

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 445 801**

51 Int. Cl.:

G01S 17/89 (2006.01)

G01S 7/486 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.03.2010** **E 10710121 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.11.2013** **EP 2414863**

54 Título: **Generación y detección de fotones entrelazados en frecuencia**

30 Prioridad:

04.04.2009 US 418568

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

05.03.2014

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)
100 North Riverside Plaza
Chicago, IL 60606-2016, US**

72 Inventor/es:

**HUNT, JEFFREY H.;
CAPRON, BARBARA A. y
PARAZZOLI, CLAUDIO G.**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 445 801 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

Generación y detección de fotones entrelazados en frecuencia

ANTECEDENTES

El entrelazamiento es un fenómeno de mecánica cuántica en el que las propiedades cuánticas de dos o más objetos son descritas uno con referencia a otro, incluso aunque los objetos individuales puedan estar espacialmente separados. Dos fotones, A y B, se dice que están entrelazados y forman un sistema bifotónico cuando, si se conoce una propiedad del fotón A, entonces la propiedad correspondiente del fotón B es también conocida. Por ejemplo, si se preparan dos fotones en un estado entrelazado de polarización, y uno de los fotones se observa que tiene una polarización específica, entonces el otro fotón tendrá una polarización conocida.

Se han propuesto sistemas para generar y detectar fotones entrelazados. Por ejemplo, un láser de Ti-zafiro genera un haz coherente, cristales no lineales convierten en sentido descendente el haz coherente a fotones entrelazados en frecuencia, y cristales no lineales convierten en sentido ascendente a continuación los fotones entrelazados a una frecuencia adecuada para su detección. Aquellos fotones que tienen un primer estado son enviados a lo largo de un primer trayecto, y aquellos fotones que tienen un segundo estado son enviados a lo largo de un segundo trayecto. Un detector de rangos detecta aquellos fotones enviados a lo largo del primer trayecto, y un segundo detector detecta aquellos fotones enviados a lo largo del segundo trayecto. Se realizan mediciones de coincidencia sobre los fotones detectados por el primer y el segundo detectores. El detector de rango es operado como una puerta de tiempo para considerar las coincidencias.

SUMARIO

De acuerdo con una realización recogida aquí, un método incluye utilizar un láser ultravioleta para generar un haz coherente. El haz coherente es convertido en sentido descendente para producir pares de fotones entrelazados en frecuencia. Para cada par entrelazado, un primer fotón es enviado a lo largo del primer trayecto y un segundo fotón es enviado a lo largo de un segundo trayecto. Un primer detector detecta aquellos fotones enviados a lo largo del primer trayecto, y un segundo detector detecta aquellos fotones enviados a lo largo del segundo trayecto. La detección es realizada en un régimen de un solo fotón. El cómputo de coincidencia es realizado sobre las salidas de los detectores, incluyendo la comparación de los bordes delanteros sobre salidas del primer y segundo detectores dentro de una ventana de tiempo. Una imagen es formada en un plano de correlación realizando una correlación de segundo orden de los campos eléctricos complejos de fotones detectados por el primer y segundo detectores y los cálculos de coincidencia de correspondencia como una función de las coordenadas x-y del segundo detector.

De acuerdo con otra realización descrita aquí, un sistema comprende un sistema basado en láser UV para generar un haz coherente y para convertir en sentido descendente el haz coherente para producir pares de fotones entrelazados en frecuencia. Para cada par, un primer fotón es enviado hacia abajo en un primer trayecto y un segundo fotón es enviado hacia abajo en un segundo trayecto. El sistema comprende además un primer detector de fotones para detectar fotones individuales enviados hacia abajo en el primer trayecto; un segundo detector de fotones para detectar fotones individuales enviados hacia abajo en el segundo trayecto; y un circuito, que responde a las salidas de los detectores, para cortar coincidencias de los pares de fotones. El circuito determina la coincidencia comparando los bordes delanteros en las salidas del primer y segundo detectores dentro de una ventana de tiempo. Se forma una imagen en un plano de correlación realizando una correlación de segundo orden de los campos eléctricos complejos de fotones detectados por el primer y el segundo detectores y los cálculos de coincidencia de correspondencia como una función de las coordenadas x-y del segundo detector.

Brida, y col., "Caracterización Especial de Fuente de Fotones Entrelazados de Conversión Descendente Paramétrica Espontánea en Régimen Pulsatorio de Femtosegundos" describe mediciones experimentales de coincidencia y formas de partículas individuales de señales de bifotones cuando los estados entrelazados en frecuencia son generados por cristales de Conversión Descendente Paramétrica Espontánea (SPDC) bombeados por cortos impulsos.

Dehlinger, D. y col., "Aparato de fotones entrelazados para el laboratorio de estudiantes universitarios" describe un aparato para proporcionar detectar fotones entrelazados en polarización. La fuente funciona por conversión descendente paramétrica espontánea de tipo I en una geometría de dos cristales. Los fotones son detectados en coincidencia con módulos de cómputo de un solo fotón.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La Figura 1 es una ilustración de un método de generar y detectar pares de fotones entrelazados en frecuencia.

La Figura 2 es una ilustración de un sistema para generar y detectar pares de fotones entrelazados en frecuencia.

La Figura 3 es una ilustración de un diagrama de tiempos para determinar la coincidencia de fotones detectados.

La Figura 4 es una ilustración de un contador de coincidencias.

La Figura 5 es una ilustración de un método de realizar seguimiento de objetos.

La Figura 6 es una ilustración de un método de realizar vigilancia.

La Figura 7 es una ilustración de un método de realizar inspección no destructiva.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Se ha hecho referencia a la Figura 1, que ilustra un método de generar y detectar fotones entrelazados en frecuencia. El entrelazamiento en frecuencia se refiere a un fenómeno de mecánica cuántica en el que dos fotones tienen diferentes longitudes de onda que están correlacionadas. Dos fotones pueden estar físicamente separados, y aún preservar el entrelazamiento de las frecuencias. Por ejemplo, si la energía total del sistema bifotónico es $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, entonces el conocimiento de ε_1 da también inmediatamente ε_2 y viceversa, y la energía ε de cualquier fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda. Los fotones pueden ser degenerados, que es tener igual energía ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) o pueden ser no degenerados, es decir $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$.

En el bloque 110, se utiliza un láser ultravioleta (UV) para generar un haz coherente. La región UV va desde aproximadamente 200-400 nm. Por ejemplo, el láser UV puede generar un haz coherente que tiene una longitud de 400 nm. El láser puede ser hecho funcionar en operación de onda continua.

En el bloque 120, el haz coherente es convertido en sentido descendente para producir fotones entrelazados en frecuencia. La conservación de la energía requiere que un fotón en una longitud de onda más corta produzca dos fotones en una longitud de onda más larga. Así la frecuencia de cada fotón producido, se sumará a la frecuencia del fotón original. Por ejemplo, un fotón a 400 nm puede convertirse en sentido descendente para producir dos fotones entrelazados degenerados, cada uno de 800 nm.

Los pares de fotones pueden ser degenerados o no degenerados. Los pares de fotones son producidos un par de fotones cada vez.

En el bloque 130, para cada par de fotones entrelazados, un primer fotón es enviado a lo largo de un primer trayecto y un segundo fotón es enviado a lo largo del segundo trayecto. En algunas realizaciones, un objeto a lo largo del primer trayecto dispersará los primeros fotones. El segundo trayecto no debe perturbar el entrelazamiento.

En el bloque 140, se usa un primer detector para detectar aquellos fotones enviados a lo largo del primer trayecto, y se usa un segundo detector para detectar aquellos fotones enviados a lo largo del segundo trayecto. El primer y el segundo detectores son operados en un régimen de un solo fotón. Es decir, cada detector detecta sólo un fotón cada vez. El emparejamiento proviene de recibir un solo fotón en dos detectores separados. Cada detector emite un impulso cuando se detecta un fotón.

En el bloque 150, se realiza el cómputo de coincidencia sobre las salidas de los detectores. El cómputo de coincidencia incluye la comparación de los bordes delanteros de los impulsos emitidos por el primer y segundo detectores.

Se hace referencia brevemente a la Figura 3. Los impulsos en las salidas del primer y segundo detectores son referenciados por las letras A y B. Una ventana de tiempo Δ_T Comienza en el instante t_1 , y termina en el instante t_3 . El instante t_1 corresponde a la ocurrencia del borde delantero del impulso B. Si el borde delantero del impulso A ocurre entre los instantes t_1 y t_3 , el par de fotones detectados es considerado coincidente.

Considérese un ejemplo en el que se producen 500 pares entrelazados por segundo. Un par será generado a una media de cada dos milisegundos. La ventana de tiempo Δ_T será menor de dos milisegundos. Si el borde delantero del impulso A ocurre dentro de la ventana de tiempo Δ_T , el par de fotones detectados es coincidente, y dará como resultado un cómputo de coincidencia.

Un dispositivo electrónico es utilizada para determinar si el borde delantero del impulso A ocurre dentro de la ventana de tiempo Δ_T . El comienzo y duración de la ventana del tiempo Δ_T es determinado en parte por la velocidad a la que el dispositivo electrónico puede comparar exactamente los bordes delanteros.

El comienzo y duración de la ventana de tiempo Δ_T es en parte una función del tiempo de llegada anticipada del impulso A. Una ventana de tiempo Δ_T mayor aumentará la probabilidad de identificar fotones coincidentes. Como resultado, se generará una imagen más rápidamente. Sin embargo, la imagen resultante tendrá menor resolución (más ruidosa). Si los intervalos son menores, se tardará más tiempo en generar una imagen, y será más difícil detectar fotones que sean coincidentes. Sin embargo, la imagen resultante tendrá una mayor resolución.

El comienzo de la ventana de tiempo Δ_T puede o no ocurrir cuando el segundo detector detecta realmente un fotón. En algunas realizaciones, un trayecto puede ser más largo que el otro trayecto. Para asegurar la coincidencia en estas realizaciones, se le da al trayecto más corto la misma longitud efectiva que al trayecto más largo. Varios ejemplos de dar al trayecto más corto la misma longitud efectiva son descritos a continuación en conexión con la Figura 2.

El método de la Figura 1 puede producir fotones entrelazados a mayor potencia, mayor velocidad de producción, mejor ciclo de servicio y mayor eficiencia que la operación pulsatoria de un láser de Ti-zafiro. En operación en onda continua, no hay reducción del ciclo de servicio.

5 El método de la Figura 1 implica sólo una única conversión descendente no lineal, desde la longitud de onda permanente a las longitudes de onda de los fotones entrelazados. En contraste, un sistema que realiza conversión ascendente y a continuación una conversión descendente subsiguiente requeriría dos desplazamientos ópticos no lineales. Como cada desplazamiento reduce la eficiencia de la generación de fotones, el método de la Figura 1 es más eficiente.

10 Un láser UV de onda continua que opera a una potencia menor de la potencia total puede aún producir 500 pares de fotones por segundo, un orden de magnitud mayor que otros sistemas. Funcionando a potencia total, podrían producirse por segundo 10 veces de pares de fotones como mínimo.

15 La detección de los bordes delanteros es más rápida que las mediciones de tiempo-amplitud. Definir la ventana de tiempos por los bordes sobre la electrónica permite ventanas mucho menores en lugar de esperar que la electrónica desactive la ventana.

20 Un método recogido aquí no está limitado a un láser UV. Un láser que opera en un régimen diferente puede ser seleccionado, siempre que cristales no lineales conviertan en sentido descendente bien a la longitud de onda seleccionada y que detectores de un solo fotón disponibles trabajen a la longitud de onda convertida en sentido descendente (o rebajada).

25 En la realización preferida, un láser UV es utilizado en combinación con fotodiodos de avalancha. La eficiencia de los detectores de silicio de corriente tales como los fotodiodos de avalancha cae por debajo de 900 nm y corta a aproximadamente 1 micra (1000 nm). La deficiencia pico ocurre a 850-900 nm. La longitud de onda convertida en sentido descendente para fotodiodos de avalancha puede ser del rango de 700-800 nm, que es producida por un láser UV, o una longitud de onda muy corta visible (púrpura intenso). La longitud de onda convertida en sentido descendente no está en el rango de 850-900 nm, pero está bastante próxima. Los láser de 400 nm disponibles tienen buenas características operativas, tales como buena potencia, buena estabilidad, y larga duración de vida operativa.

30 Un láser podría en vez de ello ser operado en modo de impulsos. Sin embargo, el láser tendría que ser controlado para producir un par entrelazado en un instante sin grandes retardos entre pares.

35 Se hace referencia a la Figura 2, que ilustra un sistema 200 para generar y detectar pares de fotones entrelazados. Un láser 210 genera un haz coherente a la longitud de onda λ_0 . El haz ilumina un cristal no lineal 220, que realiza la conversión descendente para generar dos fotones a λ_1 y λ_2 . Las condiciones de coincidencia de fase requieren que $\frac{1}{\lambda_0} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$ y $\vec{k}_0 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$. La longitud de onda específica es obtenida variando el ángulo del cristal 330 con relación al haz entrante.

40 En otras realizaciones, la conversión en sentido descendente puede ser realizada mediante Niobato de Litio periódicamente polarizado (PPNL). Aún en otras realizaciones, la conversión en sentido descendente puede ser realizada por cualquiera de las siguientes técnicas, que incluyen pero no están limitadas a la conversión descendente paramétrica (PDC); mezclado de cuatro ondas en cristales fotónicos (véase por ejemplo. de Dood y col., " Cristales Fotónicos No lineales como una Fuente de Fotones Entrelazados", PhysRevLett.93.050405, 2004); uso de fibras microestructuradas para generar campos electromagnéticos muy confinados (véase por ejemplo Sharping y col., " Fotones gemelos correlacionados cuánticamente a partir de fibra de microestructura" Optics Express 3086, vol. 12, nº 14, 2004); pozos cuánticos de semiconductores (véase, por ejemplo, Hayat y col., "Fuente de Entrelazamiento de Elevada Tasa o Índice mediante Emisión Bifotónica a partir de Pozos Cuánticos de Semiconductores" arXiv quant-ph/0612124, 2006); estructuras de punto cuánticas (véase por ejemplo, Stevenson y col., "Una fuente semiconductor de pares de fotones entrelazados disparados" Nature, vol. 439, págs. 179-82, 2006); y fuentes brillantes de fotones dicromáticos (véase, por ejemplo, Pelton y col., "Fuente brillante de un solo modo espacial de pares de fotones entrelazados en polarización, no degenerados de frecuencia que utilizan KTP periódicamente polarizado" Optical Express 3573, vol. 12, nº 15, 2004).

55 Un dispositivo 230 envía los fotones que tienen longitud de onda λ_1 hacia abajo en un primer trayecto P1 y los fotones que tienen longitud de onda λ_2 hacia abajo en un segundo trayecto P2. Si los fotones entrelazados no son degenerados (es decir, $\lambda_1 \neq \lambda_2$), el dispositivo 230 puede ser un divisor de haz de longitud de onda. Si los fotones entrelazados son degenerados (es decir $\lambda_1 = \lambda_2$) el dispositivo 230 puede ser un divisor de haz de intensidad o un polarizador.

60 Si un objeto se encuentra en el primer trayecto P1, el objeto será iluminado por los fotones que tienen la primera frecuencia. Si es así iluminado, el objeto dispersará los fotones que tienen la primera frecuencia.

El segundo trayecto no debe perturbar el entrelazamiento. Por ejemplo, el segundo trayecto P2 puede ser largo y sin oscurecer, puede ser corto y en un entorno controlado, etc.

Un primer detector 240 está posicionado para detectar los fotones dispersados por el objeto. Un segundo detector 250 detecta fotones enviados a lo largo del segundo trayecto. Ambos detectores 240 y 250 son capaces de contar fotones individuales. Un detector 240 ó 250 puede ser un solo detector a través del cual son escaneados o explorados los fotones, una agrupación lineal a través de la cual son escaneados los fotones, o una agrupación de dos dimensiones que no requiere escaneado. Cada detector 240 y 250 detecta un campo electromagnético y emite fase y amplitud del campo detectado.

En algunas realizaciones, estos detectores 240 y 250 de cómputo de un solo fotón pueden ser fotomultiplicadores, que utilizan el efecto fotoeléctrico, combinado con una serie de multiplicadores de electrones. En otras realizaciones, pueden utilizarse fotodiodos de avalancha. Los fotodiodos de avalancha son mucho menores que los fotomultiplicadores (detectores de estado sólido frente a tubos de vidrio) y son apantallados más fácilmente contra las fuentes de ruido de fondo. Con el fin de detectar fotones individuales, un fotodiodo de avalancha es cargado en sentido inverso por encima de la tensión de rotura. Cuando un fotón es absorbido el diodo forma un canal conductor. Debido a que hay una capacitancia inherente al diodo, estará presente una carga superficial, que implica típicamente 10^8 cargas. Estas cargas serán todas descargadas simultáneamente, creando el impulso de salida que representa la detección del fotón.

Un circuito de coincidencia 260 determina si los fotones detectados por los detectores 240 y 250 son coincidentes.

Se hace referencia adicional a la Figura 4, que ilustra un ejemplo de un circuito 260 para realizar detección de coincidencia sobre las salidas A y B del primer y segundo detectores 240 y 250. El circuito 260 incluye biestables 410 y 420 disparados de borde ascendente para comparar los bordes delanteros de los impulsos A y B generados por el primer y segundo detectores 240 y 250.

Se hace referencia adicional a la Figura 3. El borde delantero del impulso B ocurre en el instante t_1 , y el borde delantero del impulso A ocurre en el instante t_2 . El impulso C es un impulso de temporización que es generado por el circuito 260. La ventana de tiempo Δ_T comienza en el instante t_1 y termina en el instante t_3 , que corresponde al borde delantero del impulso de temporización C. La Figura 3 también muestra que el borde delantero del impulso A ocurre dentro de la ventana de tiempo Δ_T . Por ello, se genera un impulso D de salida de coincidencia.

En algunas realizaciones, la duración de la ventana de tiempo es fija. La ventana comienza en el instante t_1 , y termina una cantidad de tiempo fijada posteriormente (por ejemplo 10 ns).

En otras realizaciones, la duración de la ventana del tiempo es ajustable. Como se ha ilustrado en la Figura 3, Δ_{T1} representa el tiempo antes de la llegada del borde delantero del impulso A, y Δ_{T2} representa el tiempo después de la llegada del borde delantero del impulso A. Los dos lados de la ventana de tiempo puede ser movidos independientemente uno del otro. De ese modo, las peculiaridades de la electrónica (por ejemplo la forma exacta del borde ascendente, la forma del impulso procedente del detector) serán más fáciles de resolver.

Utilizando biestables D, un ensayo ha mostrado que $\Delta_{T1} = 8$ ns, y $\Delta_{T2} = 2$ ns, para una ventana de tiempo de aproximadamente 10 ns. Esta ventana puede ser hecha más amplia, y posiblemente más simétrica. La velocidad del circuito 260 no proviene de la velocidad de los biestables 410 y 420, sino más bien del uso de detección de borde en generar las ventanas de tiempo. Como el circuito 260 de la Figura 4, utiliza solo dos biestables 410 y 420, sus bordes de activación relativa crean las ventanas, así las ventanas están solamente limitadas por el tiempo de subida de la puerta del biestable.

Se hace referencia de nuevo a la Figura 2. El sistema 200 puede asegurar coincidencia dando a los trayectos P1 y P2 la misma longitud efectiva. En algunas realizaciones, los fotones a lo largo del trayecto más corto pueden ser ópticamente retardados y así los impulsos alcanzan el circuito 260 aproximadamente al mismo tiempo. Como un primer ejemplo, los fotones a lo largo del segundo trayecto P2 pueden ser retardados ópticamente añadiendo espejos y forzando a los fotones a desplazarse sobre una distancia más larga. Como un segundo ejemplo, los fotones a lo largo del segundo trayecto P2 pueden ser retardados ópticamente insertando un elemento óptico con un índice de refracción > 1 en el segundo trayecto P2. Esto ralentizará los fotones transmitidos a través del elemento.

En algunas realizaciones, el circuito 260 puede asegurar coincidencia generando sincronización de tiempo interna. Por ejemplo, el circuito 260 pueden medir el retardo de tiempo entre la llegada de los fotones de interés haciendo una medición de correlación cruzada entre los fotones de una cierta longitud de onda estrecha deseada. Habrá un pico (es decir que muestre muchas coincidencias) en el tiempo de retardo apropiado entre los dos canales.

La generación de los fotones entrelazados en frecuencia no está limitada a fotones que tiene solamente dos frecuencias diferentes. Pueden ser generados y utilizados fotones que tienen tres, cuatro o más de frecuencias.

5 Por ejemplo, los así llamados "Estados N00N" pueden ser usados en el segundo trayecto P2. Un estado N00N es el estado entrelazado mecánico cuántico descrito por la ecuación:

$$|\Psi_{N00N}\rangle = |N\rangle_a |0\rangle_b + e^{i\theta} |0\rangle_a |N\rangle_b$$

10 Esta ecuación representa una superposición de N partículas en modo a con cero partículas en modo b, y viceversa. Cuando se utiliza un estado N00N de N fotones, la resolución es proporcional a λ/N , donde λ es la longitud de onda del fotón. Así, la resolución de formación de imágenes es mejor para estados N00N de mayor orden. Los fotones puede ser generados en un estado N00N de orden eNésimo, donde $N \geq 2$.

15 Un método descrito aquí no está limitado a ningún uso particular. Ejemplos incluyen, pero no están limitados a, detección y comunicaciones. Las Figuras 5-7 proporcionan ejemplos de diferentes métodos de detección; seguimiento, vigilancia, e inspección no destructiva (NDI).

20 La formación de imágenes con fotones entrelazados en frecuencia ofrece numerosas ventajas. El entrelazamiento de fotones puede extender la capacidad de formación de imágenes más allá de los límites tradicionales observados para la luz clásica. Puede producir imágenes que pueden ser difíciles de obtener debido a la falta de resolución o al exceso de ruido. Debido al entrelazamiento, la imagen puede tener una mayor resolución de lo que tendría la imagen que ha sido formada solo por los fotones que tienen la primera frecuencia.

25 Un método y sistema recogido aquí puede producir fotones entrelazados a una alta tasa; por ello, puede ser recogida más señal. La formación de imágenes resultante tiene una resolución mejorada o una generación de imágenes más rápida, o alguna combinación de ambas.

30 Las longitudes de onda de los fotones enviados hacia abajo en el primer trayecto pueden ser seleccionadas para penetrar en oscurecimientos o zonas oscuras, tales como nubes o paredes. Además, esas longitudes de onda pueden ser diferentes de la longitud de onda de los fotones que determinan la resolución de la formación de imágenes.

35 Un método descrito aquí puede también producir imágenes con baja iluminación debido a que opera en el régimen de un solo fotón. Normalmente, la formación de imágenes requiere dirigir una luz sobre un objetivo (también conocido como formación de imágenes activa) y buscar la luz de retorno. Consecuentemente, un objetivo puede saber que está siendo detectado. Con el sondeo o exploración de nivel de fotones sin embargo, un objeto puede ser detectado de manera encubierta.

40 Una imagen puede ser formada en un plano de correlación realizando una correlación de segundo orden de los campos eléctricos complejos de fotones detectados por el primer y el segundo detectores. Los cálculos de coincidencia son hechos corresponder como una función de las coordenadas x-y del segundo detector 240. El cálculo de coincidencia mide el tiempo medio del producto del campo eléctrico complejo medido en el primer detector 230 multiplicado por el campo eléctrico complejo medido en el segundo detector 240. El campo eléctrico complejo puede ser descrito en términos de fase y de amplitud. Un ejemplo de calcular la correlación de segundo orden está descrito en un documento de Pittman y col., "Dos ópticas geométricas de fotones", "The Physical Review A, vol. 53, n° 4, 1996, págs. 2008 y 2813-14.

45 De acuerdo con el documento de Pittman y col., la tasa de cálculo de coincidencia puede ser calculada como una función de los parámetros espaciales transversales implicados, y esta función puede ser minimizada para obtener la imagen más nítida. Sin embargo, no siempre se requiere la imagen "más nítida". Aunque las imágenes más nítidas podrían ser preferidas para algunas realizaciones del presente invento, imágenes ligeramente borrosas o desenfocadas podrían ser adecuadas para otras realizaciones.

50 Se hace referencia ahora a la Figura 5, que ilustra un método para realizar el seguimiento de un objeto. El sistema ilustrado en la Figura 2 puede ser utilizado para seguir un objeto. En el bloque 510, una imagen de un objeto es adquirida utilizando fotones entrelazados no degenerados. La primera frecuencia es seleccionada de modo que los fotones pueden pasar a través del oscurecimiento aéreo e iluminar el objeto que está siendo seguido. Si el objeto es un avión u otro objeto aéreo, la primera frecuencia es seleccionada para pasar a través de las nubes, niebla, y otros oscurecedores atmosféricos (por ejemplo turbulencia).

60 Para seguir objetos en el mar, incluso objetos que están bajo el agua, la primera frecuencia es seleccionada para penetrar en el agua. Para seguir objetos terrestres, la primera frecuencia es seleccionada de modo que los fotones puedan pasar a través del aire, polvo, humo, niebla y otros oscurecedores atmosféricos.

La segunda frecuencia puede ser seleccionada para permitir discernir detalles del objeto en la imagen adquirida.

5 Un telescopio, un espejo apuntador, u otro conjunto óptico pueden ser utilizados para dirigir los fotones que tienen la primera frecuencia hacia el objeto. Cualquiera cosa que esté cubierta en el campo de visión del primer detector y en el campo de visión del segundo detector aparecerá en la imagen adquirida.

10 En el bloque 520, un procesador estima una posición esperada para el objeto que está siendo seguido. Por ejemplo, un objeto es identificado en la imagen adquirida. La posición del objeto en la imagen actual es comparada a la posición del objeto en una o más imágenes previamente adquiridas, y la diferencia o diferencias entre las posiciones es utilizada para estimar donde estará el objeto durante la siguiente adquisición de imagen. Además, puede realizarse un reconocimiento de objeto para determinar si el objeto correcto está siendo seguido (por ejemplo comparando el objeto adquirido a una imagen de referencia almacenada).

15 En el bloque 530, el hardware está ajustado con el fin de ver el objeto en la posición esperada. Por ejemplo, el telescopio, espejo apuntador u otro conjunto óptico podrían ser reorientados para buscar en la posición esperada.

Las funciones en los bloques 510, 520 y 530 pueden ser repetidas para el seguimiento continuo del objeto.

20 Se hace ahora referencia a la Figura 6, que ilustra un método para realizar la vigilancia sobre un objeto que está oscurecido. El hardware ilustrado en la Figura 2 puede ser utilizado para realizar la vigilancia. En el bloque 610, se generan fotones entrelazados en frecuencia no degenerados. En el bloque 620, aquellos fotones que tienen una primera frecuencia son dirigidos a lo largo de un primer trayecto hacia un oscurecimiento. La frecuencia del primer haz es seleccionada de modo que los fotones pasen a través del oscurecimiento e iluminen el objeto u objetos situados detrás del oscurecimiento (por ejemplo, paredes, ventanas, y otras estructuras artificiales). La frecuencia puede ser también seleccionada para anticipar medidas de contravigilancia.

30 También en el bloque 620, aquellos fotones entrelazados que tienen una segunda frecuencia son dirigidos a lo largo de un segundo trayecto. La segunda frecuencia es seleccionada para proporcionar suficiente resolución de imagen.

En el bloque 630, los fotones dispersados por el objeto u objetos oscurecidos y los fotones a lo largo del segundo trayecto son detectados. En el bloque 640, se genera una imagen. La imagen adquirida revelará detalles de objetos situados detrás del oscurecimiento.

35 Se hace ahora referencia a la Figura 7, que ilustra un método para realizar una inspección no destructiva (NDI) de estructuras hechas de material compuesto. El hardware ilustrado en la Figura 2 puede ser utilizado para realizar la NDI. En el bloque 710, se generan fotones entrelazados en frecuencia no degenerados. En el bloque 720, aquellos fotones que tienen una primera longitud de onda son dirigidos a lo largo de un trayecto hacia la estructura compuesta. Pueden utilizarse ondas de radio frecuencia.

40 También en el bloque 720, aquellos fotones que tienen una longitud de onda de resolución de imágenes son dirigidos a lo largo de un segundo trayecto. La frecuencia de resolución de imágenes puede estar en el espectro del milímetro para obtener una resolución de formación de imágenes mayor que permite que se identifiquen cambios estructurales (por ejemplo, grietas, corrosión).

45 En el bloque 730, los fotones son detectados. En el bloque 740, se genera una imagen.

50 Las funciones en los bloques 710 -740 pueden ser repetidas para generar imágenes diferentes de estructuras diferentes (bloque 750). Además, el foco de aquellos fotones que tienen la primera longitud de onda puede ser ajustado para ver estructuras a diferentes profundidades. Por ejemplo, puede utilizarse un primer foco para ver cambios estructurales en un panel compuesto. A continuación puede utilizarse un segundo foco para ver cambios estructurales en un miembro compuesto situado por detrás del panel.

55 En el bloque 760, las imágenes son analizadas para identificar cambios estructurales en las estructuras. Los cambios estructurales pueden dispersar o bloquear fotones. Dependiendo del cambio estructural, podría aparecer un cambio estructural en la imagen como un parche más brillante, o uno más oscuro, o un parche que tiene una textura diferente.

60 El método de la Figura 7 puede ser utilizado para realizar una NDI sobre ciertas estructuras de avión (paneles, rigidizadores, nervios, largueros, etc.,) que están hechos de un material compuesto tal como plástico reforzado con fibra de carbono (CRFP). Por ejemplo, el método puede ser utilizado para identificar grietas, corrosión, y otros cambios de estado en estructuras de aviones.

REIVINDICACIONES

1.- Un método que comprende:

5 utilizar (110) un láser UV (200) para generar un haz coherente;
convertir en sentido descendente (120) el haz coherente para producir pares de fotones entrelazados en frecuencia;
para cada par enlazado, enviar (130) un primer fotón a lo largo de un primer trayecto (P1) y un segundo fotón a lo
10 largo de un segundo trayecto (P2);
utilizar (140) un primer detector (240) para detectar aquellos fotones enviados a lo largo del primer trayecto, y un
segundo detector (250) para detectar aquellos fotones enviados a lo largo del segundo trayecto, siendo la
detección realizada en un régimen de un solo fotón; y
realizar (150) el cómputo de coincidencia sobre salidas de los detectores, incluyendo la comparación de los bordes
15 delanteros sobre las salidas del primer y segundo detectores dentro de una ventana de tiempo;
caracterizado por formar una imagen en un plano de correlación realizando una correlación de segundo orden de
los campos eléctricos complejos de fotones detectados por el primer y segundo detectores; y los cálculos de
coincidencia de correspondencia como una función de las coordenadas x-y del segundo detector.

2.- El método según la reivindicación 1, en el que el láser (200) es operado en modo de onda continua.

20 3.- El método según la reivindicación 1, en el que el primer (240) y el segundo (250) detectores son operados en un
régimen de un solo fotón.

25 4.- El método según la reivindicación 1, en el que al primer (P1) y al segundo (P2) trayectos se les ha dado la misma
longitud.

5.- El método según la reivindicación 1, en el que cada detector (240, 250) emite un impulso (A, B) para indicar la
detección de un fotón; y en el que el comienzo (t_1) de cada ventana de tiempo (ΔT_1 , ΔT) corresponde al borde delantero de
un impulso (B) proporcionado por el segundo detector (250).

30 6.- El método según la reivindicación 5, en el que los lados de la ventana de tiempo (ΔT_1 , ΔT) son ajustables de modo
independiente.

35 7.- El método según la reivindicación 1, en el que los fotones son generados en un estado N00N de orden eNésimo,
donde $N \geq 2$.

8.- El método según la reivindicación 1, y que es además un método de seguimiento de un objeto, comprendiendo el
método además adquirir imágenes que contienen un objeto; y estimar posiciones del objeto basándose en las imágenes
adquiridas.

40 9.- El método según la reivindicación 8, en el que los fotones enviados a lo largo del primer trayecto (P^1) tienen una
longitud de onda para pasar a través del oscurecimiento aéreo.

45 10.- El método según la reivindicación 1, y que además es un método de realizar vigilancia, en el que los fotones enviados
a lo largo de un primer trayecto (P1) son dirigidos (620) hacia un oscurecimiento y tienen una longitud de onda para pasar
a través del oscurecimiento, y en el que los fotones que pasan a través del oscurecimiento son dispersados por
cualquiera objetos situados detrás del oscurecimiento.

50 11.- El método según la reivindicación 1, y que es además un método de realizar inspección no destructiva de un objeto,
comprendiendo el método además analizar la imagen para identificar cualesquiera cambios estructurales.

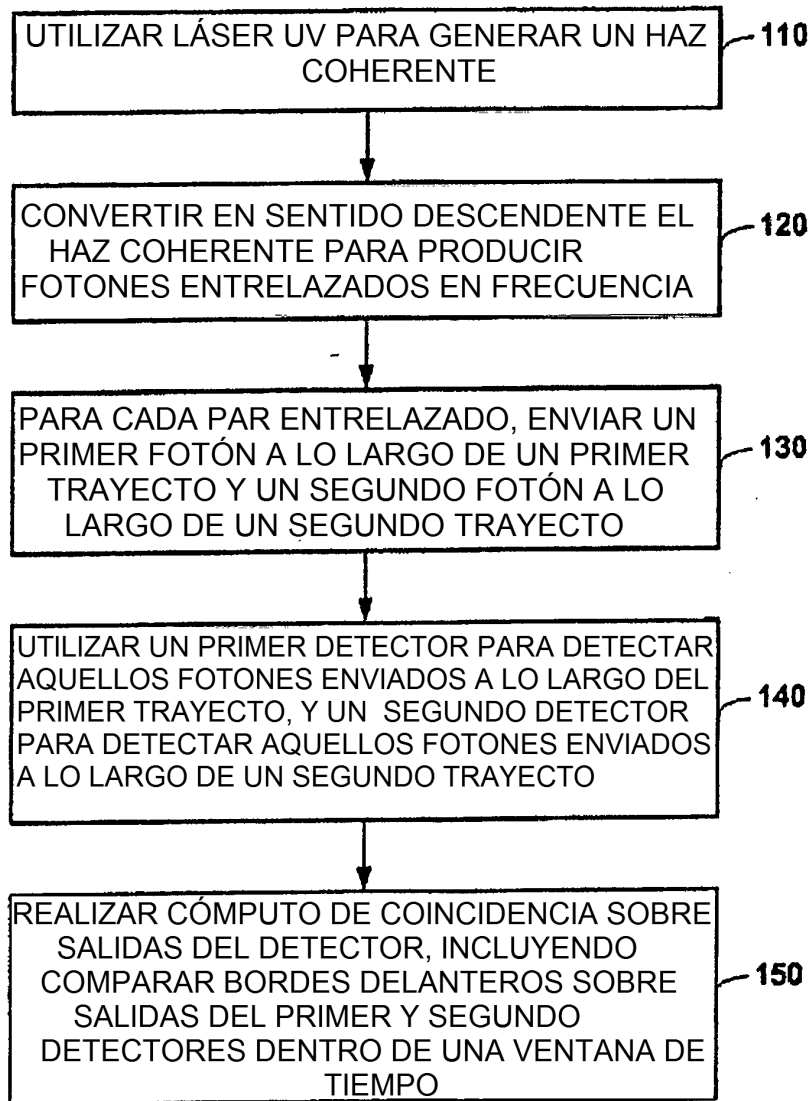
12.- Un sistema que comprende:

un sistema basado en láser (200) para generar pares de fotones entrelazados en frecuencia y, para cada par, enviar un
primer fotón a lo largo de un primer trayecto (P1) y un segundo fotón a lo largo de un segundo trayecto (P2);
55 un primer detector de fotones (240) para detectar fotones individuales enviados a lo largo del primer trayecto;
un segundo detector de fotones (250) para detectar fotones individuales enviados a lo largo del segundo trayecto; y
un circuito (260), que responde a las salidas de los detectores, para contar coincidencias de los pares de fotones,
incluyendo determinar coincidencias comparando los bordes delanteros en las salidas del primer y segundo detectores
dentro de una ventana de tiempo;
60 **caracterizado por que** una imagen es formada en un plano de correlación realizando una correlación de segundo orden
de los campos eléctricos complejos de fotones detectados por el primer y el segundo detectores y los cálculos de
coincidencia de correspondencia como una función de las coordenadas x-y del segundo detector.

5 13.- El sistema según la reivindicación 12, en el que el sistema basado en un láser (200) incluye un láser ultravioleta (210) y un cristal no lineal (220) para convertir en sentido descendente una salida del láser, y en el que el primer (240) y el segundo (260) detectores de fotones incluyen fotodiodos de avalancha, por lo que una conversión en sentido ascendente no es realizada antes de la conversión en sentido descendente.

14.- El sistema según la reivindicación 12, en el que el sistema basado en un láser (200) incluye un láser operable en modo de onda continua para generar un par de fotones de uno en uno.

FIG. 1



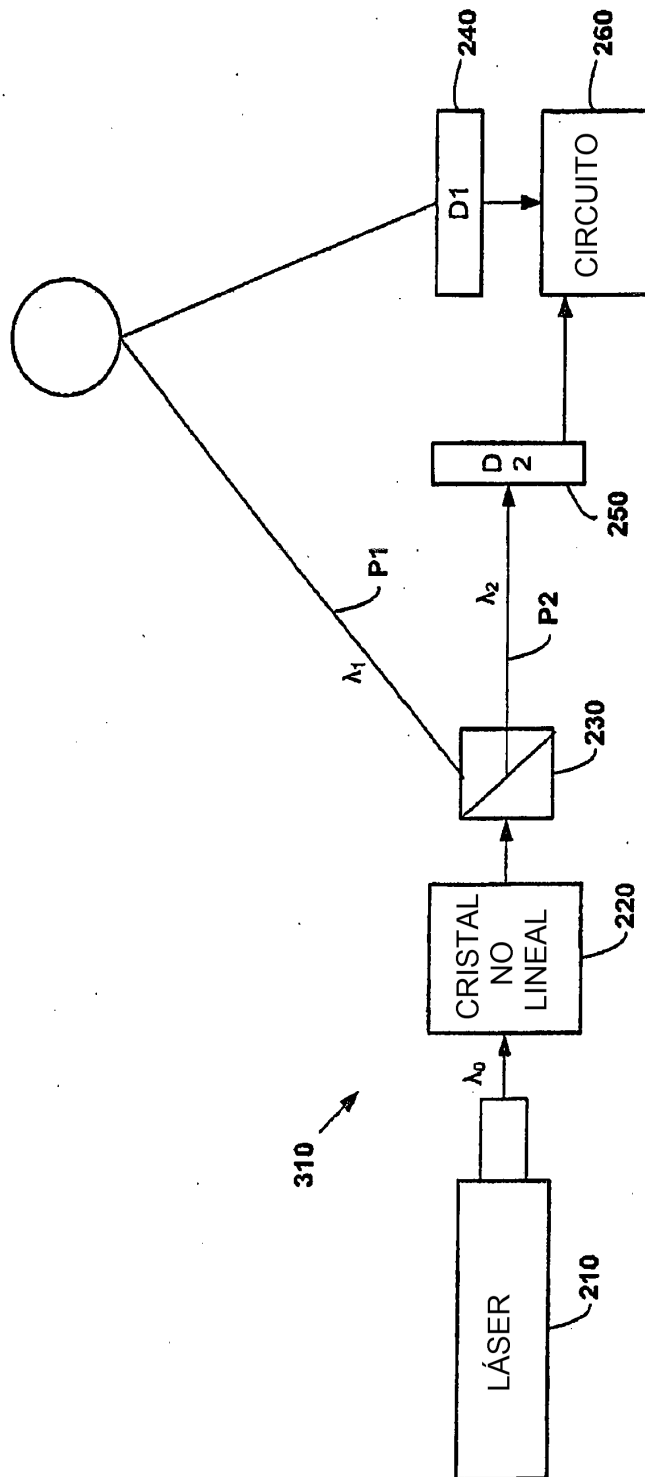


FIG. 2

FIG. 3

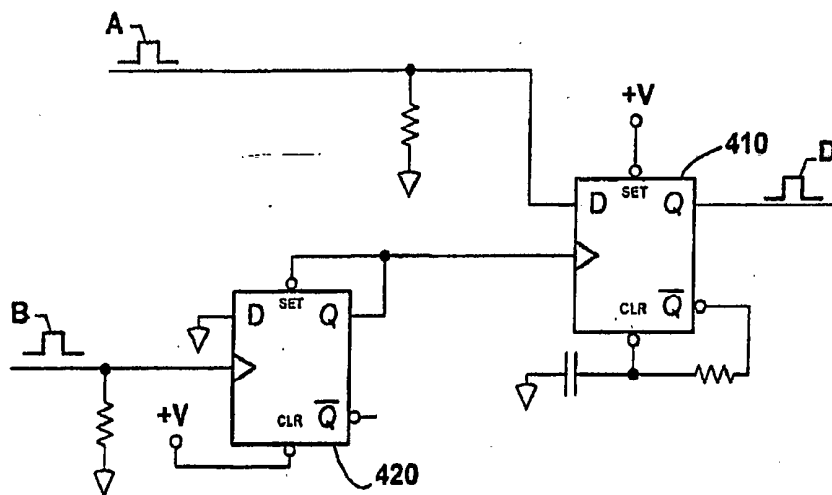
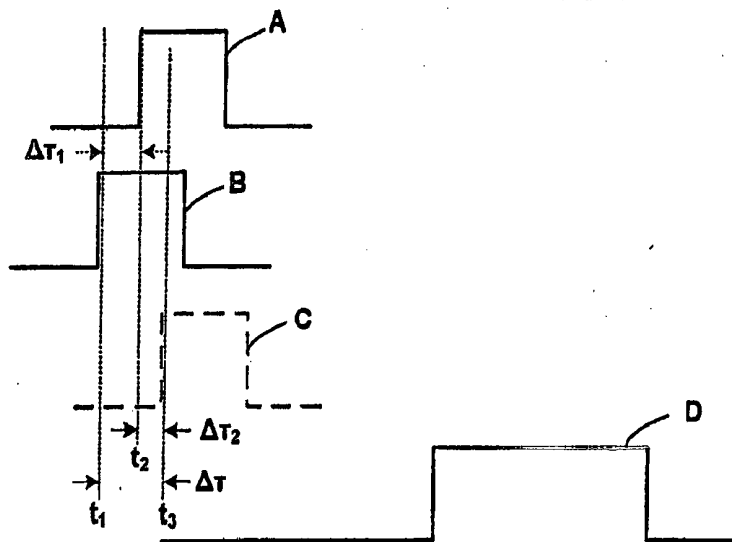


FIG. 4

FIG. 5

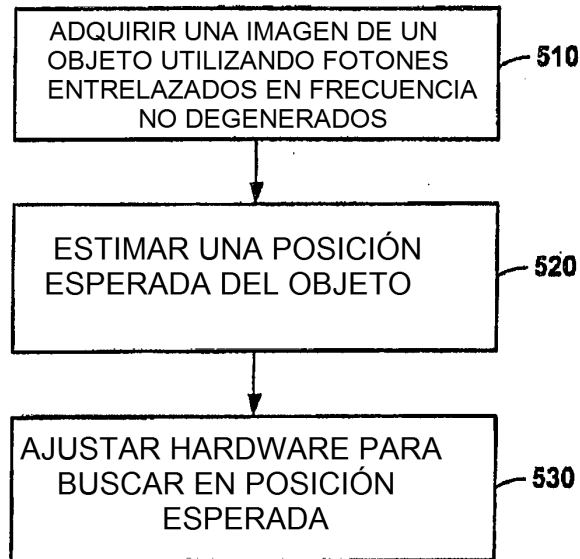


FIG. 6

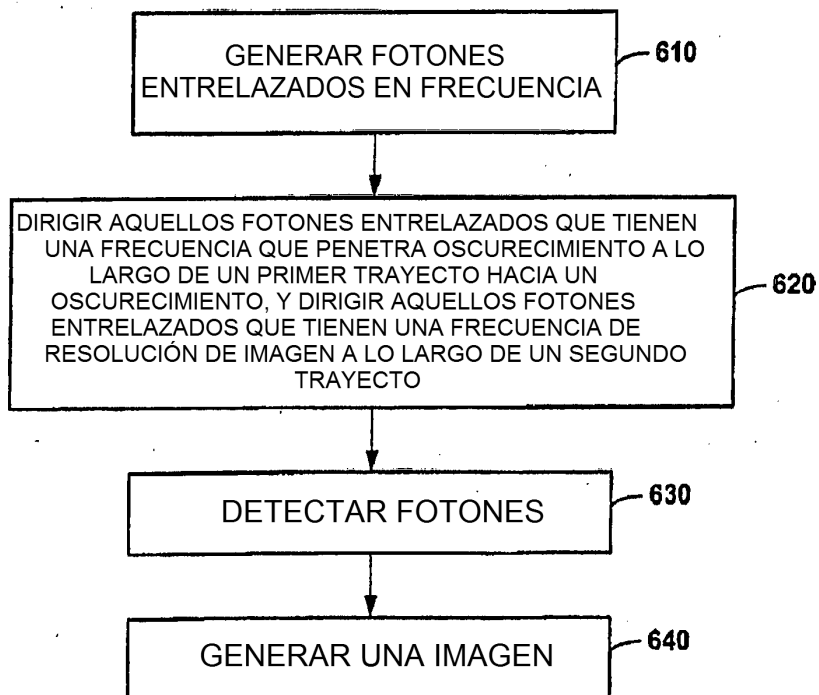


FIG. 7

