

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 572 102**

51 Int. Cl.:

G01B 11/26 (2006.01)

G01C 1/00 (2006.01)

G06N 99/00 (2010.01)

G01D 5/34 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.05.2014 E 14425066 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.02.2016 EP 2811258**

54 Título: **Inclinómetro fotónico ultrasensible que utiliza el momento angular orbital de la luz, y método de medición angular correspondiente**

30 Prioridad:

03.06.2013 IT RM20130318

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

30.05.2016

73 Titular/es:

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA "LA SAPIENZA" (20.0%)

P. Le Aldo Moro 5

00185 Roma (RM), IT;

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II" (20.0%);

ICFO - INSTITUT DE CIENCIES FOTONIQUES (20.0%);

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (20.0%) y

NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE (20.0%)

72 Inventor/es:

D'AMBROSIO, VINCENZO;

SPAGNOLO, NICOLÒ;

DEL RE, LORENZO;

MARRUCCI, LORENZO;

SLUSSARENKO, SERGEI;

AOLITA, MARIO LEANDO;

WALBRON, STEPHEN PATRICK;

KWEK, LEONG CHUAN;

LI, YING y

SCIARRINO, FABIO

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 572 102 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

Inclinómetro fotónico ultrasensible que utiliza el momento angular orbital de la luz, y método de medición angular correspondiente

5 La presente invención se refiere a un goniómetro o inclinómetro fotónico ultrasensible que utiliza un nuevo efecto óptico denominado "efecto de multiplicador fotónico de la polarización", basado en el momento angular orbital de la luz, para medir con alta resolución y sensibilidad el ángulo de balanceo de un objeto que rota, con respecto a una plataforma de medición fija, o para llevar a cabo mediciones angulares relacionadas.

10 Más en detalle, la presente invención se refiere a un sistema óptico que utiliza un par de dispositivos fotónicos denominados placas q en combinación con óptica de polarización adecuada para mejorar sensiblemente la sensibilidad de las mediciones y la resolución de mediciones angulares, en base a la polarización de la luz. La invención de los inventores se puede combinar con todos los métodos existentes para la medición de ángulos de balanceo en base a la polarización de la luz, y tiene como resultado una mejora de la sensibilidad y la recepción angular correspondientes.

Técnica anterior

15 Introducción

La estimación precisa de una cantidad física es un problema importante en muchas áreas de investigación. La teoría clásica de las estimaciones afirma que repitiendo un experimento N veces, la precisión de una medición, definida por la inversa del error estadístico de su resultado, se puede aumentar casi en un factor de \sqrt{N} . En física cuántica, esta escala se conoce como el límite cuántico estándar o límite del ruido de disparo, y aplica a todos los procedimientos de medición que no exploten efectos cuánticos, tal como el entrelazamiento. Notablemente, utilizando ciertos estados entrelazados de N partículas sería posible conseguir una precisión que varíe como N. Esto se conoce como el límite de Heisenberg, y es el límite último establecido por las leyes de la mecánica cuántica [V. Giovannetti et al., Nature Photon 5, 222 (2011)]. Se han proporcionado demostraciones de prueba de concepto de estos conceptos de metrología cuántica en experimentos recientes de estimación de la fase óptica, detección del campo magnético y espectroscopia de frecuencias [M. W. Mitchell et al., Nature 429, 161 (2004); P. Walther et al., Nature 429, 158 (2004); T. Nagata et al., Science 316, 726 (2007); I. Afek et al., Science 316, 726 (2010); N. Spagnolo et al., Phys. Rev. Lett. 108, 233602 (2012); D. Leibfried et al., Nature 438, 639 (2005); C. Roos et al., Nature 443, 316 (2006); J. A. Jones et al., Science 24, 1166 (2009)].

30 Dentro de este contexto, la medición de alta resolución de un ángulo de balanceo presenta diferentes aplicaciones, tal como la corrección del error de Abbe en la medición de coordenadas espaciales. Las técnicas ópticas de alta resolución [H. Jiang y C. Yin, Opt. Eng. 39, 516 (2000), Z. Liu, et al., Sensors Actuat. A 104, 127-131 (2003), S. Li, et al., Opt. Lett. 30, 242-244 (2005)] explotan el grado de libertad de la polarización en la luz para medir una diferencia angular θ entre dos observadores A y B. Más específicamente, enviando desde la plataforma A a la plataforma B un estado de polarización bien definido, la diferencia angular entre los dos observadores corresponde a una rotación física del estado de polarización. De este modo, es posible recuperar la rotación θ llevando a cabo mediante el observador B una medición indirecta de la polarización del estado recibido.

El momento angular orbital de la luz

40 La propagación de la luz está determinada por las ecuaciones de Maxwell, que muestran cómo un haz de luz transporta energía y momento, en las componentes tanto lineal como angular. En particular, el momento angular de la luz, relacionado con el concepto de rotación en mecánica cuántica, se ha relacionado siempre con su propiedad de polarización. Un haz óptico que viaja en sentido positivo del eje z que está polarizado circularmente, transporta un contenido de momento angular de la componente z de $\sigma = \pm\hbar$ por fotón, que es positivo si la polarización circular es levógira y negativo si es dextrógira. Al mismo tiempo, puede ser identificada una segunda contribución relacionada con el componente transversal del perfil del frente de onda. Ésta se denomina el momento angular orbital, y aparece cuando el frente de onda adquiere una estructura helicoidal, o equivalentemente, su dependencia espacial con el campo contiene un factor de fase helicoidal de la forma $e^{im\phi}$, donde ϕ es la fase acimutal del vector posición r en torno al eje z del haz y m es cualquier número entero, positivo o negativo, que proporciona el sentido y la "velocidad" de la fase que gira en espiral lo largo de la dirección del haz. En este caso, el haz óptico transporta un momento angular a lo largo de su eje z igual a $m\hbar$ por fotón, además del de la polarización σ .

50 El momento angular orbital de la luz, aunque se conoce desde principios de los cuarenta, se ha convertido en objeto de un intenso esfuerzo de investigación desde el documento fundamental de Allen et al. en 1992 [Allen, et al., Phys. Rev. A. 45, 8185 (1992)]. Además, su primera observación en el dominio cuántico ha sido obtenida por Mair et al. en 2001 [Mair et al., Nature 412, 313 (2001)], donde se ha observado por primera vez que un único fotón, el cuanto de la luz, transporta angular orbital, lo que significa que se puede codificar información asimismo en las propiedades espaciales de un único fotón. Por esta razón, se considera que el momento angular orbital es un grado de libertad del campo electromagnético descubierto recientemente. Recientemente se han identificado varias aplicaciones. Por ejemplo, el momento angular orbital de la luz se puede intercambiar con la materia, y puede hallar aplicación en

diferentes contextos, tales como biología o física cuántica. El momento angular orbital se acopla principalmente con inhomogeneidades materiales caracterizadas por una asimetría de rotación en torno al eje del haz. Este acoplamiento se convierte en una propiedad útil cuando su grado de libertad se adopta como herramienta para sondear las propiedades de un medio dado [Molina-Terriza et al., J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public 2, 07014 (2007), Torner et al., Optics Express 13, 873 (2005)]. Se pueden encontrar otras aplicaciones en el contexto de la formación de imágenes microscópicas sub-Rayleigh [Tamburini et al., Phys. Rev. Lett. 97, 163903 (2006)], la microscopía de campo lejano con resolución en principio ilimitada [Harke et al., Microscopy 3, 793-796 (2006), Hell, Single Molecule Spectroscopy in Chemistry, Physics and Biology pp. 365-398 (2009)], como herramienta para realizar una formación de imágenes precisa y rápida de moléculas específicas o tejidos biológicos con fines de diagnóstico [Shoham et al., Nature Methods 2, 837 (2005)]. Además, el perfil de características del patrón de intensidad de un modo Laguerre-Gaussian permite la realización de trampas eficientes de iones y átomos, siendo por lo tanto adecuado para aplicaciones de óptica atómica y para la realización de condensados de Bose Einstein [Andersen et al., Phys Rev Lett 97, 170406 (2006)].

Más allá de estas aplicaciones, el momento angular orbital representa en particular una herramienta potente en el contexto de la fotónica cuántica, prestando una especial atención a los protocolos de información cuántica implementados mediante técnicas de óptica cuántica. La información cuántica (QI, Quantum information) es un campo de investigación reciente que está dirigido a la explotación de las leyes de la mecánica cuántica con el fin de mejorar la eficiencia de los protocolos de información, cálculo y comunicación más allá del enfoque clásico. El desarrollo de este nuevo campo ha abierto varias perspectivas tanto desde un punto de vista fundamental, tal como la capacidad de controlar coherentemente un sistema cuántico, como en aplicaciones tecnológicas, tal como en comunicaciones ópticas. Las primeras implementaciones satisfactorias de protocolos de información cuántica dependían de sistemas de dos niveles apodados qubits (bits cuánticos), tal como por ejemplo el grado de libertad de la polarización de los fotones. Para aumentar el contenido de información de los protocolos, es necesario aumentar la dimensionalidad del sistema físico utilizado para codificar y manipular la información. Los sistemas cuánticos de d niveles de este tipo, o qudits, proporcionan una extensión natural de los qubits que ha mostrado ser adecuada para aplicaciones prospectivas tales como la computación y la criptografía cuánticas [Cerf. et al., Phy. Rev. Lett. 88, 127902 (2002), Lanyon et al., Nature Physics 7, 134 (2009)]. El momento angular orbital representa a una selección natural en este contexto, dado que su grado de libertad está definido en un espacio de dimensión infinita [Franke-Arnold et al., Laser and Photonics Reviews 2, 299 (2008), Molina-Terriza et al., Nature Physics 3, 305 (2007)]. Esto puede conducir a ventajas prácticas, que permiten aumentar el contenido de información por fotón y reducir el efecto del ruido y de las pérdidas que dan lugar a una implementación experimental imperfecta.

La placa q -una herramienta para la manipulación del momento angular orbital

La investigación experimental del momento angular orbital se inició en la década de los 90. Aunque se han desarrollado muchos dispositivos para la manipulación eficiente de los estados de polarización a través de medios birrefringentes, tales como placas de onda y divisores de haz polarizantes, las herramientas ópticas para generar y controlar los estados de fotón del OAM ("orbital angular momentum", momento angular orbital) son muy limitadas. En los últimos años se han realizado muchos esfuerzos para implementar un dispositivo que pueda generar y manipular modos de LG (Laguerre-Gauss) con alta eficiencia. Se han desarrollado diferentes dispositivos para este propósito. Se pueden explotar los hologramas generados por ordenador, es decir, redes de difracción impresa sobre una película en función de un patrón de interferencia específico calculado por ordenador, para generar un estado de entrada determinado y analizar un componente OAM específico del haz analizado, con una eficiencia por debajo del 30 %. Se pueden explotar placas de fase espiral [Beijersbergen et al., Opt. Commun. 112, 321 (1994)], compuestas de un medio transparente cuyo grosor varía con el ángulo acimutal ϕ , para introducir directamente un desfase en la luz incidente que varía con ϕ , induciendo por lo tanto una estructura helicoidal en el frente de fase de salida. Se han adoptado recientemente moduladores espaciales de la Luz (SLM, spatial light modulators), unos dispositivos basados en cristales líquidos que pueden modular simultáneamente la intensidad y la fase [N. Yoshida et al., Proc. SPIE 2885, 132 (1996)], para manipular el momento angular orbital de la luz. Estos presentan la ventaja de la posibilidad de producir hologramas dinámicos, estando habitualmente las eficiencias comprendidas en el intervalo del 10% al 50%. Entre las diferentes herramientas adoptadas actualmente, Marrucci et al. [L. Marrucci et al., Phys. Rev. Lett. 96, 163905 (2006)] desarrollaron un dispositivo que permite el acoplamiento entre las componentes espinorial y orbital del momento angular de la luz.

Cuando un haz de luz interactúa con la materia, puede tener lugar una transferencia de momento angular J , que obedece a la conservación del momento angular global del sistema. En particular, un fotón absorbido por un medio puede transferir solamente el componente espinorial del momento angular en un medio anisótropo, mientras que el componente orbital puede ser transferido en un medio transparente isótropo inhomogéneo [Beijersbergen et al., Opt. Commun. 96, 123-132 (1993); Beijersbergen et al., Opt. Commun. 112, 321 (1994); R. A. Beth, Phys. Rev. 50, 115 (1936)]. Se espera que tenga lugar entonces un intercambio simultáneo de las componentes espinorial y orbital del momento angular, en un medio que sea al mismo tiempo anisótropo e inhomogéneo, tal como los cristales líquidos (LC, liquid crystals). Su estructura está determinada por el eje director, a lo largo del cual tienden a orientarse todas las moléculas. Al aplicar un campo eléctrico o magnético, o al variar la temperatura, es posible cambiar las propiedades del LC. Una placa q (QP) es una pastilla birrefringente con un eje óptico transversal estructurado adecuadamente, con una singularidad topológica en su centro, desarrollada en Naples por Marrucci et al. [L.

Marrucci et al., Phys. Rev. Lett. 96, 163905 (2006); patente U.S.A. US8264623B2, solicitud de patente europea EP2013647].

Más específicamente, la QP representa un dispositivo óptico en el que para cada punto hay un eje óptico en una posición diferente. El patrón específico dibujado en la placa q define la "carga" q de la singularidad que caracteriza la placa q, y puede ser un entero o la mitad de un entero. Suponiendo una incidencia normal del haz de luz que cruza la QP, el ángulo α que define el eje óptico local con respecto a la singularidad de la placa q es $\alpha(r, \varphi) = q\varphi + \alpha_0$, donde q es la carga topográfica, y α_0 es una constante (y φ es el ángulo acimutal). El principio de funcionamiento de la placa q se basa en el acoplamiento entre el spin y los momentos angulares orbitales. En un formalismo de un solo fotón, la QP implementa las siguientes transformaciones del estado de un solo fotón:

$$|L\rangle_{\pi}|m\rangle_o \xrightarrow{QP} |R\rangle_{\pi}|m+2q\rangle_o, \quad (1)$$

$$|R\rangle_{\pi}|m\rangle_o \xrightarrow{QP} |L\rangle_{\pi}|m-2q\rangle_o, \quad (2)$$

donde $|\cdot\rangle_{\pi}$ y $|\cdot\rangle_o$ representan los estados del fotón en los grados de libertad de polarización y de OAM, respectivamente, mientras que L y R indican los estados de polarización izquierdo y derecho, y m el autovalor OAM correspondiente. Además, cualquier superposición coherente de los dos estados de entrada proporcionados en las ecuaciones (1-2) se conserva [ver E. Nagali et al., Phys. Rev. Lett. 103, 013601 (2009)]. Los valores habituales para la eficiencia del dispositivo de placa q llegan al 85 %.

Medición de un ángulo de balanceo con el grado de libertad de la polarización.

Uno de los problemas más comunes en las mediciones ópticas en el mundo real es la realización de mediciones ópticas precisas sin contacto y/o remotas de ángulos de balanceo. Éstos son rotaciones mecánicas de un objeto en torno a sus ejes de simetría. Los métodos basados en la polarización, esencialmente basados en la ley de Malus combinados con manipulaciones adecuadas de la polarización, están entre los enfoques más convenientes. Haciendo referencia a la figura 3, se considera una emisora, Alicia, y un receptor, Bob, que desean medir un ángulo de desalineamiento relativo θ entre sus marcos de referencia en torno al eje óptico. El ángulo de desalineamiento es un ángulo de balanceo de Bob con respecto Alicia (o viceversa). Dicha tarea de medición se puede llevar a cabo de manera clásica, explotando el grado de libertad de la polarización de la luz (ver la figura 3). La medición se puede

llevar a cabo enviando N fotones de Alicia a Bob, cada uno en un estado $|\Psi^C\rangle \doteq |1\rangle_H \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_R + |1\rangle_L)$, donde $|n\rangle_x$ indica un estado de n fotones en modo x, con $x = H, R$ o L , que representan los modos de polarización horizontal lineal, circular derecho y circular izquierdo, respectivamente. Bob fija un polarizador en la dirección H en su sistema de coordenadas, donde el desalineamiento corresponde una rotación de $-\theta$ del estado de los fotones. A su vez, los estados de polarización L y R son autoestados de rotación, de tal modo que en el marco de Bob, $|\Psi^C\rangle$ pasa a valer $|\Psi^C(\theta)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(e^{i\theta}|1\rangle_R + e^{-i\theta}|1\rangle_L)$. La probabilidad condicional de que Bob detecte un fotón en la polarización H (de este marco de referencia) dada una fase de θ está dada por la ley de Malus: $p^C(H|\theta) = \cos^2 \theta$. Midiendo esta probabilidad (que se traduce directamente en intensidad de la luz, en el régimen clásico de muchos fotones), Alicia y Bob pueden estimar θ . Para reforzar sus estadísticas, repiten el procedimiento v veces, consumiendo un total de v x N fotones, y promedian todas los resultados. Su error final estadístico está limitado por

$$\Delta\theta^C \geq \left[2\sqrt{\nu N}\right]^{-1}. \quad (3)$$

Por lo tanto, existe la necesidad de un sistema y un método que permitan la medición del ángulo de inclinación (balanceo) con mayor precisión, y correspondientemente una sensibilidad y una resolución angular mayores.

Esta necesidad es satisfecha por la presente invención, que se define mediante las reivindicaciones independientes del sistema 1 y del método 9. Se definen realizaciones particulares de la invención mediante las reivindicaciones dependientes.

Si la fuente de luz del sistema reivindicado produce ya un haz con polarización lineal, entonces no son necesarias medidas para producir el estado de polarización lineal, debido a que se dispone de una distribución equivalente.

De acuerdo con un aspecto ventajoso de la invención, dichos medios para producir un estado de polarización lineal para el haz de luz comprenden una placa de cuarto de onda y una placa de media onda, o una óptica de polarización que tenga un efecto equivalente sobre la polarización del haz de luz.

De acuerdo con un aspecto ventajoso de la invención, dichos medios para medir la polarización del haz de luz comprenden un divisor de haz polarizante y un fotodetector, u óptica de polarización equivalente en su efecto a la polarización del haz de luz y detectores que sean equivalentes en su efecto a la medición del haz de luz.

De acuerdo con un aspecto ventajoso de la invención, después de la placa q en el primer subsistema y antes de la placa q en el segundo subsistema se sitúan respectivas primera y segunda placas de media onda, para incrementar adicionalmente la sensibilidad angular del sistema.

De acuerdo con un aspecto ventajoso de la invención:

- 5 - la fuente de luz es una fuente de luz que tiene polarización modulada periódicamente, por ejemplo un láser Zeeman;
- antes de dichos medios para producir un estado polarizado lineal para el haz de luz, está situado un divisor de haz, que crea un haz de referencia y un haz de medición;
- 10 - el haz de referencia, después de la detección de la polarización, ocasiona una señal periódica que es utilizada para la estabilización de la frecuencia y/o de la fase de la fuente de luz, y como referencia para un detector de fase del haz de medición;
- el haz de medición es utilizado por dichos primer y segundo subsistemas para obtener una variación de fase aumentada, entregándose la señal periódica generada por los medios (PBS, APD) para medir la polarización del haz de luz al detector de fase, que mide su fase de oscilación con respecto a la referencia; estando la fase de oscilación relacionada directamente con la rotación angular a medir.
- 15

De acuerdo con un aspecto ventajoso de la invención, el estado correlacionado de dos haces es un estado entrelazado de dos fotones.

De acuerdo con un aspecto ventajoso del método de la invención, se llevan a cabo una serie de mediciones, que se agrupan en conjuntos de medición MS_1, MS_2, \dots, MS_K , siendo K un entero positivo mayor que 1, conteniendo el conjunto MS_i un número entero M_i de mediciones, y caracterizado por que:

20

- MS_1 es un conjunto de mediciones realizado sin la utilización de la primera y la segunda placas q;
- MS_K es un conjunto de mediciones realizado con un valor K-1-ésimo de la carga topológica q de la placa q, siendo el valor k-1-ésimo de la carga topológica q mayor o igual que el valor K-2-ésimo de la carga topológica q;

Y por que se llevan a cabo las etapas siguientes:

- 25 - en base al conjunto MS_1 , estimar un primer valor de θ o φ con un correspondiente primer error;
- descartar los valores de medición fuera de dicho primer error;
- en base al conjunto MS_K , estimar un valor K-ésimo de θ ó φ con un correspondiente error K-ésimo;

tomar el valor K-ésimo de θ ó φ como el valor de θ ó φ medido por el sistema de la invención.

De acuerdo con un aspecto ventajoso de la invención, K es mayor que 2.

30 La invención se describirá a continuación a modo de ilustración y no de limitación, haciendo referencia en particular a las figuras de los dibujos adjuntos, en las que:

- 35 - la figura 1 muestra modos Laguerre-Gaussian. Ejemplos de perfil de modos que llevan momento angular orbital [E. Nagali y F. Sciarrino, *Advanced Photonic Sciences*, (InTech, 2012)]. Arriba: perfiles de fase para diferentes modos Laguerre-Gaussian, descritos mediante los patrones de interferencia con una referencia de ondas esféricas. Abajo: perfil de intensidad correspondiente;
- la figura 2 muestra en (a) un dispositivo de placa q y en (b) una fotografía de la singularidad en el dispositivo real de placa q. La imagen se ha tomado introduciendo la placa q entre dos películas Polaroid. [L. Marrucci et al., *J. Opt.* 13,064001 (2011)];
- 40 - la figura 3 muestra la medición de polarización de un ángulo de balanceo. Dos observadores miden su ángulo relativo enviando fotones individuales polarizados linealmente (o luz láser polarizada linealmente), y midiendo el estado de polarización recibido por el receptor;
- 45 - la figura 4 muestra el concepto de inclinómetro fotónico (o goniómetro) según la invención, en base al efecto de multiplicador fotónico (ver más abajo para una definición). El diagrama (a) es la configuración del inclinómetro fotónico para mediciones ultrasensibles de un ángulo de balanceo. Cada fotón individual se transforma a un estado cuántico que lleva momento angular tanto espinorial (polarización) como orbital, lo que tiene como resultado una sensibilidad mejorada de la medición de θ . Las franjas de polarización para el momento angular orbital de $l=100$ se documentan en (b), que corresponde a una mejora de la sensibilidad de un factor 101.
- la figura 5 muestra un esquema representativo para la integración del efecto de multiplicador fotónico en el esquema de medición propuesto por Jiang et al. [H. Jiang y C. Yin, *Opt. Eng.* 39, 516 (2000)] para obtener una

- mejora de la resolución angular en un factor grande. Se aprovecha una placa q (QP) y una placa de media onda (HWP, half-wave plate) para transformar el haz de medición en un estado SAM-OAM híbrido, más sensible a las rotaciones físicas. El segundo par HWP-QP se aprovecha para transformar el estado en uno de solamente polarización antes de ser enviado al aparato de medición; esto es un ejemplo de cómo el efecto del multiplicador fotónico se puede combinar con cualquier medición del ángulo de balanceo en base a la utilización de un haz de luz y de una modulación de la polarización;
- la figura 6 muestra el alineamiento remoto de dos partes distantes. Un par de fotones entrelazados es enviado a Alicia y Bob mediante una tercera parte independiente. Mediante la realización de mediciones locales para detectar correlaciones de polarización entre los dos fotones, Alicia y Bob pueden medir su ángulo relativo $\theta_A - \theta_B$;
 - la figura 7 muestra multiplicadores fotónicos de mejora por entrelazado, según la invención. Aplicación del multiplicador fotónico a estados de dos fotones entrelazados por polarización. Alicia prepara un estado entrelazado en dos fotones y lleva a cabo su transformación de multiplicador fotónico local para la codificación SAM-OAM híbrida. Los dos fotones se envían a continuación a la plataforma de Bob sufriendo la misma rotación θ . Bob lleva a cabo a continuación mediciones de correlación de polarización después de descodificar el estado recibido a sólo polarización con su conjunto de placas de onda y placas q. Los resultados de la medición se aprovechan para medir el ángulo de rotación entre las plataformas de Alicia y de Bob;
 - la figura 8 muestra una estimación del ángulo de rotación con los multiplicadores fotónicos en el régimen de un solo fotón. La relación entre los errores estadísticos $\Delta\theta_o/\Delta\theta_m$ para la estrategia de sólo polarización frente a la estrategia de multiplicadores de la invención en el régimen de un solo fotón;
 - la figura 9 muestra patrones de oscilación experimentales (a) y (b) en el multiplicador fotónico de un solo fotón con, y para diferentes valores de la fase del estado inicial.

El concepto de multiplicador fotónico de la polarización en la invención

Haciendo referencia a las figuras 4 y 5, según un aspecto de la invención, en el enfoque del multiplicador fotónico 100, 100' de la invención, Alicia y Bob intercambian fotones en estados de superposición SAM-OAM. Alicia prepara inicialmente N fotones polarizados horizontalmente, según la estrategia clásica. Sin embargo, antes de enviárselos a Bob, los hace pasar en primer lugar a través de una placa q de carga q. La placa q implementa las transformaciones de modo bidireccional (unitarias) $\{a_{R,0}^\dagger \leftrightarrow a_{L,-2q}^\dagger, a_{L,0}^\dagger \leftrightarrow a_{R,2q}^\dagger\}$, donde los subíndices 0 y $\pm 2q$ se refieren a valores OAM. El estado de salida de la primera placa q es un estado de superposición SAM-OAM híbrido, más sensible a la rotación física dado que tanto los componentes espinorial (SAM) como orbital (OAM) del estado reciben un factor de fase inducido por rotación. La rotación física global introduce una fase relativa entre los dos componentes que varía $m = 2q + 1$ veces más rápido que el caso de sólo polarización, de tal modo que la polarización fotónica de salida rota m veces más rápido (efecto de multiplicador fotónico). Las franjas de polarización registradas presentan en este caso una periodicidad de $\propto 1/m$, que conduce a una sensibilidad angular mejorada $\Delta\theta/m$. En la figura 4 se muestra un ejemplo de medición experimental para las franjas de polarización con $m = 101$, que muestra que se puede conseguir una mejora sensible en la periodicidad manteniendo al mismo tiempo un valor elevado para la visibilidad del patrón de franjas.

En la figura:

- HWP representa la placa de media onda;
- QWP representa la placa de cuarto de onda;
- PBS representa el divisor de haz polarizante;
- APD representa el fotodiodo de avalancha.

La mejora de la sensibilidad rotacional debida al efecto de los multiplicadores fotónicos se puede conseguir asimismo en el régimen clásico con un láser intenso, haciéndola aplicable inmediatamente a mediciones ópticas del mundo real. En función de los detalles del esquema, esto conduce habitualmente a una sensibilidad de aproximadamente 10^{-2} grados para un intervalo dinámico de 30 a 360°, o de aproximadamente 10^{-4} grados cuando se limita el intervalo a 1. Todos estos métodos basados en polarización [H. Jiang y C. Yin, Opt. Eng. 39, 516 (2000), Z. Liu, et al., Sensors Actuat. A 104, 127-131 (2003), S. Li, et al., Opt. Lett. 30, 242-244 (2005)], independientemente de los detalles, se pueden combinar sin cambios con la herramienta de multiplicadores fotónicos acorde con la invención (ver la figura 5). Por lo tanto, se prevé una mejora de su sensibilidad aproximadamente por el factor m proporcionado por el enfoque de la invención.

Aplicación remota

El multiplicador fotónico propuesto basado en un estado SAM-OAM híbrido se puede aplicar a un escenario diferente explotando estados entrelazados. Por ejemplo, haciendo referencia a la figura 6, se consideran estados

entrelazados por polarización de 2 fotones (por ejemplo, generados por el sistema 200), donde una tercera parte envía un fotón Alicia y el otro a Bob. El sistema global 1000 utiliza dos sistemas idénticos 100, 100' según se ha descrito anteriormente (el sistema 100 tiene planos A y B para sus subsistemas, el sistema 100' tiene planos A' y B' para sus subsistemas, tal como se muestra).

- 5 Alicia y Bob realizan a continuación un análisis de polarización local en sus propias plataformas de rotación. Cuando $\theta_A \neq \theta_B$, esto corresponde a la situación en la que dos marcos distantes se alinean remotamente con dos sondas de fotón producidas por una fuente común no relacionada, que envía un fotón a cada marco, explotando las correlaciones cuánticas entre los dos fotones. Más específicamente, los fotones se generan en el estado de Bell de

10 polarización máximamente entrelazada: $|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_{R,0}^A |1\rangle_{L,0}^B - |1\rangle_{L,0}^A |1\rangle_{R,0}^B)$. Los fotones, antes de la transmisión, se pasan a través de dos placas q con cargas topológicas q_A y q_B , respectivamente, y una HWP. Alicia y Bob, en sus marcos rotados, aplican las mismas transformaciones a los fotones, transformándolos de nuevo a estados de polarización puros. Escogiendo $q_A = q_B$, la probabilidad de que Alicia y Bob detecten ambos el fotón de polarización H en sus marcos locales es entonces:

$$p^{\psi^-}(HH|\theta_A\theta_B) = 1/2 \sin^2[(2q+1)(\theta_A - \theta_B)] \quad (4)$$

- 15 Estas correlaciones (en combinación con canales clásicos de comunicación) se pueden explotar para estimar con precisión el desalineamiento relativo $\theta_A - \theta_B$ y para alinear remotamente los dos marcos distantes.

Mejora alcanzable con estados entrelazados

La adopción de recursos cuánticos puede conducir a una mayor sensibilidad con respecto a las estrategias clásicas. Utilizando recursos cuánticos, la estrategia óptima consiste en que Alicia envía v sondas, cada una compuesta de un

20 estado NOON entrelazado de N fotones $|\psi^Q\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|N\rangle_R + |N\rangle_L)$. En el marco de Bob después de la rotación θ , este estado se expresa como

$|\psi^Q(\theta)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(e^{iN\theta}|N\rangle_R + e^{-iN\theta}|N\rangle_L)$. La probabilidad condicional de que Bob detecte el estado no rotado $|\psi^Q\rangle$ es de $p^Q(\psi^Q|\theta) = \cos^2(N\theta)$, lo que resuelve valores de θ \sqrt{N} veces menores que $p^C(H|\theta)$. Su

incertidumbre está limitada entonces como: $\Delta\theta^Q \geq 1/(N\sqrt{\nu})$, conocida asimismo como el límite de Heisenberg. Nuestro multiplicador fotónico se puede combinar asimismo con dicho enfoque cuántico conduciendo a uno híbrido

25 clásico-cuántico, que explota el entrelazamiento y los elevados momentos de inercia por medio del multiplicador fotónico. En su versión más simple, cada sonda puede consistir en un estado NOON entrelazado de N fotones $|\psi_G^Q\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|N\rangle_{R,-2q} + |N\rangle_{L,2q})$. Siguiendo las mismas etapas que antes, se encuentra que $p_G^Q(\psi_G^Q|\theta) = \cos^2(mN\theta)$, lo

que conduce a una sensibilidad $\Delta\theta_G^Q \geq 1/(mN\sqrt{\nu})$. Esta estrategia conduce a un refuerzo de tanto el factor m debido a los multiplicadores fotónicos como del factor \sqrt{N} debido al entrelazamiento cuántico. Sin embargo, la preparación

30 experimental de estados NOON con N grande constituye un desafío enorme, y hasta la fecha sólo se ha informado de estados NOON fotónicos de N = 3, N = 4 y N = 5 [M. W. Mitchell et al., Nature 429, 161 (2004); P. Walther et al., Nature 429, 158 (2004); T. Nagata et al., Science 316, 726 (2007); I. Afek et al., Science 316, 726 (2010)]. Además, según aumenta N, los estados entrelazados de N fotones son cada vez más sensibles a pérdidas, dado que la

35 pérdida de un único fotón es suficiente para destruir toda la información de fase. Se ha mostrado que, en presencia de pérdidas o de otros tipos de ruido, ningún estado cuántico de dos modos puede sobrepasar el límite estándar en más de tan sólo un factor constante en el límite de N grande [J. Kolodinski et al., Phys. Rev. A 82, 053804 (2010); B. Escher et al., Nat. Phys. 7, 406 (2011); S. Knysh et al., Phys. Rev. A 83, 021804(R) (2011); R. Demkowicz-Dobrzanski et al., Nat. Commun. 3, 1063 (2012)]. Por lo tanto, idealmente, esta estrategia presenta la escala de

40 precisión de Heisenberg para enfoques SAM-OAM híbridos, pero en la practica sufre los mismos problemas de pérdida de sensibilidad que la estrategia cuántica de solamente polarización. Sin embargo, para N pequeño, estos problemas se pueden tratar aún de manera eficiente tal como se describe a continuación. Además, en el futuro dichos problemas se pueden superar, conduciendo por lo tanto a una aplicación más amplia de la invención.

Desde luego, los estados cuánticos de múltiples fotones que no son NOON se pueden combinar con los multiplicadores fotónicos, conduciendo a rendimientos cuánticos mejorados. Se asume que los fotones son

45 generados en el estado de Bell de polarización máximamente entrelazada $|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_{R,0}^A |1\rangle_{R,0}^B - |1\rangle_{L,0}^A |1\rangle_{L,0}^B)$. Este estado se puede obtener a partir del estado antisimétrico $|\psi^-\rangle$ introduciendo una placa de media onda en el eje óptico en la trayectoria de uno de los dos fotones.

Haciendo referencia a la figura 7, donde los planos A, A' son paralelos, B, B' son paralelos asimismo y están rotados en un ángulo θ con respecto a A y A' a lo largo de la dirección de propagación de la luz. Este escenario corresponde

50 al caso en el que los dos fotones generados por Alicia viajan en un mismo modo y está sometidos a la misma rotación θ . Después de la transformación al estado SAM-OAM híbrido con los multiplicadores fotónicos de los inventores, de la rotación θ , y de la segunda transformación en la plataforma de Bob, la probabilidad de detectar dos fotones con polarización H cuando $q_A = q_B = q$ adopta la forma de:

$$p_G^{\phi^-}(HH|\theta) = 1/2 \sin^2[2(2q+1)\theta] \quad (5)$$

Dicho sistema es el equivalente a una estrategia híbrida clásica-cuántica para un estado NOON de N=2 y un multiplicador fotónico m=2q+1. La eficiencia total en la estimación de θ se puede obtener recogiendo y registrando las cuatro posibles correlaciones de polarización (HH, HV, VH, W), lo que no requiere rondas de medición adicionales.

La técnica de la invención es una mejora tecnológica importante para la medición de alta precisión de ángulos de rotación. Las ventajas de la presente invención residen en un aumento de la sensibilidad a las rotaciones, proporcional a m=2q+1. Se pueden identificar tres características principales:

- a) compacidad del esquema, gracias a que se compone de muy pocos elementos ópticos,
- b) gran solidez frente a pérdidas y perturbaciones,
- c) posibilidad de integrar el dispositivo en otros esquemas ópticos utilizados actualmente, tal como en particular el sistema basado en polarimetría en detección heterodina.

La técnica según la invención presenta una gran solidez frente a los efectos de las pérdidas y las perturbaciones. En particular, la técnica no explota las propiedades cuánticas de coherencia de N partículas, que son intrínsecamente frágiles con respecto al ruido. Por esta razón, la pérdida de señal óptica debida a la propagación y la detección no se refleja en una cancelación completa de las ventajas cuánticas sino solamente en una reducción de un factor constante.

Además, estos dispositivos pueden ser utilizados para aumentar las precisiones de métodos utilizados actualmente. En particular, todos los esquemas que explotan el grado de libertad de la polarización se pueden mejorar utilizando el dispositivo de la invención.

Calibración del multiplicador fotónico de la invención

En este caso, se describirán los detalles técnicos para el procedimiento de estimación de fase de los inventores para la medición de un ángulo desconocido.

Las imperfecciones experimentales conducen a una visibilidad de franjas no unitaria. Desde luego, la pérdida de visibilidad aumenta el error estadístico como:

$$\delta\theta_m \geq \left[2mV_m\sqrt{\eta_m}\sqrt{\nu N} \right]^{-1}, \quad (6)$$

donde V_m es la visibilidad del patrón de oscilación y η_m es la eficiencia del sistema de detección. En la figura 8 se muestran los resultados para la estimación del ángulo en el régimen de un solo fotón para un valor de multiplicador de m de hasta m=101.

A medida que q aumenta, crece la frecuencia de oscilación de la distribución de salida, de tal modo que el intervalo en el que la estimación es inequívoca, disminuye con q. Para evitar esto, es posible adoptar una estrategia de estimación con etapas concatenadas adaptativas. Por simplicidad, se describe la estrategia del régimen de un solo fotón, siendo trivialmente análoga su extensión al régimen de pulsos coherentes. Se dividen las mediciones sobre todos los M = νN fotones en 3 etapas diferentes. Cada etapa j, por ejemplo $1 \leq j \leq 3$, consume M_j fotones preparados con $m = m_j$, de tal modo que $m_3 > m_2 > m_1$ donde $m_j = 2q_j + 1$. Esto garantiza que cada etapa consecutiva presenta una sensibilidad mayor. Cada etapa j produce una estimación θ_j y una incertidumbre $\Delta\theta_j$. Cada estimación θ_j está definida de manera inequívoca solamente sobre un intervalo Ω_j de longitud T_j igual a la mitad de un periodo de oscilación de distribuciones para $q = q_j$: $T_j = \frac{\pi}{2m_j}$. Además, los fotones en cada etapa j-ésima se preparan en el

estado $|\Psi^G(\xi_j)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(e^{i\xi_j}|1\rangle_{R,-2q} + e^{-i\xi_j}|1\rangle_{L,2q})$. La fase relativa ξ_j es tal que la estimación θ_{j-1} de la anterior etapa (j - 1) se ubica exactamente en uno de los puntos de máxima sensibilidad de $|\Psi^G(\xi_j)\rangle$. Siempre es posible satisfacer esta condición para $j > 1$, donde está disponible una estimación θ_{j-1} . Sin embargo, para la primera etapa, salvo que se tenga algún conocimiento a priori acerca de θ^* (valor real de θ), θ_1 no está definida a priori. En este caso, simplemente se elige $\xi_1 = 0$. Adaptar la fase en cada etapa tiene una doble finalidad. Por una parte, dado que esto permite a los inventores conseguir la resolución angular máxima de cada etapa, acelera la saturación asintótica de la cota de Cramér-Rao cuántica. Por otra parte, tal como se ha discutido anteriormente, rompe la simetría en las distribuciones entre m_j y m_{j-1} . Esto permite a los inventores reducir las ambigüedades potenciales en la estimación, en un factor dos cada etapa. Por esta razón, tal como se explica a continuación, son suficientes sólo tres etapas concatenadas para que θ^* arbitraria $\in \Omega$.

Se discuten a continuación los valores exactos de carga $m_j = 2q_j \pm 1$ utilizados en cada etapa. No es posible aumentar mucho la resolución angular arbitrariamente de una etapa a otra. En particular, se tiene que imponer que

$T_j \geq \Delta\theta_{j-1}$ para todas. Asimismo, se adopta \mathcal{T}_j (M_i es el número de mediciones para la etapa i). Esta elección es conveniente en el límite asintótico de gran $M = M_1 + M_2 + M_3$, dado que hace que M_1 sea despreciable respecto a M_2 , y que ésta última sea a su vez despreciable respecto a M_3 .

- 5 Para implementar el protocolo de tres etapas descrito anteriormente para la estimación de un ángulo de rotación completamente desconocido, es necesario adaptar la fase relativa ξ en el estado $|\Psi^G(\xi)\rangle$ en cada etapa del proceso. Esto se puede implementar eficientemente rotando la polarización del estado de entrada de un ángulo ξ por medio de una placa de media onda. Por supuesto, una rotación del estado de entrada de $|1\rangle_H$ a $|1\rangle_V$ corresponde una inversión en los máximos y los mínimos del patrón. Esto se muestra en la figura 9, donde se presentan los patrones de oscilación obtenidos para varios valores de la fase ξ .
- 10 En lo anterior se han descrito las realizaciones preferidas y se han sugerido algunas modificaciones de la invención, pero se debe entender que los expertos en la materia pueden realizar variaciones y cambios, sin apartarse por ello del respectivo alcance de protección, tal como se define mediante las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Sistema (100, 100') para medir la rotación angular relativa θ de dos planos A y B, que comprende:
- una fuente de luz que produce un haz de luz,
 - un primer subsistema óptico integrado en el plano A para preparar un estado adecuado para el haz de luz;
- 5 - un segundo subsistema óptico integrado en el plano B para medir el estado del haz de luz que sale del primer sistema óptico;
- en el que θ es el ángulo en torno a un eje paralelo al haz de luz,
- caracterizado por que
- el primer subsistema óptico comprende, en secuencia a lo largo de la dirección del haz de luz:
- 10 ° medios (QWP, HWP) para producir un estado polarizado linealmente para el haz de luz;
- ° una primera placa q (placa q), que es una pastilla birrefringente con un eje óptico transversal con una estructura adecuada y una singularidad topológica en su centro con una carga topológica asociada q, y está dispuesta para transformar un estado de polarización en un estado de polarización/momento angular orbital;
- el segundo subsistema óptico comprende también en secuencia a lo largo de la dirección del haz de luz:
- 15 ° una segunda placa q (placa q) con la misma carga topológica q que la primera placa q, estando dispuesta la segunda placa q para transformar un estado de polarización/momento angular orbital en un estado de polarización;
- ° medios (PBS, APD) para medir la polarización del haz de luz.
2. Sistema según la reivindicación 1, caracterizado por que dichos medios (QWP, HWP) para producir un estado lineal polarizado para el haz de luz comprenden una placa de cuarto de onda (QWP) y una placa de media onda (HWP), u óptica de polarización de efecto equivalente a la polarización del haz de luz.
- 20 3. Sistema según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado por que dichos medios (PBS, APD) para medir la polarización del haz de luz comprenden un divisor de haz polarizante (PBS) y un fotodetector (APD), u óptica de polarización de efecto equivalente a la polarización del haz de luz y detectores que son equivalentes en su efecto de medición del haz de luz.
- 25 4. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que están situadas, después de la placa q en el primer subsistema y antes de la placa q en el segundo subsistema, respectivas primera y segunda placas de media onda (HWP) para aumentar adicionalmente la sensibilidad angular del sistema.
5. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que
- 30 - la fuente de luz es una fuente de luz que tiene polarización modulada periódicamente, por ejemplo un láser Zeeman;
- antes de dichos medios (QWP, HWP) para producir un estado polarizado lineal para el haz de luz, está situado un divisor de haz, que crea un haz de referencia y un haz de medición;
- el haz de referencia, después de la detección de la polarización, ocasiona una señal periódica que es utilizada para la estabilización de la frecuencia y/o de la fase de la fuente de luz, y como referencia para un detector de fase del
- 35 haz de medición;
- el haz de medición es utilizado mediante dichos primer y segundo subsistemas para obtener una variación de fase mejorada, entregándose la señal periódica generada por los medios (PBS, APD) para medir la polarización del haz de luz al detector de fase, que mide su fase de oscilación con respecto a la referencia;
- estando la fase de oscilación relacionada directamente con la rotación angular a medir.
- 40 6. Sistema (1000) para medir la rotación angular relativa ϕ de dos planos B y B' sin un enlace óptico directo, caracterizado por que comprende:
- ° un primer sistema (100) según se define en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, con dos planos A y B;
 - ° un segundo sistema (100') según se define en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, con dos planos A' y B';
- en el que la fuente de luz (200) del primer sistema (100) es la misma fuente de luz común (200) que la fuente de luz
- 45 del segundo sistema (100') y es adecuada para producir un estado correlacionado de dos haces, siendo el primer

haz enviado a dicho primer sistema y siendo el segundo haz enviado a dicho segundo sistema, comprendiendo además el sistema un sistema electrónico para la medición de la detección simultánea de los dos haces.

7. Sistema según la reivindicación 6, caracterizado por que el estado correlacionado de dos haces es un estado entrelazado de dos fotones.

5 8. Sistema (2000) para medir la rotación angular relativa θ de dos planos A y B, caracterizado por que comprende:

- un primer sistema (100) según se define en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, con dos planos A y B;
- un segundo sistema (100') según se define en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, con los planos A' y B' respectivamente paralelos a A y B;

10 en el que la fuente de luz (200) del primer sistema (100) es la misma fuente de luz común (200) que la fuente de luz del segundo sistema (100') y es adecuada para producir un estado correlacionado de dos haces, estando situada inmediatamente después de la fuente de luz una placa de media onda (HWP) en la trayectoria de solamente uno de los dos sistemas, para aumentar la sensibilidad de la medición, en el que el primer haz es enviado a dicho primer sistema y el segundo haz es enviado a dicho segundo sistema, comprendiendo además el sistema un sistema electrónico para la medición de la detección simultánea de los dos haces.

15 9. Método para medir la rotación angular relativa θ de dos planos A y B utilizando el sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que se llevan a cabo las etapas siguientes:

- enviar el haz de luz a dicho primer subsistema;
- enviar el haz de luz que sale del primer subsistema al segundo subsistema;
- medir la polarización de la luz en el segundo subsistema.

20 10. Método para medir la rotación angular relativa ϕ de dos planos B y B' utilizando el sistema (1000) según cualquiera de las reivindicaciones 6 ó 7, caracterizado por que se llevan a cabo las etapas siguientes:

- preparar un estado correlacionado de dos haces de un haz de luz;
- llevar a cabo el método según la reivindicación 9 utilizando un haz de dicho estado de dos haces, como el haz de luz enviado al primer subsistema del primer sistema (100);

25 - llevar a cabo el método según la reivindicación 9 utilizando el otro haz de dicho estado de dos haces, como el haz de luz enviado al segundo subsistema del segundo sistema (100'), y

- comparar las polarizaciones medidas en los segundos subsistemas del primer y el segundo sistemas contando las detecciones simultáneas de los dos haces.

30 11. Método según la reivindicación 10, caracterizado por que el estado correlacionado de dos haces es un estado entrelazado de dos fotones.

12. Método para medir la rotación angular relativa θ de dos planos A y B utilizando el sistema (2000) de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 11, caracterizado por que se llevan a cabo las etapas siguientes:

35 - preparar un estado correlacionado de dos haces de un haz de luz;

- llevar a cabo el método según la reivindicación 9 utilizando un haz de dicho estado de dos haces, como el haz de luz enviado al primer subsistema del primer sistema (100);

- llevar a cabo el método según la reivindicación 9 utilizando el otro haz de dicho estado de dos haces, como el haz de luz enviado al segundo subsistema del segundo sistema (100'), y

- comparar las polarizaciones medidas en los segundos subsistemas del primer y el segundo sistemas contando las detecciones simultáneas de los dos haces;

40 en el que los planos A' y B' del segundo sistema son paralelos respectivamente a los planos A y B del primer sistema, y estando situada inmediatamente después de la fuente de luz una placa de media onda (HWP) en la trayectoria de solamente uno de los dos sistemas, para aumentar la sensibilidad de la medición.

45 13. Método según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en el que se llevan a cabo una serie de mediciones, que se agrupan en conjuntos de mediciones MS_1, MS_2, \dots, MS_K siendo K un entero positivo mayor que 1, conteniendo el conjunto MS_i un número entero M_i de mediciones, y caracterizado por que

- MS_1 es un conjunto de mediciones realizado sin la utilización de la primera y la segunda placas q;

- MS_K es un conjunto de mediciones realizado con un valor $K-1$ -ésimo de la carga topológica q de la placa q , siendo el valor $k-1$ -ésimo de la carga topológica q mayor o igual que el valor $K-2$ -ésimo de la carga topológica q ;

Y por que se llevan a cabo las etapas siguientes:

- en base al conjunto MS_1 , estimar un primer valor de θ ó φ con un correspondiente primer error;

5 - descartar los valores de medición fuera de dicho primer error;

- en base al conjunto MS_K , estimar un valor K -ésimo de θ ó φ con un correspondiente error K -ésimo;

tomar el valor K -ésimo de θ ó φ como el valor de θ ó φ medido por el sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, 7 a 8, 11.

14. Método según la reivindicación 13, caracterizado por que K es mayor que 2.

10

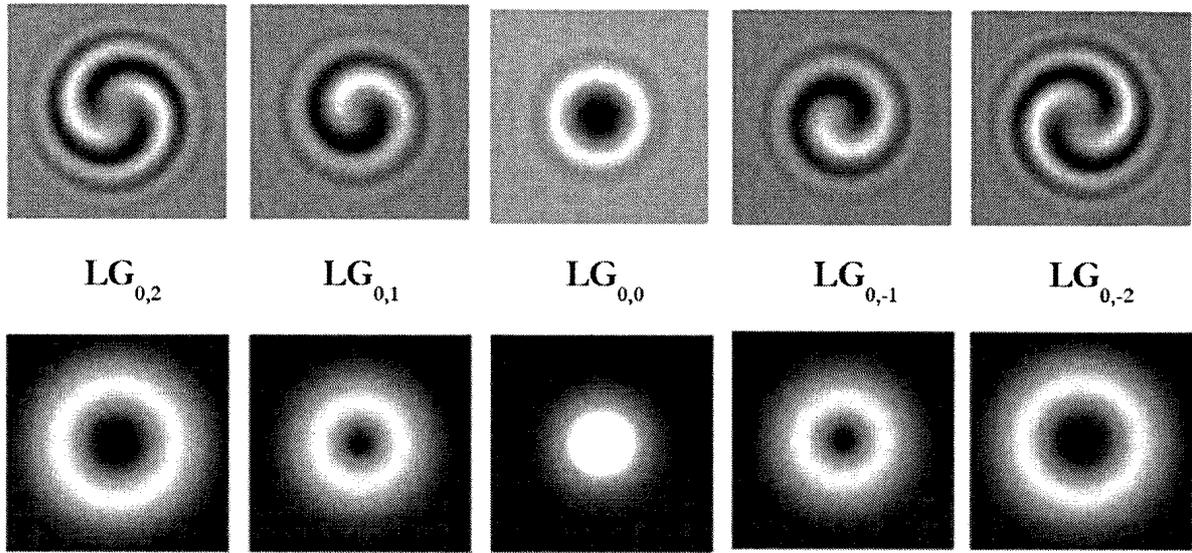


Fig. 1

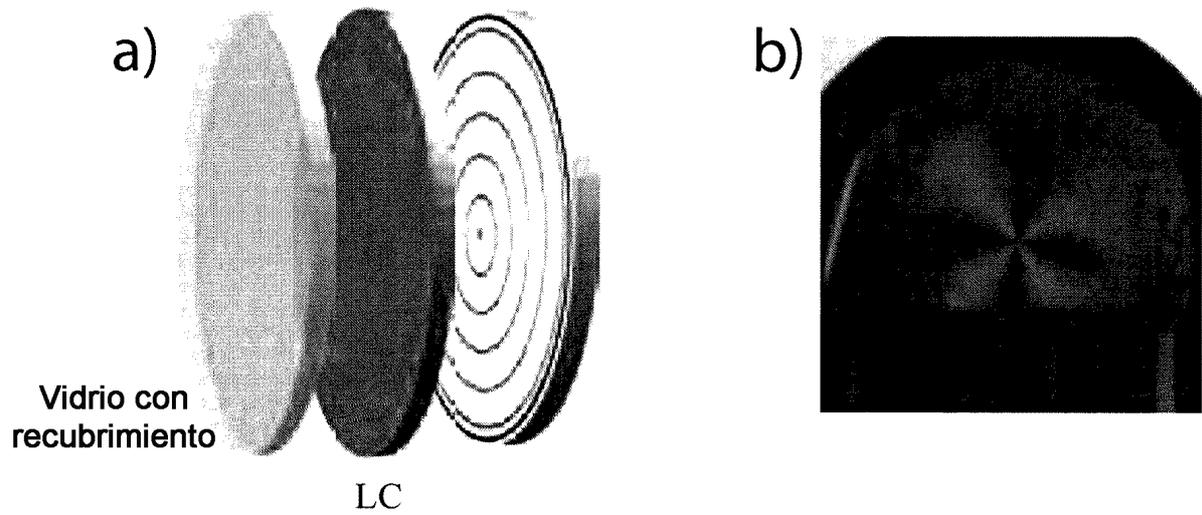


Fig. 2

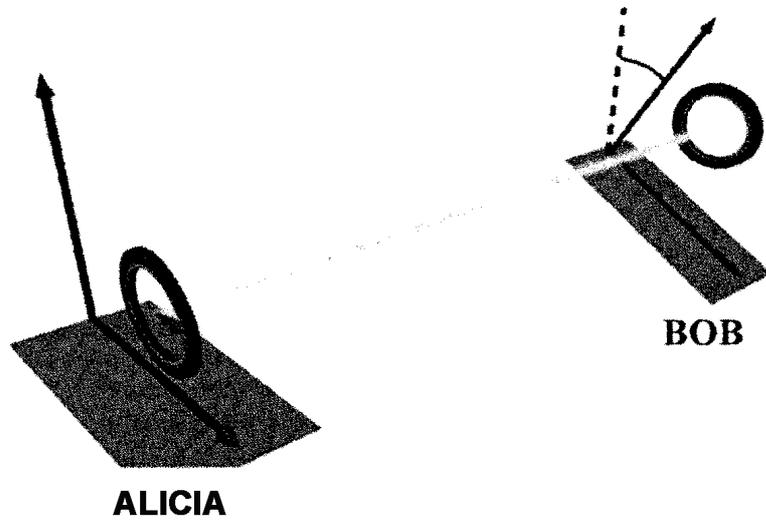
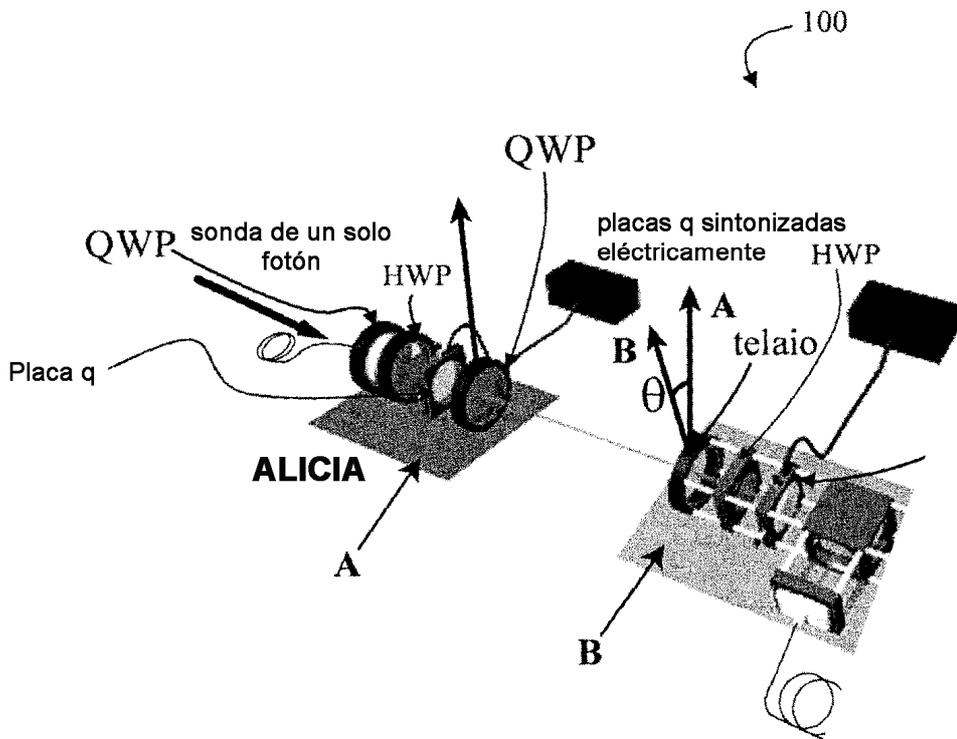


Fig. 3



(a)

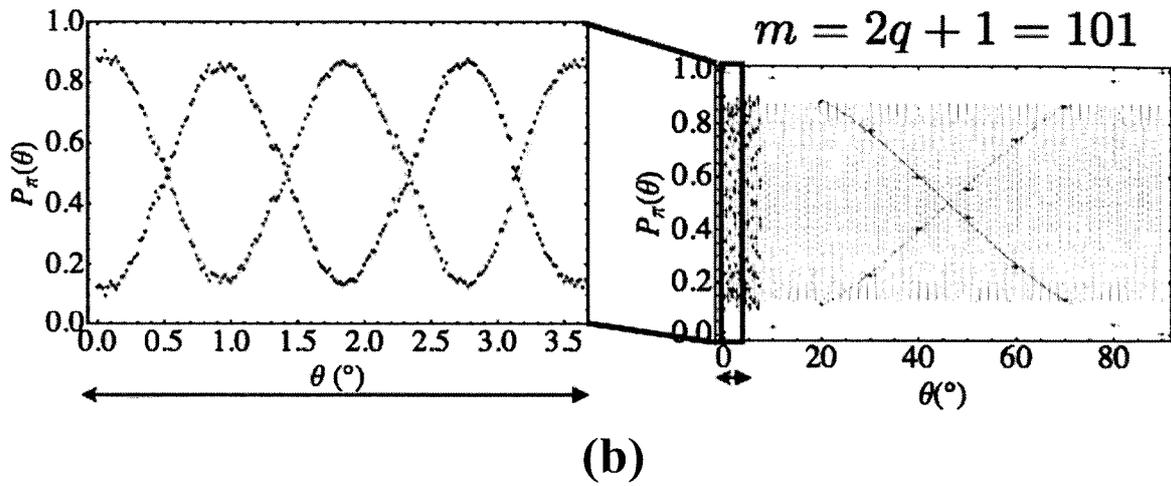


Fig. 4

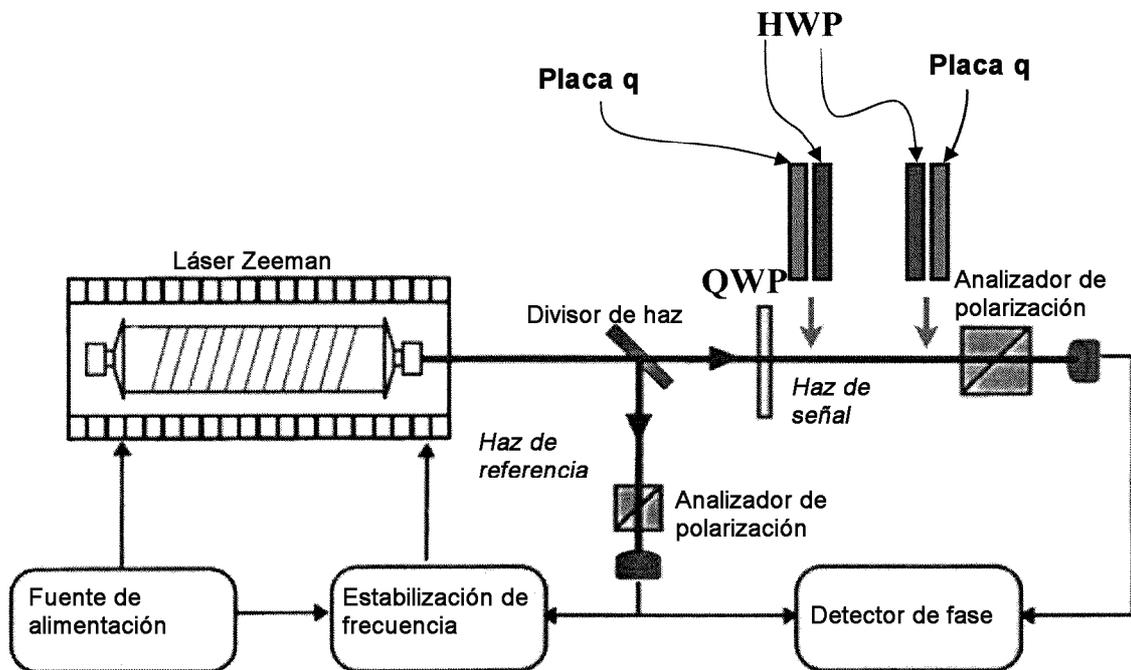


Fig. 5

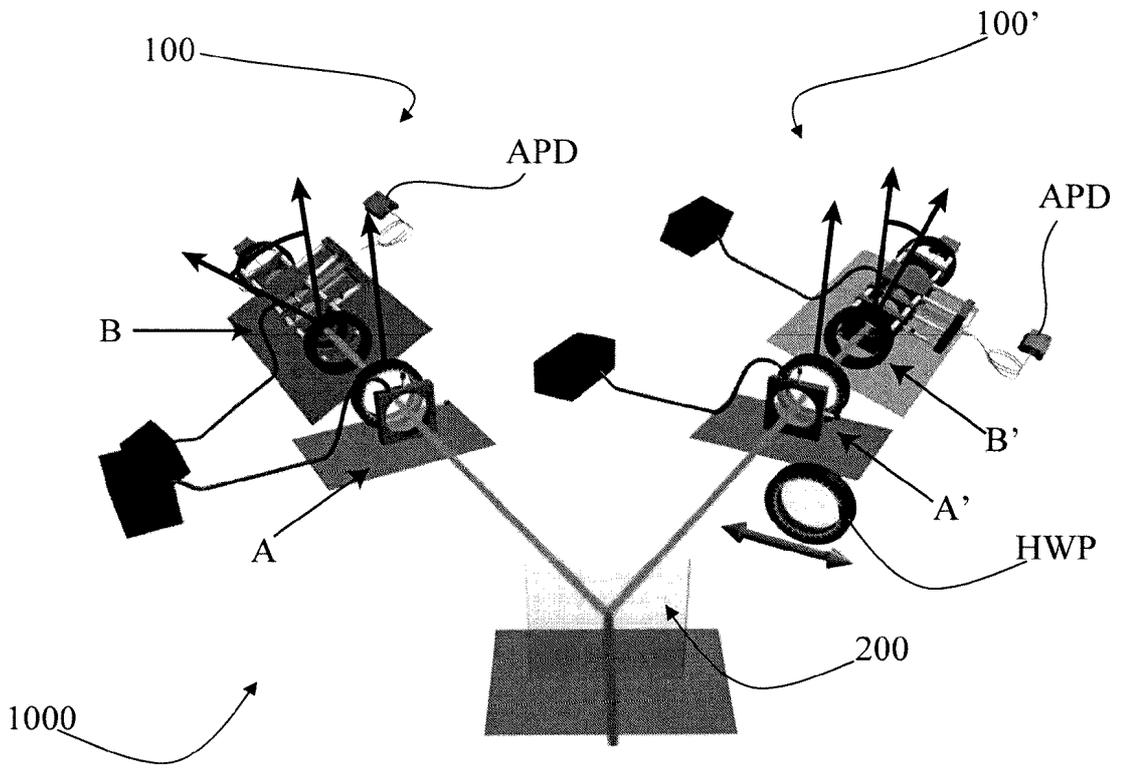


Fig. 6

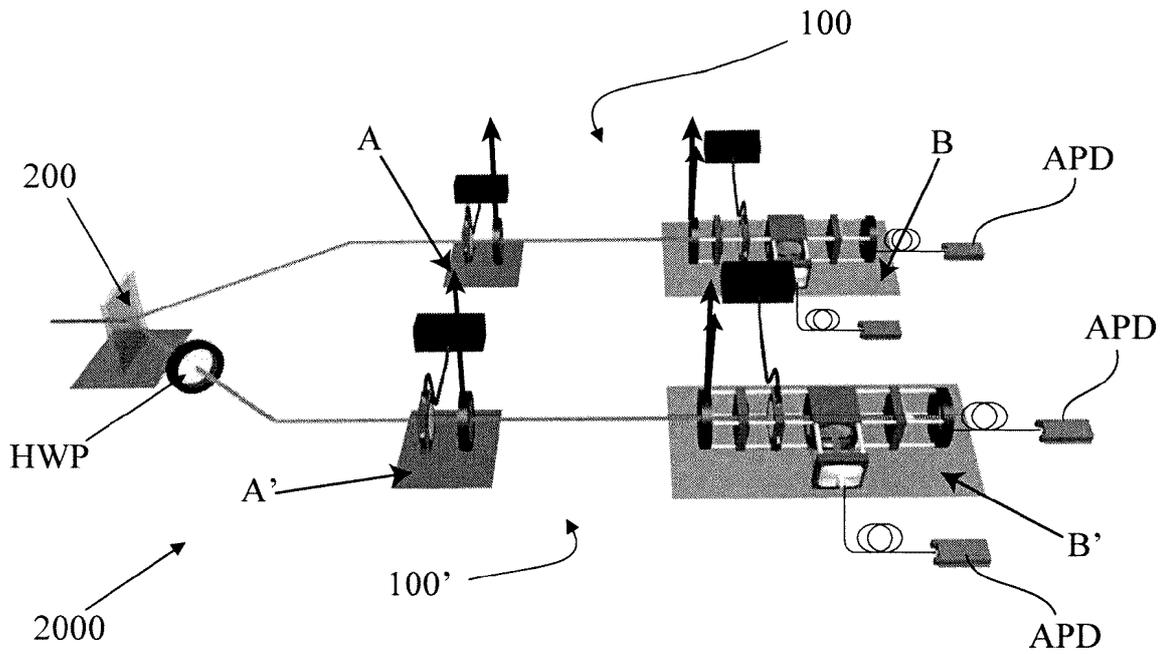


Fig. 7

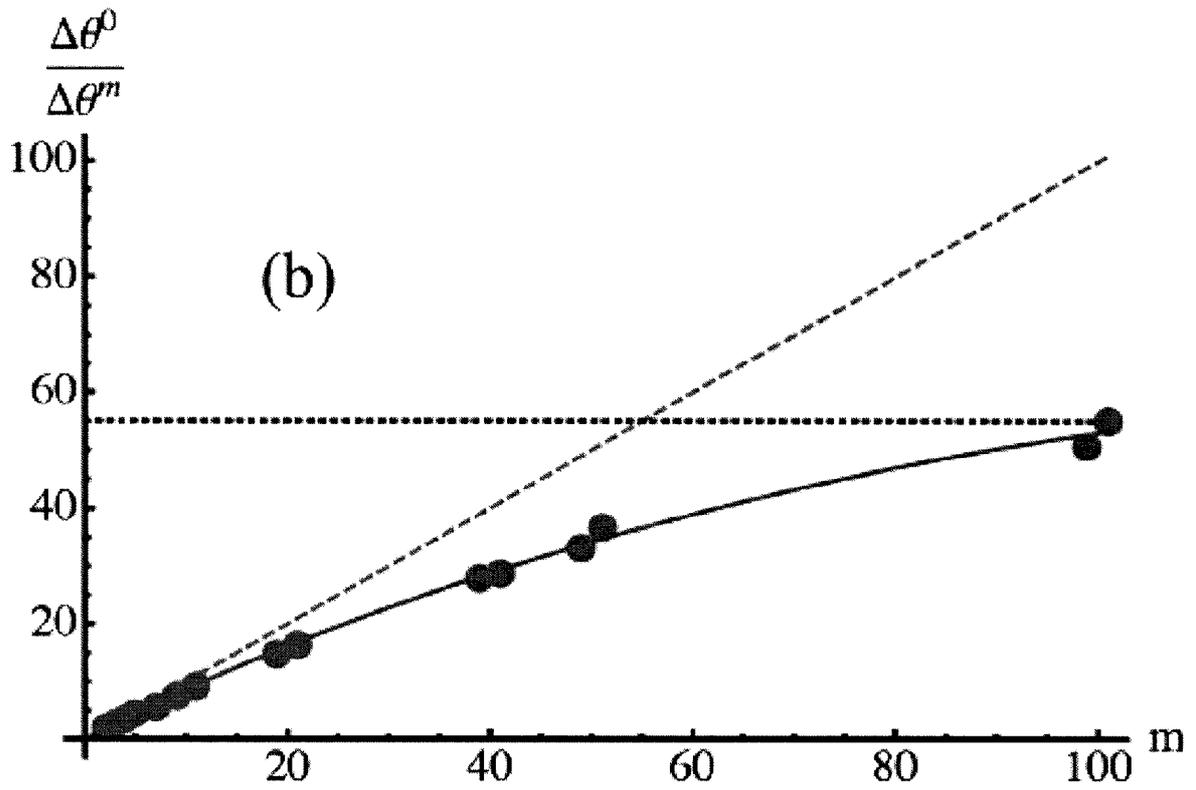
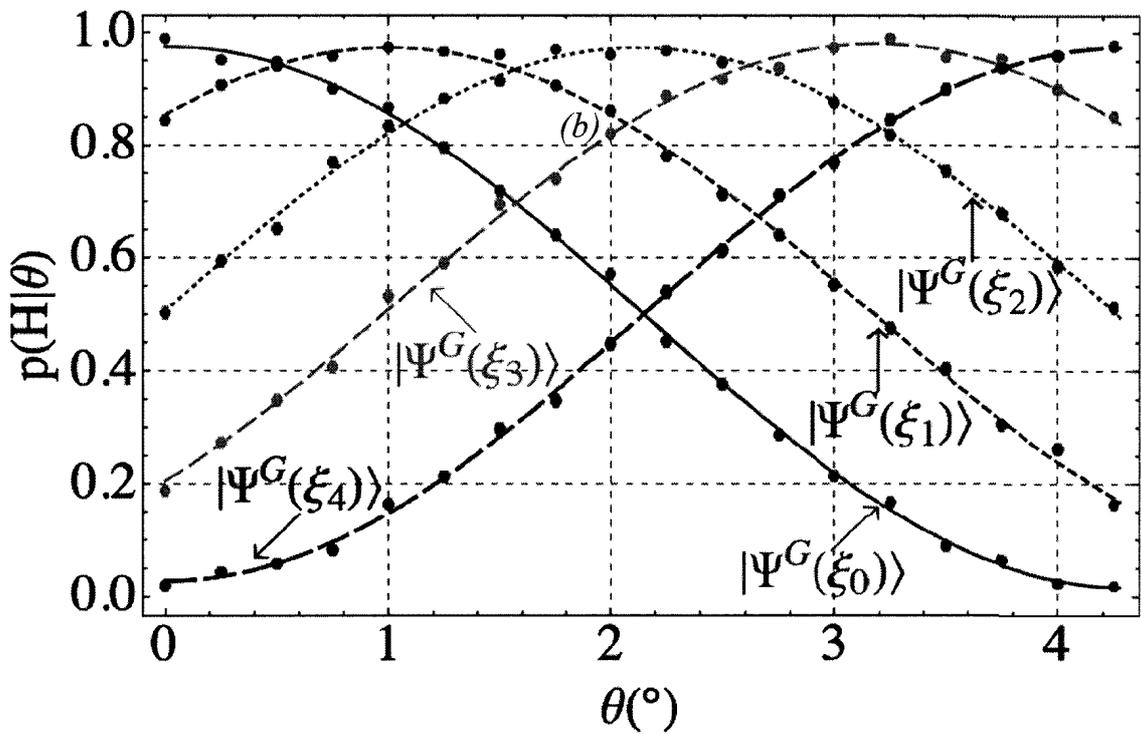
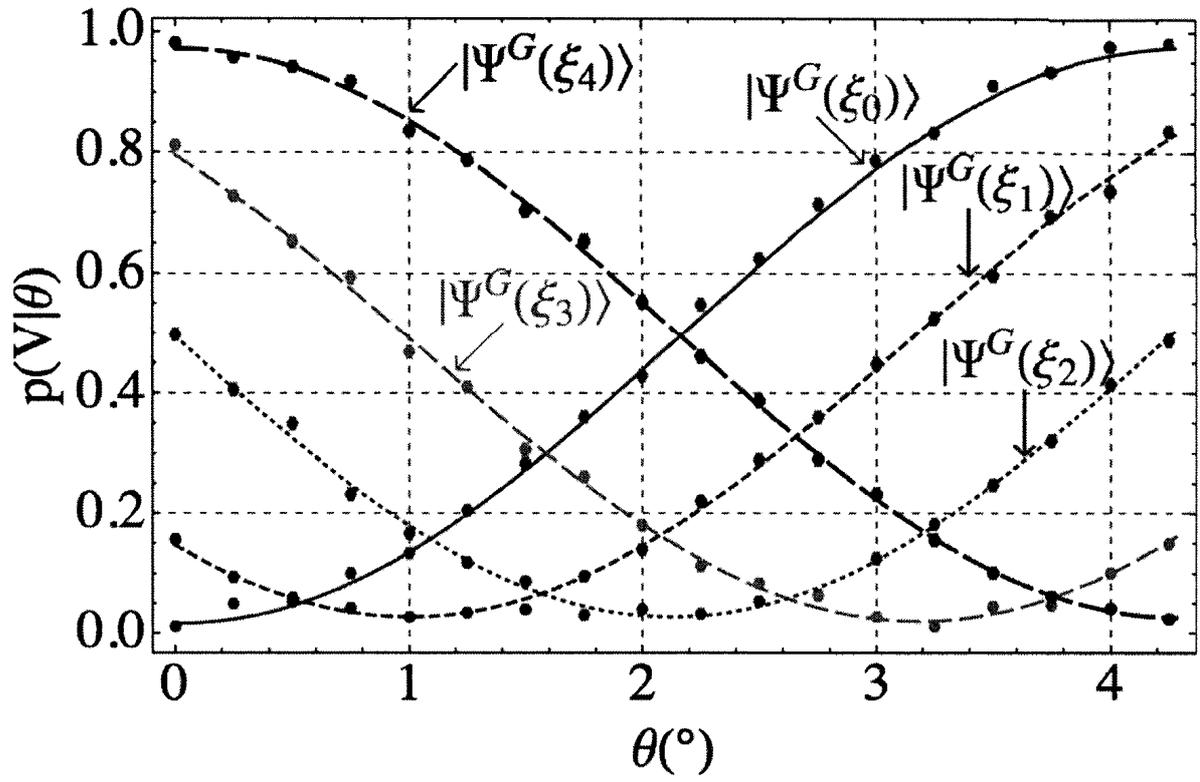


Fig. 8



(a)



(b)

Fig 9