añadido un elemento difractivo en λ (red de difracción). La difracción de la luz incidente se realiza en la dirección paralela al eje de dispersión del elemento de deflexión del conversor tiempo-espacio, es decir del espejo (3). De esta forma, la señal Sr se dispersa según un eje Y conformando una señal que incluye una pluralidad sub-señales luminosas Srd1...Srdn con diferentes longitudes de onda, las cuales inciden en unas respectivas regiones diferenciadas del espejo (3), que las envía a unas respectivas agrupaciones de canales del detector multicanal (4) ordenadas según un eje Y, ya en la forma de sub-señales Ord1...Ord n. Es decir que, la señal dispersada que llega al detector multicanal (4) posee dos ejes, correspondiente a tiempo (por eje horizontal en Fig. 6) y longitud de onda (por eje vertical en Fig. 6).

30 Aunque en las Figs. 4, 5 y 6 se ha ilustrado un espejo rotatorio con una sola cara reflectante, en este caso plana, ventajosamente éste comprende más de una cara reflectante, tal como es el caso de un espejo hexagonal, en este caso dispuesto de manera que las seis caras reflectantes del mismo queden paralelas y equidistantes al eje de giro E1, el cual, como ya se ha indicado anteriormente, generará una frecuencia de conversión tiempo-espacio seis veces mayor que la frecuencia de giro del hexágono. Tanto cuando el elemento deflector (3) es un espejo de una cara como cuando lo es de varias caras reflectantes, éste girará en un sentido único, alrededor de E1, con una frecuencia acorde a la condición de sincronización

estroboscópica. Elementos deflectores con un número diferente de caras reflectantes, planas o no, y/o con geometrías diferentes a las descritas también son posibles, para otros ejemplos de realización.

5 *Análisis y simulación de las medidas experimentales:*

A continuación se van a describir en detalle los procesos de medida experimental de la fotoluminiscencia de un emisor dado mediante el diseño A de la Fig. 4 y de la función de correlación de segundo orden mediante el diseño B de la Fig. 5.

10

- *Técnica de fotoluminiscencia resuelta en tiempo.*

Esta técnica se ha implementado de forma experimental en el laboratorio de los presentes inventores, usando:

15

1) Un láser de excitación pulsado.

2) Una muestra semiconductor sobre la que se hace incidir el láser y que genera fotoluminiscencia.

3) Un modulador espacial consistente en un espejo hexagonal montado sobre un motor CC que se hace girar a una frecuencia dada con objeto que este giro quede sincronizado con la velocidad de repetición del láser pulsado.

20

4) Una CCD de Silicio de 1024x128 píxeles.

Los resultados obtenidos mediante una adquisición estándar en laboratorio, esto es, usando un APD (detector monocanal) y una tarjeta TCSPC, se muestran en la Fig. 2. A la izquierda de la Fig. 2 se muestra mediante una gráfica identificada como FLRT APD (donde FLRT son la siglas de Fotoluminiscencia Resuelta en Tiempo, del inglés TRPL (Time Resolved Photoluminescence)), el espectro de fotoluminiscencia de la muestra bajo estudio (en unidades arbitrarias logarítmicas), que exhibe varias bandas de emisión etiquetadas desde la A hasta la E, para las que se han adquirido los espectros de fotoluminiscencia ilustrados en la vista derecha de la Fig. 2.

25

30

La banda etiquetada como B en la vista derecha de la Fig. 2 tiene un tiempo característico de unos 100 ns y es la que se ha elegido para realizar el experimento con la técnica propuesta por la presente invención, el cual ha ofrecido como resultado el transitorio de fotoluminiscencia que se muestra en la Fig. 3, en la cual dicho transitorio se ilustra mediante la curva marcada con una serie de pequeños círculos, siendo la otra curva (la dibujada simplemente con una línea fina) la correspondiente a la señal pulsada de excitación de la

35

muestra. El mencionado espectro ha sido adquirido con el modulador espacial funcionando a 2 kHz y el láser de excitación a una frecuencia de repetición de 500 kHz. El periodo de repetición de este láser pulsado, 2 μ s, puede aprovecharse para calibrar la escala temporal en la CCD (lo que ya se ha hecho en la Fig. 3), y permite obtener un tiempo de recombinación idéntico al medido con la técnica convencional, quedando así validado el sistema y método propuestos por la presente invención debido a los siguientes aspectos observados en la Fig. 3:

1) Los picos de ambas curvas coinciden y la distancia entre los picos marcan el periodo de repetición, que es de 2 μ s en ambos casos, lo cual valida que el sistema se comporta de manera similar en los periodos de repetición.

2) La diferencia entre las dos curvas al añadir la muestra e incluir un filtro pasabanda (curva de línea con círculos) respecto a la señal sin excitar la muestra y sin incluir el filtro (curva de línea fina), es decir correspondiente a la señal de excitación, es la pendiente de caída del pico, que es la respuesta con el tiempo de la fotoluminiscencia.. De la pendiente de la caída se obtiene toda la información referente a los tiempos de caída y de vida de la fotoluminiscencia emitida por la muestra.

Para el experimento cuyos resultados se muestran en la Fig. 3 se ha utilizado una muestra de puntos cuánticos, cuyo estudio previo ha permitido conocer sus características de luminiscencia en función del tiempo. La muestra se ha utilizado a modo de patrón que se ha calibrado por otros sistemas. La medición de la respuesta de luminiscencia en tiempo de la muestra que se ha realizado con el sistema de la presente invención es acorde con la obtenida con otros sistemas. Por ello, se puede considerar que el sistema propuesto por el primer aspecto de la invención es capaz de realizar medidas resueltas en tiempo de manera fiable.

- *Técnica de correlación de fotones con 2-canales.*

Este tipo de análisis experimental resulta mucho más crítico que el anterior, ya que la técnica trata de realizar una medida directa de la estadística de emisión de fotones. La Fig. 7 muestra el proceso de medida de la correlación de fotones usando el diseño experimental B, es decir el de la Fig. 5. La señal óptica (S_r), como se ha descrito anteriormente, queda dividida en dos canales mediante un divisor de haz (B_m) y un elemento retardador (B_r). Cada adquisición del detector multicanal (4) genera un conjunto de pulsos definidos por el

factor n . La detección del canal L y R se realiza mediante la detección sobre dos filas de píxeles de la CCD. Al canal R se le ha añadido un retardo temporal sintonizable respecto al canal L. La figura 7(b) ejemplifica el caso para un retardo de +1 pulso (+1 casilla en la figura como simplificación). Esto es, un desplazamiento del tren de pulsos en un periodo en sentido positivo, respecto al canal L, siendo el subconjunto L, etiquetado como "Izquierda", el obtenido para la sub-señal $Sr2$ (ver Fig. 5), y el subconjunto R, etiquetado como "Derecha", el obtenido para la sub-señal $Sr1t$.

Para un retardo = 0, los pulsos en ambas detecciones coincidirían, y para un retardo = $\pm d$, ambas detecciones estarían desplazadas por un número de pulsos igual a $\pm d$. Una vez obtenidos los subconjuntos L y R, se procede al análisis posterior de la medida.

El análisis de la medida comprende dos etapas de operación (Oper1 y Oper2) que actúan sobre los subconjuntos L y R y los derivados de ellos. La Fig. 7(b) muestra el proceso de medida para una adquisición. Oper1 actúa sobre los elementos de los conjuntos L y R término a término, generando otro conjunto C. Posteriormente, Oper2 actúa sobre los propios elementos del conjunto C, obteniendo un valor escalar en función del retardo elegido ($Adq = Adq(\text{retardo})$). La Fig. 7(c) muestra el proceso de medida para m adquisiciones. El proceso es el mismo, pero se obtendrá dos subconjuntos L y R para cada adquisición (etiquetada como i en la figura). En el caso de m adquisiciones, los operadores Oper1 y Oper2 actúan de la misma forma que en el caso de una sola adquisición, pero el proceso se realizará m veces. Finalmente se obtendrá un valor medio de Oper2 que será también función del retardo concreto usado en la medida ($Out = Out(\text{retardo})$). De esta forma se obtendrá un valor específico para cada conjunto de m adquisiciones..

Para definir la medida concreta de la función de correlación de segundo orden basta con definir los operadores 1 y 2 de la anterior descripción. La Fig. 8 muestra este caso concreto. La señal óptica a analizar es pulsada y contendrá un determinado conjunto de fotones en cada pulso (i en la Fig. 8(a)). El número de fotones por pulso estará sujeto a la estadística del emisor (Poisson, antiagrupada o sub-Poisson, definidas en la Fig. 9). Esta señal óptica se dividirá en dos haces a través de un separador de haz (BS: "Beam Splitter") 50/50, forzando a cada fotón a tomar el camino L o el camino R. En este proceso se generarán, por tanto, dos nuevas señales (ii en la Fig. 8(a)). Además, en el camino R se ha añadido un retardo temporal sintonizable. Ambos haces definidos en L y R se hacen incidir por separado y de forma controlada sobre el conversor tiempo-espacio, en particular sobre el elemento de deflexión del mismo ((3) en Fig. 5), por lo que se dirigirán a dos filas distintas de la CCD, indicadas como fila L y fila R en la Fig. 8(a). Los pulsos en cada haz de luz serán detectados

- por píxeles equiespaciados (a través de la sincronización impuesta por el deflector de haz, como se explicó anteriormente) y divididos por dos filas de la CCD, que recogerán pues los haces L y R. De esta manera, en cada adquisición se obtienen dos subconjuntos de datos L^j ($L^{j1} \dots L^{jn}$) y R^j ($R^{j1} \dots R^{jn}$), donde j da cuenta de la medida realizada ($j = 1 \dots m$). En la figura 8(a) se ha usado el ejemplo de retardo = +1, pero éste, es decir el retardo puede tomar valores enteros negativos y positivos, como también el valor 0. Este procedimiento se realiza un número m de veces, m adquisiciones en la CCD. La información sobre la señal óptica y la naturaleza de los emisores que la generan podrá ser determinada a partir de este análisis.
- 10 En la Fig. 8 se muestra el procedimiento para analizar la estadística de emisión de fotones usando la medida basada en el análisis de la función de correlación de segundo orden. Para realizar el análisis de la función de correlación de segundo orden, el proceso de medida experimental usa las siguientes definiciones de Oper 1 y 2 (Fig. 7 (c)). Oper1 calcula la multiplicación componente a componente de los subconjuntos L y R, generando un tercer conjunto C de igual dimensión. Por otro lado, Oper2 calcula el cociente entre el valor medio del conjunto C y la multiplicación entre los valores medios de los conjuntos L y R, lo que equivale al cálculo de la función de correlación de segundo orden que llamamos Adq (retardo).).
- 15 El resultado final se obtendrá calculando el valor medio de los m valores de Adq (retardo) = $g^2(\tau)$. Este parámetro será función del retardo elegido entre las filas L y R.

A continuación se van a presentar los resultados de unas simulaciones realizadas con el sistema y método de la presente invención. Se han realizado simulaciones del método del análisis usando el cálculo de la función de correlación de segundo orden descrito en los párrafos anteriores, usando como parámetro de entrada las funciones de probabilidad de la emisión de fotones para tres distribuciones concretas (determinadas por la naturaleza del emisor): distribución Bose-Einstein (Fig. 9(a), distribución de Poisson (Fig.9(b)) y distribución sub-Poisson (Fig. 9(c)) (fotones uno-a-uno o "antiagrupados"). Estas distribuciones quedan parametrizadas por el valor medio de fotones ($\langle N_f \rangle$), el cual se ha elegido igual a 1 ($\langle N_f \rangle = 1$). Primero se mostrará el caso ideal, en el que no se suponen pérdidas del sistema, ni efecto de ruido externo. Posteriormente se evalúa el efecto de las pérdidas, añadiendo un canal aleatorio de supresión de fotones, como, a su vez, el efecto del ruido, simulado ponderando la distribución de probabilidad de emisión de fotones con una distribución Poisson con peso relativo variable. En cada caso se ha elegido 100 pulsos ($n = 100$) por cada fila de la CCD y 100 adquisiciones ($m = 100$). Este caso se comparará con el obtenido para $n = m = 1000$, que supondría un caso estadísticamente más representativo.

En la Fig. 10 se muestran los resultados de la simulación de la medida de la función de correlación de segundo orden ($g^2(t)$) siguiendo el procedimiento descrito arriba, para el caso ideal sin pérdidas ni ruido (Fig. 10(a)) y para un caso realista en el que se incorpora el 50% de pérdidas del sistema, y un ruido del 20% respecto a la señal óptica (Fig. 10(b)). Los resultados para esta simulación se correlacionan perfectamente con los obtenidos para el análisis de la desviación estándar, si bien para las estadísticas Bose-Einstein y Antiagrupada, la diferencia entre los valores de $g^2(t = 0)$ y $g^2(t \neq 0)$ se hace mucho más notable, incluso cuando se añade el efecto de las pérdidas del sistema y del ruido. Esto es, la función $g^2(t)$ obtenida con la técnica propuesta por la presente invención ofrece una evaluación de la estadística de emisión de fotones con un buen contraste entre los valores para $t = 0$ y $t \neq 0$.

Los resultados analizados, así como la validación experimental del método de modulación espacial, demuestran la posibilidad de determinar y clasificar la naturaleza de la estadística de emisión de los fotones mediante un montaje experimental alternativo al HBT. Usando este tipo de medida experimental se pueden realizar distintos análisis “off-line” de los datos de adquisición de una CCD. La ventaja principal de la técnica experimental propuesta por la presente invención proviene del tiempo de adquisición necesario para medir el valor de $g^2(\tau)$. Para realizar una estimación del tiempo de adquisición se han usado, las características técnicas de dos cámaras CCD comerciales que actualmente están en el mercado. Estas cámaras CCD son capaces de trabajar en régimen de detección de un solo fotón, debido a su acción de multiplicación electrónica, en las regiones espectrales de máxima eficiencia cuántica. Las diferencias esenciales entre ambas cámaras, llámense A y B, provienen del número total de píxeles y de la velocidad máxima en modo “Cropped Sensor Mode” (CSM). La primera de ellas, cámara A, posee 512 píxeles, mientras que la segunda, cámara B, posee 1024. Esto implica que un número razonable de pulsos a lo largo de la CCD (n) podría ser 50 y 100 para cada cámara, respectivamente. Teniendo en cuenta el análisis de la dispersión del valor de $g^2(t)$ en función de n y m , se puede estimar que el valor mínimo de adquisiciones en cada caso debe ser de 400 y 200. De esta forma, el valor de la dispersión es lo suficientemente bajo para poder obtener una lectura lo suficientemente nítida.

Tomando como referencia los valores de los “frame rates” (velocidades de fotogramas) de ambas cámaras en modo CSM, se han estimado los tiempos totales de integración usando estos parámetros de adquisición. De esta forma, la velocidad máxima de adquisición, sin tener en cuenta el tiempo necesario del cálculo “off-line”, usando la cámara A (512x1

- píxeles) y la cámara B (1024 x 1 píxeles) sería de 36 y 48 ms para cada valor de retardo. Sin embargo, para realizar esta medida a esta velocidad se necesitarían dos cámaras iguales y sincronizadas para adquirir los canales L y R. La medida se puede realizar con solo una cámara si se aumenta el tamaño del "array" en el modo CSM (por ejemplo, usando unos
- 5 "arrays" de 512x32 o 1024x32 en cada cámara, respectivamente). De esta forma, el tiempo de integración usando los parámetros de n y m descritos anteriormente para cada cámara, aumentarían hasta 0.5 y 0.72 s. Por tanto, usando la técnica de la presente invención según se ha descrito y simulado arriba, usando cámaras CCD actuales, el tiempo de integración para obtener el valor de $g^2(0)$ de un sistema emisor de fotones se podría reducir hasta 3 - 4
- 10 órdenes de magnitud, clasificar así la naturaleza de su estadística o bien usar la técnica para implementar operaciones de manejo de fotones, por ejemplo, en el futuro campo de la óptica cuántica integrada para computadores cuánticos y telecomunicaciones (manejo cuántico de la información).
- 15 Un experto en la materia podría introducir cambios y modificaciones en los ejemplos de realización descritos sin salirse del alcance de la invención según está definido en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1.- Sistema para la medida y análisis de señales luminosas temporales, que comprende:

- medios de conversión tiempo-espacio que comprenden unos medios de deflexión

5 (3) configurados y dispuestos para recibir una señal luminosa variable temporalmente (S_r) y convertirla en una señal luminosa variable espacialmente (O_r);

- medios de foto-detección multicanal (4) configurados y dispuestos para detectar dicha señal luminosa variable espacialmente (O_r); y

10 - medios de procesamiento (5) en conexión con dichos medios de foto-detección multicanal (4) y configurados y dispuestos para recibir y procesar unos datos proporcionados por éstos y correspondientes o asociados a unos valores que la señal luminosa variable espacialmente (O_r) tiene en cada uno de los canales de los medios de foto-detección multicanal (4);

estando el sistema **caracterizado** porque está previsto para el análisis de señales
15 luminosas pulsadas moduladas temporalmente según una frecuencia de excitación f_e y porque dichos medios de conversión tiempo-espacio comprenden unos medios de control (6) que controlan a dichos medios de deflexión (3) para que operen sincronizadamente con dicha modulación temporal con una frecuencia de deflexión f_d tal que:

$$\frac{f_e}{f_d} = n$$

donde n es un número natural distinto de cero.

20

2.- Sistema según la reivindicación 1, caracterizado porque dichos medios de deflexión (3) comprenden al menos un elemento deflector de luz (3) configurado y dispuesto para dirigir
secuencialmente, bajo el control de los medios de control (6), diferentes porciones
temporales de la señal luminosa pulsada variable temporalmente (S_r) a unas
25 correspondientes diferentes zonas de foto-detección de los medios de foto-detección multicanal (4), cada una asociada a al menos uno de los canales de foto-detección.

3.- Sistema según la reivindicación 2, caracterizado porque dicho elemento deflector de luz (3), que es al menos uno, es desplazable bajo el control de los medios de control (6) para
30 producir dicho direccionamiento de las diferentes porciones temporales de la señal luminosa variable temporalmente (S_r) a las correspondientes diferentes zonas de foto-detección de los medios de foto-detección multicanal (4).

4.- Sistema según la reivindicación 3, caracterizado porque dicho elemento deflector de luz (3), que es al menos uno, es desplazable rotatoriamente alrededor de al menos un eje de
35

giro (E1), y está dispuesto para que en función de su posición angular dirija a la señal luminosa variable temporalmente (S_r), incidente sobre el mismo, hacia una u otra de las zonas de foto-detección de los medios de foto-detección multicanal (4), donde fd corresponde a la frecuencia de giro del elemento deflector de luz (3) alrededor de dicho eje de giro (E1).

5

5.- Sistema según la reivindicación 2, 3 ó 4, caracterizado porque el elemento deflector de luz (3), que es al menos uno, desvía la luz por reflexión y/o por transmisión.

10 6.- Sistema según la reivindicación 5, caracterizado porque el elemento deflector de luz (3), que es al menos uno, comprende al menos un espejo con al menos una cara reflectante.

7.- Sistema según la reivindicación 6, caracterizado porque dicho espejo, que es al menos uno, comprende una pluralidad de caras reflectantes angularmente desplazadas entre sí.

15

8.- Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 2 a 7, caracterizado porque los medios de deflexión comprenden al menos uno de los siguientes sistemas: un sistema galvanométrico que comprende a dos de dichos elementos deflectores de luz, un sistema micro-electromecánico que incluye una pluralidad de dichos elementos deflectores de luz, uno o más elementos deflectores de luz constituidos por respectivos elementos deflectores acusto-ópticos y/o electro-ópticos por transmisión, un resonador de micro-anillos, o una combinación de los mismos.

20

9.- Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque está aplicado a la medida y el análisis de los tiempos de vida de transiciones ópticas, o de variables relacionadas con dichos tiempos de vida.

25

10.- Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque comprende unos medios de modulación temporal encargados de llevar a cabo dicha modulación temporal de las señales luminosas pulsadas (S_r) según dicha frecuencia de excitación f_e .

30

11.- Sistema según la reivindicación 10, caracterizado porque está aplicado a la medida de señales luminosas emitidas por fotoluminiscencia por una muestra (2), comprendiendo dichos medios de modulación temporal una fuente pulsada de excitación (1), configurada y dispuesta para excitar a dicha muestra (2) con una señal pulsada de excitación de

35

frecuencia f_e para que emita dichas señales luminosas pulsadas moduladas temporalmente (Sr).

5 12.- Sistema según la reivindicación 11, caracterizado porque los medios de foto-detección multicanal (4) comprenden una disposición ordenada de elementos foto-detectores, y porque los medios de procesamiento (5) están programados para realizar dicho análisis de señales luminosas pulsadas moduladas temporalmente implementando técnicas de fotoluminiscencia resuelta en tiempo procesando dichos datos proporcionados por los medios de foto-detección multicanal (4) mediante una integración, durante un tiempo
10 determinado, de los datos recibidos en cada uno de dichos elementos foto-detectores.

13.- Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque comprende un divisor óptico (B) configurado y dispuesto para separar dicha señal luminosa (Sr) en dos correspondientes sub-señales luminosas (Sr1, Sr2) y dirigirlas a dos respectivas
15 regiones diferenciadas de dichos medios de deflexión (3), estando los medios de deflexión (3) configurados y dispuestos para, bajo el control de dichos medios de control (6), enviar una de dichas sub-señales luminosas (Sr1) a una de dos agrupaciones de canales de los medios de foto-detección multicanal (4) y enviar la otra sub-señal luminosa (Sr2) a la otra agrupación de canales de los medios de foto-detección multicanal (4).

20

14.- Sistema según la reivindicación 13, caracterizado porque comprende un elemento óptico retardador (Br) configurado y dispuesto en el camino de una de dichas sub-señales luminosas (Sr1, Sr2) para retardar su llegada a los medios de deflexión (3) con respecto a la llegada de la otra sub-señal luminosa.

25

15.- Sistema según la reivindicación 13 ó 14 cuando dependen de la 11, caracterizado porque los medios de foto-detección multicanal (4) comprenden una disposición ordenada de elementos foto-detectores que incluye al menos dos sub-disposiciones diferenciadas, cada una de ellas constituyendo una respectiva de las dos agrupaciones de canales receptoras de las dos sub-señales luminosas (Sr1, Sr2), y porque los medios de procesamiento (5) están programados para realizar dicho análisis de señales luminosas temporales implementando técnicas de análisis de estadística de emisión de fotones, procesando los datos proporcionados por los medios de foto-detección multicanal (4) en
30 cada una de dichas sub-disposiciones ordenadas de elementos foto-detectores utilizando una función de correlación de orden dos, $g^2(\tau)$, donde τ equivale al retardo existente entre
35 cada una de las sub-señales luminosas (Sr1, Sr2).

16.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, caracterizado porque comprende un elemento óptico separador (C) configurado y dispuesto para dividir espacialmente a dicha señal luminosa modulada temporalmente (Sr) en un continuo de sub-señales luminosas (Srd1...Srdn) con diferentes longitudes de onda, dispersándolas según un eje Y, y dirigiéndolas a unas respectivas regiones diferenciadas de dichos medios de deflexión (3), estando los medios de deflexión (3) configurados y dispuestos para, bajo el control de los medios de control (6), enviar cada una de las sub-señales luminosas (Srd1...Srdn) a unas respectivas agrupaciones de canales de los medios de foto-detección multicanal (4) ordenadas según un eje Y.

17.- Sistema según la reivindicación 16 cuando depende de la 11, caracterizado porque los medios de foto-detección multicanal (4) comprenden una disposición ordenada de elementos foto-detectores en forma de cuadrícula donde cada una de dichas agrupaciones de canales está formada por una respectiva fila de elementos de foto-detección que se extiende según un eje X y que se encuentran apiladas la una sobre la otra según dicho eje Y, conformando dicha cuadrícula, de manera que los datos proporcionados por la cuadrícula de elementos foto-detectores se corresponden respectivamente con variaciones de longitud de onda, según el eje Y, y con variaciones temporales, según el eje X, y porque los medios de procesamiento (5) están programados para realizar dicho análisis de señales luminosas temporales implementando técnicas de fotoluminiscencia resuelta en tiempo y espectralmente, procesando los datos proporcionados por la cuadrícula de elementos foto-detectores.

18.- Método para la medida y análisis de señales luminosas temporales, que comprende:

- recibir una señal luminosa variable temporalmente (Sr) y convertirla en una señal luminosa variable espacialmente (Or), utilizando unos medios de conversión tiempo-espacio que comprenden unos medios de deflexión (3);
- detectar dicha señal luminosa variable espacialmente (Or) en unos medios de foto-detección multicanal (4); y
- recibir y procesar, mediante unos medios de procesamiento (5), unos datos proporcionados por dichos medios de foto-detección multicanal (4) y correspondientes o asociados a unos valores que la señal luminosa variable espacialmente (Or) tiene en cada uno de los canales de los medios de foto-detección multicanal (4);

estando el método **caracterizado** porque está previsto para el análisis de señales luminosas pulsadas moduladas temporalmente según una frecuencia de excitación f_e y porque comprende controlar a dichos medios de deflexión (3) para que operen sincronizadamente con dicha modulación temporal con una frecuencia de deflexión f_d tal que:

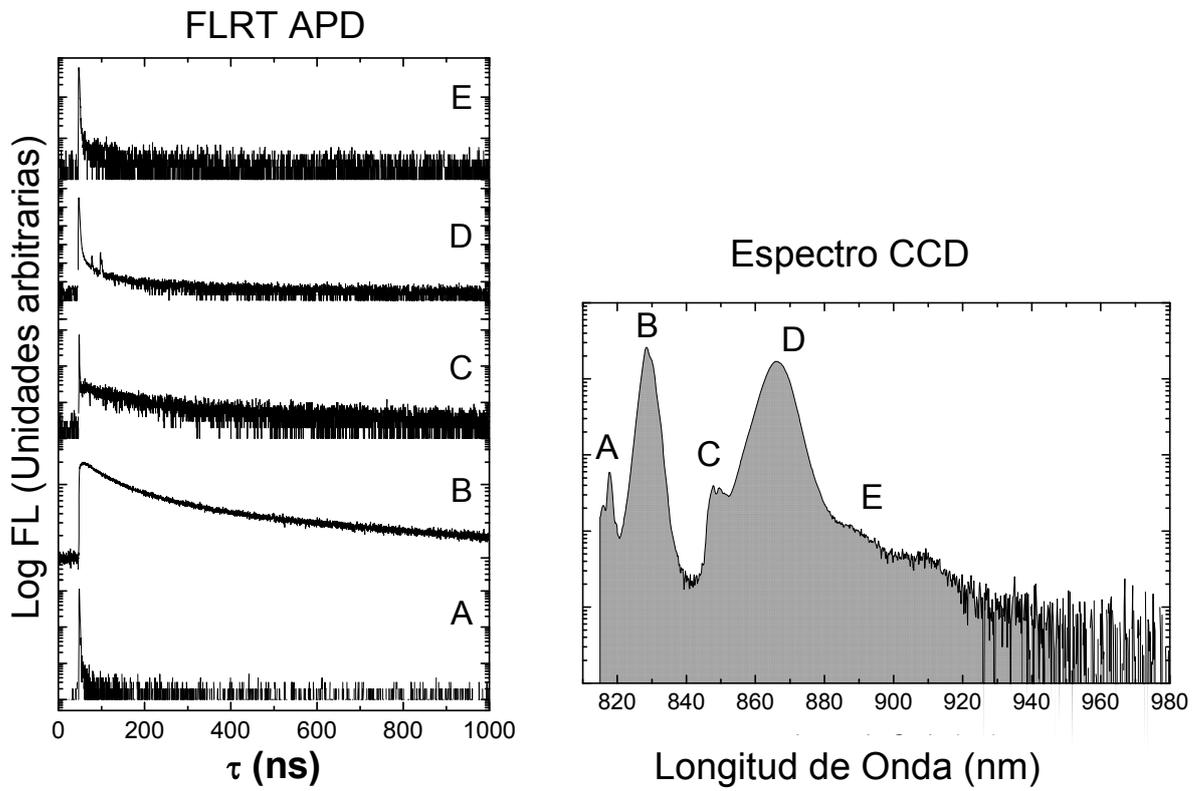
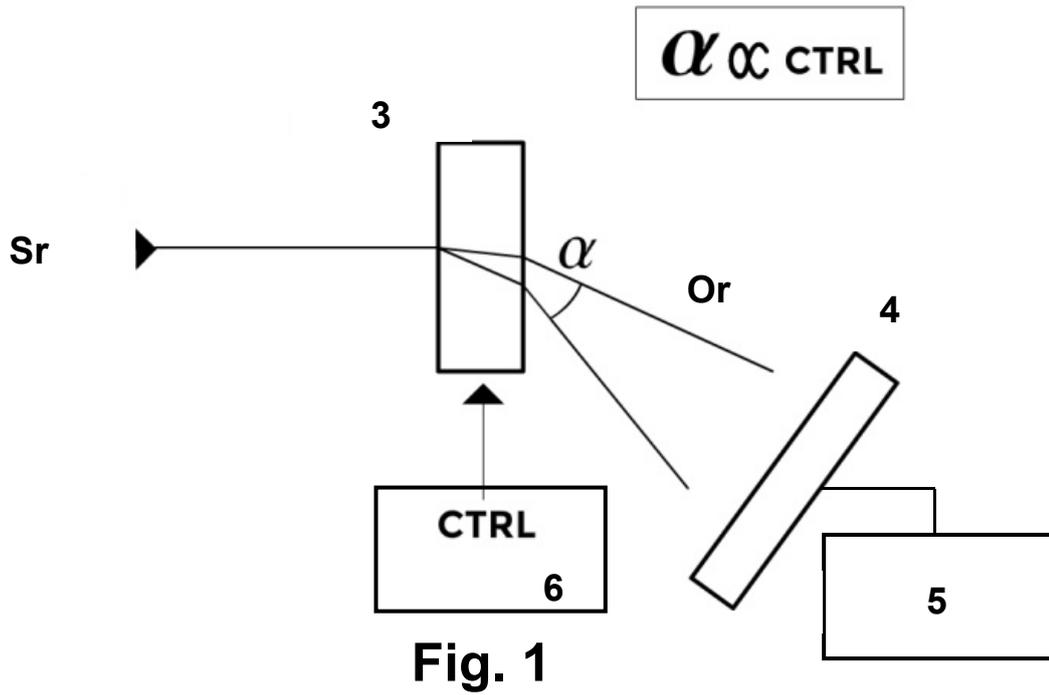
$$\frac{fe}{fd} = n$$

donde n es un número natural distinto de cero.

19.- Método según la reivindicación 18, caracterizado porque está adaptado para utilizar el sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 17.

5

20.- Programa de ordenador, que incluye instrucciones de código que cuando se ejecutan en un ordenador implementan el procesamiento de datos del método según una cualquiera de las reivindicaciones 18 a 19.



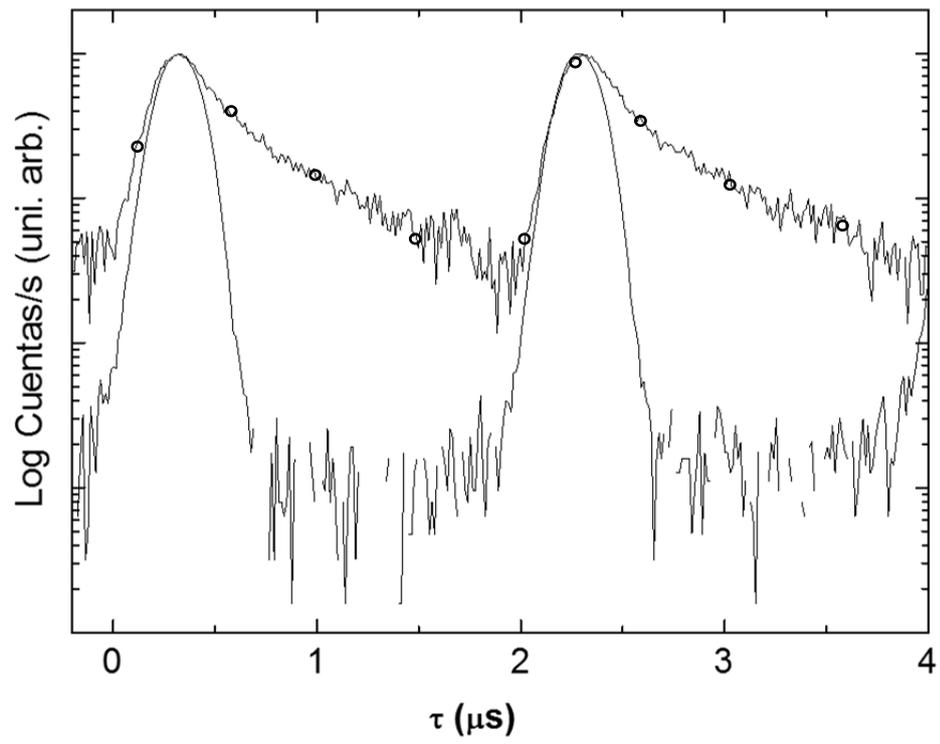


Fig. 3

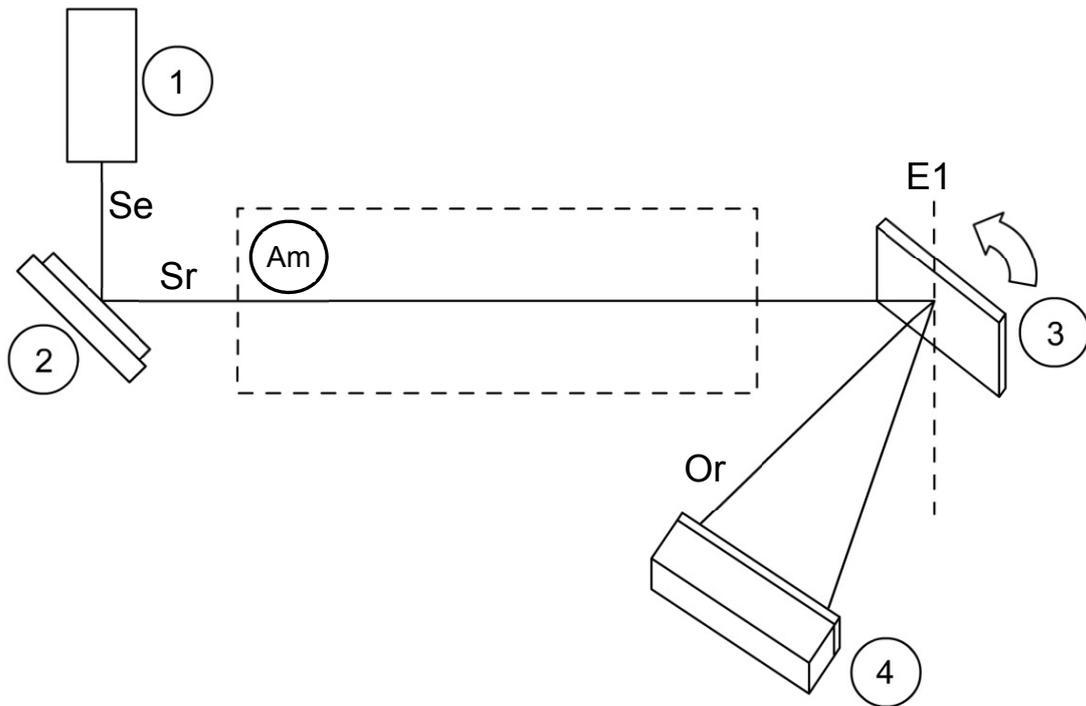


Fig. 4

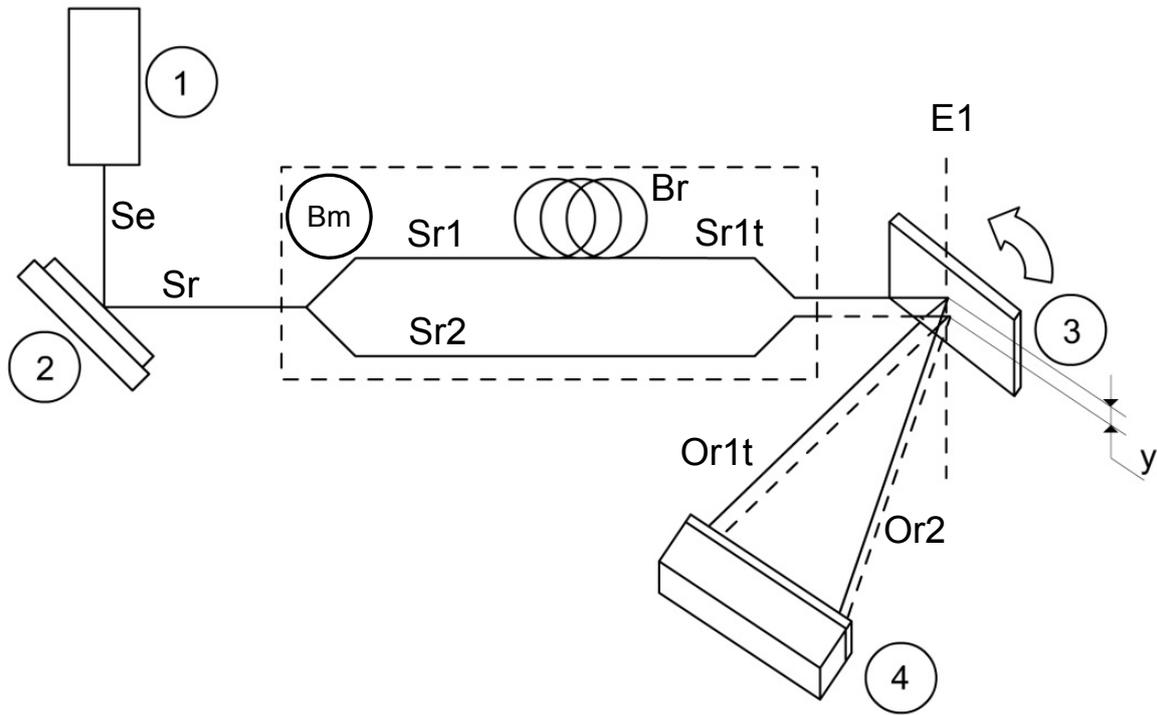


Fig. 5

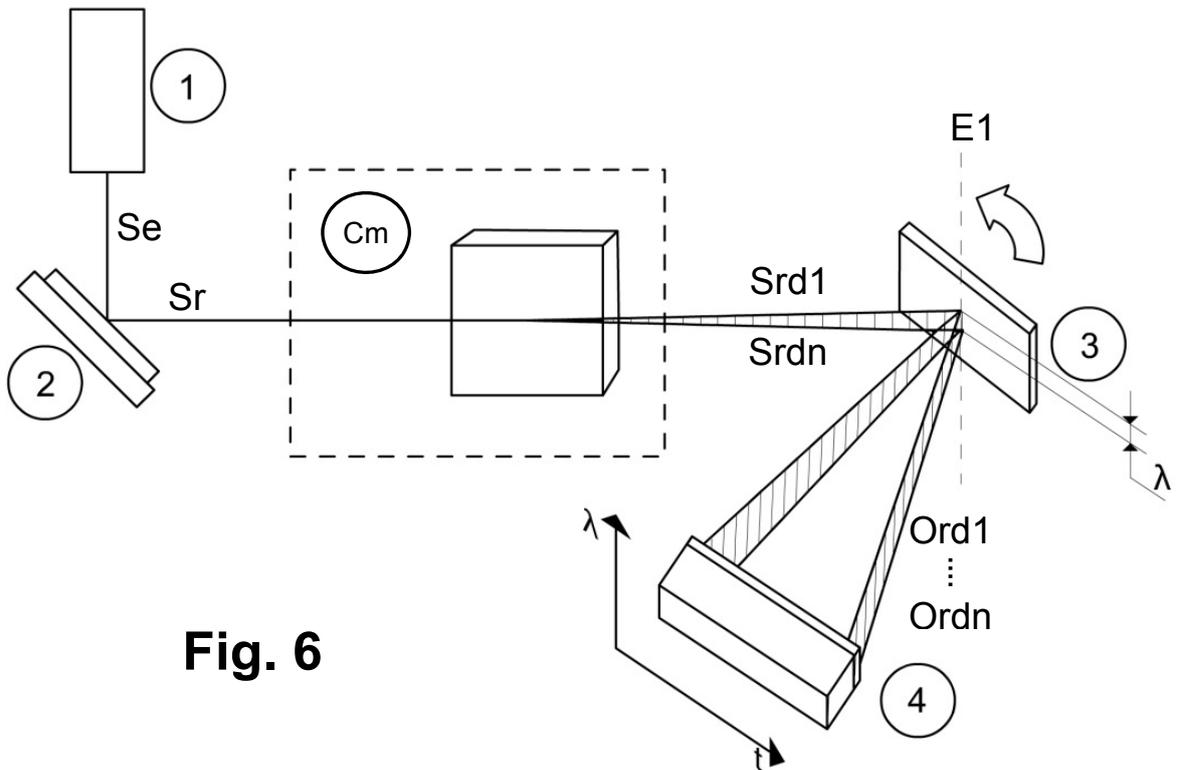


Fig. 6

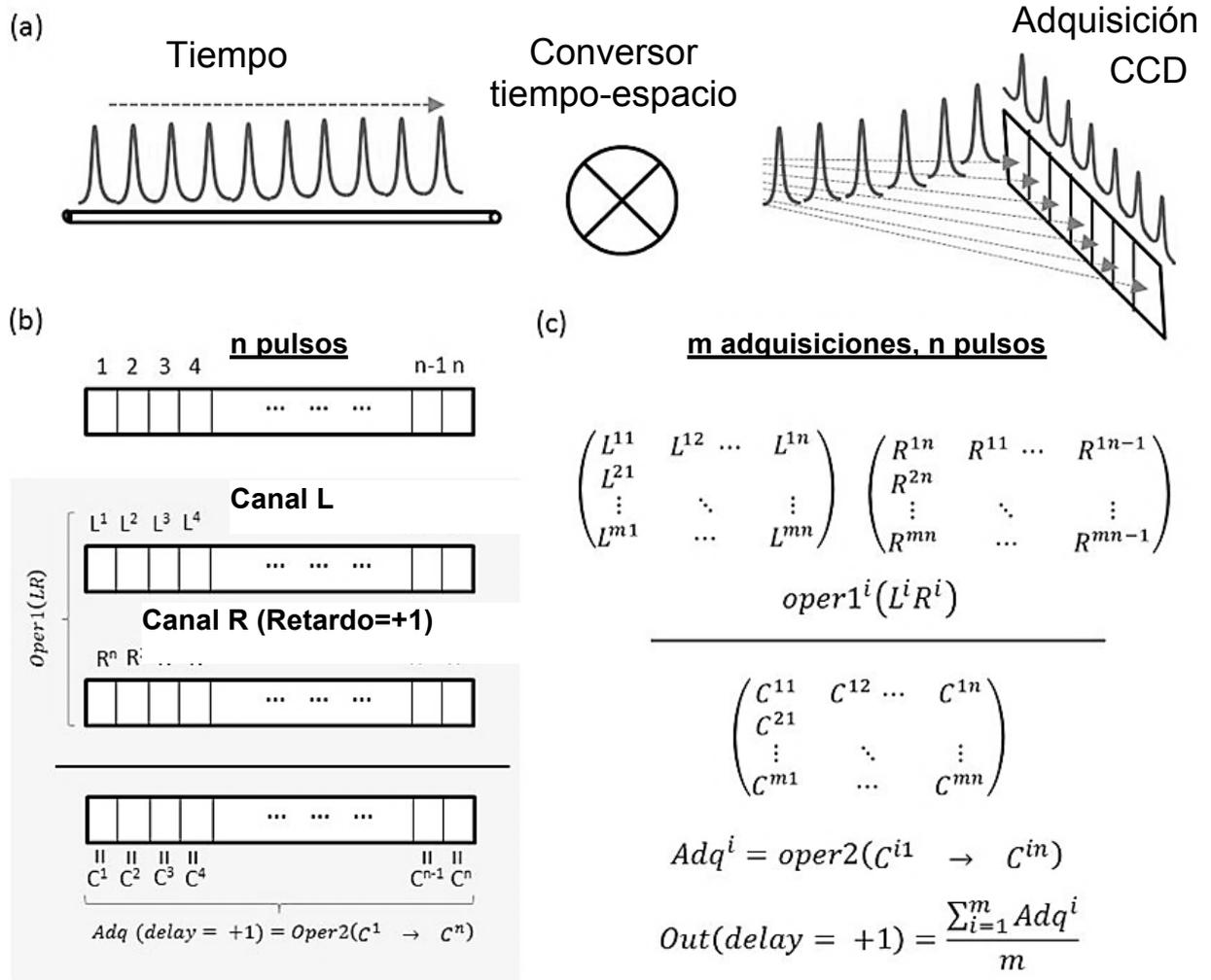
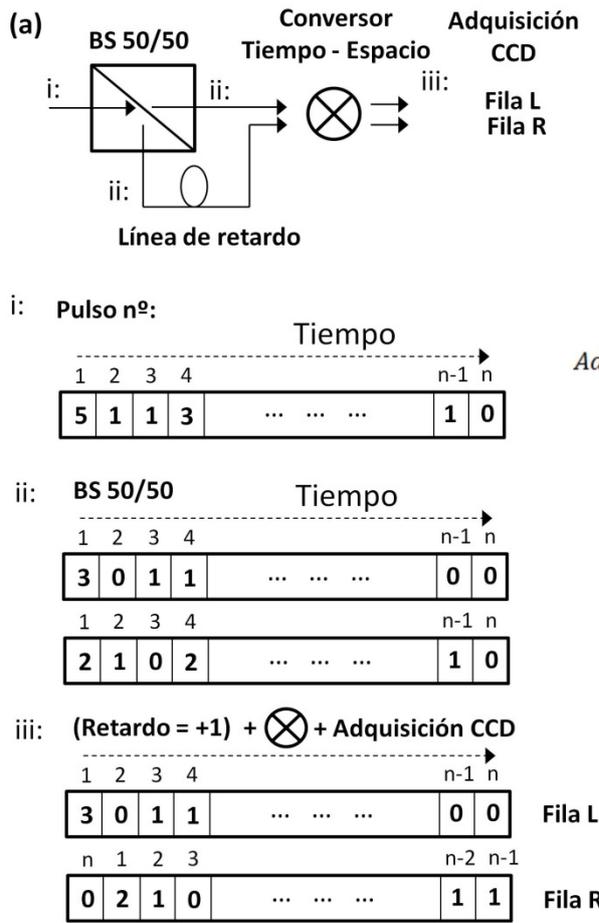


Fig. 7



(b) Análisis de la función $g^2(\tau)$:

$$C^j = Oper(L^j R^j) = L^j * R^j$$

$$C(\text{Retardo} = +1)$$

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|-----|--|--|-----|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | ... | | | n-1 | n |
| 0 | 0 | 1 | 0 | ... | | | 0 | 0 |

$$Adq(\text{Retardo}) = Oper2(C^1 \rightarrow C^n) = g^2(\text{Retardo}) =$$

$$= \frac{(\sum_{j=1}^n C^j)/n}{((\sum_{j=1}^n L^j)/n) * ((\sum_{j=1}^n R^j)/n)}$$

$$Out(\text{Retardo}) = \frac{\sum_{i=1}^m Adq_i(\text{Retardo})}{m}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^m g_i^2(\text{Retardo})}{m}$$

Fig. 8

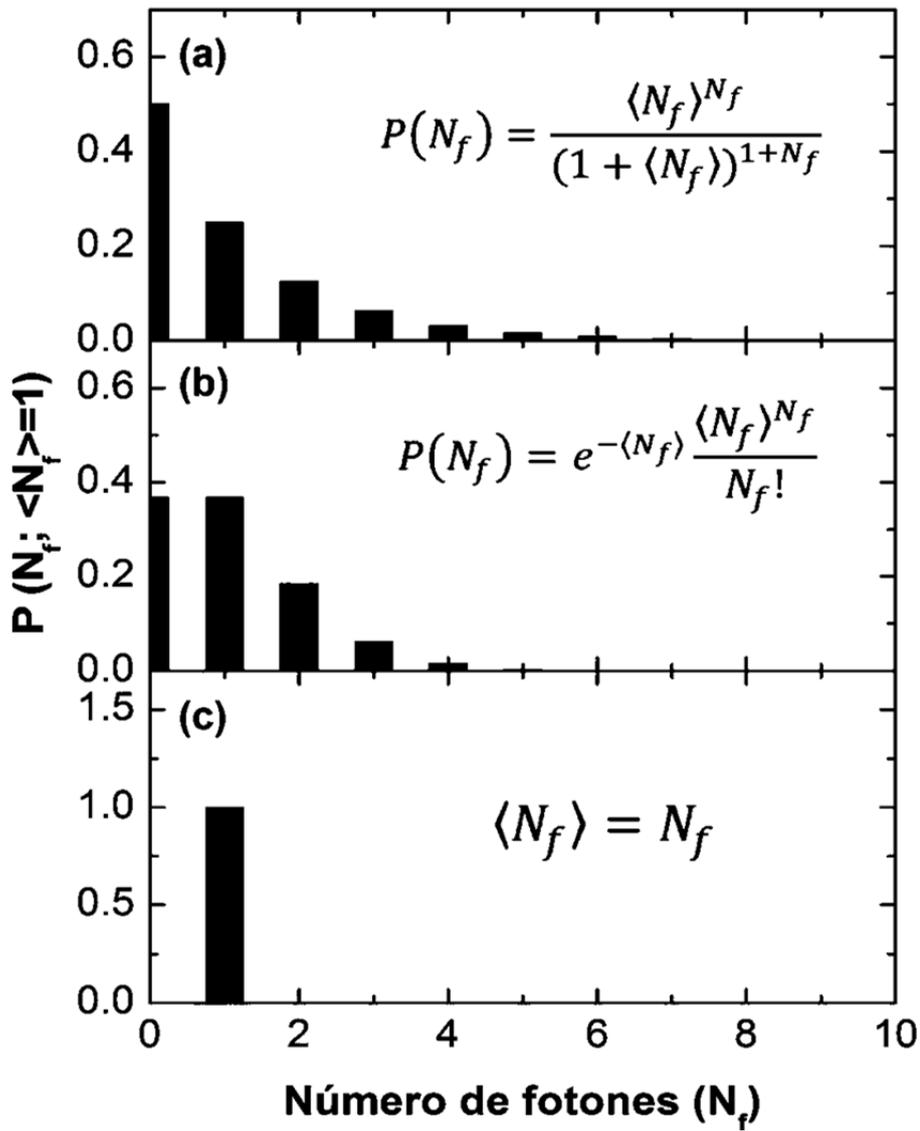


Fig. 9

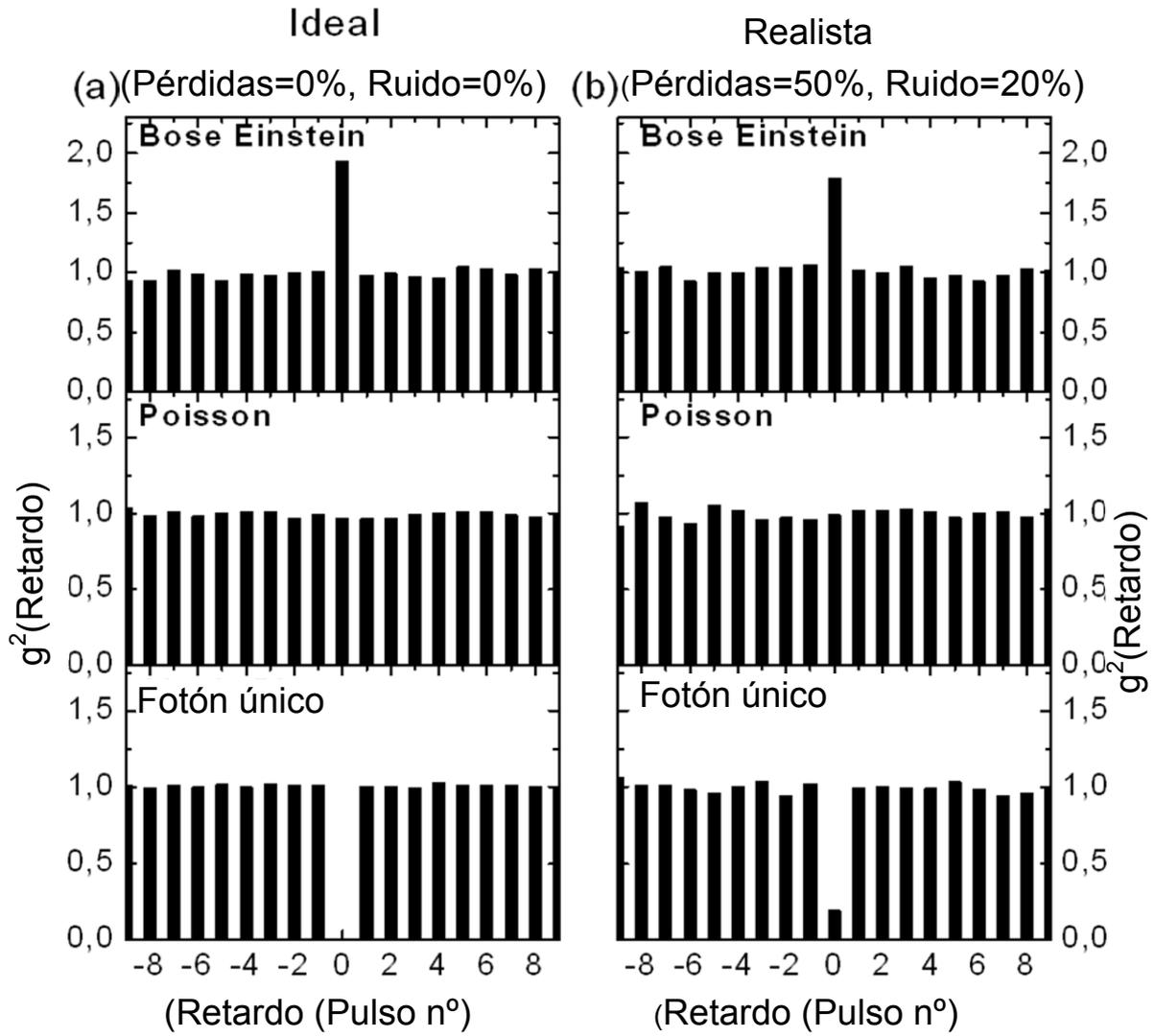


Fig. 10