



①9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

①1 Número de publicación: **2 313 179**

⑤1 Int. Cl.:

G12B 21/06 (2006.01)

G12B 21/02 (2006.01)

G01N 13/14 (2006.01)

①2

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑨6 Número de solicitud europea: **05021500 .3**

⑨6 Fecha de presentación : **30.09.2005**

⑨7 Número de publicación de la solicitud: **1770714**

⑨7 Fecha de publicación de la solicitud: **04.04.2007**

⑤4

Título: **Dispositivo óptico para la medición de señales luminosas moduladas.**

④5

Fecha de publicación de la mención BOPI:
01.03.2009

④5

Fecha de la publicación del folleto de la patente:
01.03.2009

⑦3

Titular/es: **Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung
der Wissenschaften e.V.
Hofgartenstrasse 8
80539 München, DE**

⑦2

Inventor/es: **Ocelic, Nenad y
Hillenbrand, Rainer**

⑦4

Agente: **Curell Suñol, Marcelino**

ES 2 313 179 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

Dispositivo óptico para la medición de señales luminosas moduladas.

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un dispositivo óptico para la medición sensible a la amplitud o a la fase de los componentes de señales luminosas moduladas que son característicos de una interacción óptica de campo cercano de una sonda con el objeto que se va a investigar, en el que la interacción de campo cercano se somete a una modulación fundamental a una frecuencia fundamental. En particular, la presente invención se refiere a un dispositivo óptico para medir la señal luminosa captada con un microscopio óptico de campo cercano, en el que la interacción de campo cercano se somete a modulación (por ejemplo, mediante una oscilación mecánica de por lo menos la sonda o el objeto). Además, la presente invención se refiere a un procedimiento para determinar por lo menos un componente de la señal luminosa modulada que es característico de una interacción óptica de campo cercano de una sonda con el objeto que se va a investigar.

Antecedentes técnicos

Existe una amplia diversidad de materiales que presentan propiedades ópticas interesantes en una escala que varía entre centenares de nanómetros y un único nanómetro. Algunos ejemplos de dichos materiales comprenden los virus, las células, las mezclas poliméricas, los materiales policristalinos y nanocompuestos, los puntos cuánticos y los componentes electrónicos, tales como los transistores y las celdas de memoria. Ninguna de estas estructuras puede separarse directamente mediante microscopía óptica convencional debido al límite de resolución impuesto por la difracción de la luz. Este límite se expresa formalmente mediante la ley de Abbe ($d \approx 0,5\lambda/N_A$), en la que d es la resolución lateral, λ es la longitud de onda de la luz y N_A es la apertura numérica del objetivo del microscopio. Análogamente, la luz no puede enfocarse en un disco cuyo radio es inferior a más o menos la mitad de la longitud de onda.

Una primera forma de sortear el límite de difracción se obtuvo con un confinamiento espacial de la fuente de luz con microscopios ópticos de campo cercano de apertura (a-SNOM). Esto podría realizarse realizando una pequeña abertura (de un tamaño de sublongitud de onda) en una pantalla que por lo demás es opaca. Para evitar los efectos de la difracción, la muestra debe colocarse en el entorno inmediato de la abertura. Habitualmente, la intensidad de luz que se transmite a través de la muestra o que se refleja en ésta puede registrarse. También puede obtenerse sensibilidad a la fase, por ejemplo, realizando la modulación de fase sinusoidal de la onda de medición (véase el documento de M. Vaez-Iravani *et al.* "Applied Physic Letters", vol. 62, 1993, p.1044).

La resolución de un a-SNOM está limitada por el tamaño de la abertura. La eficacia de transmisión de una apertura pequeña se reduce rápidamente con la reducción de la relación entre el tamaño y la longitud de onda. Esto limita los tamaños de apertura práctica más pequeños a valores de aproximadamente 50 nm para la luz visible y de centenares de nanómetros o incluso más para la radiación infrarroja.

Para aumentar todavía más la resolución, se diseñó el microscopio de campo cercano sin apertura o de dispersión (s-SNOM). En un s-SNOM, una punta afilada, habitualmente metálica, se somete a una oscilación en la proximidad de la sonda y se ilumina mediante una luz enfocada. La luz dispersada por la punta se capta, ya que transmite la información sobre las propiedades ópticas locales de la muestra. La presencia de la muestra modifica la amplitud y la fase de la luz dispersa, porque la dispersión no solo depende de la punta únicamente, sino también de la polarizabilidad del sistema de punta-muestra acoplado completo. La resolución óptica de un s-SNOM está limitada esencialmente por el radio de la punta solo. No obstante, la mayor parte de la luz captada no se origina en el vértice de la punta, sino que se genera principalmente en las reflexiones y las dispersiones del eje de la punta y toda el área iluminada de la muestra. Esta parte no deseada de la señal, denominada comúnmente luz de fondo debe separarse de las cantidades medidas. Además, para obtener la constante dieléctrica de valor complejo de la muestra, deben determinarse la amplitud y la fase de la luz dispersa.

La señal de fondo puede evitarse aprovechando la oscilación continua de la punta. La vibración de la punta induce un cambio periódico en la polarizabilidad del sistema punta-muestra acoplado y, por lo tanto, una modulación de la onda dispersa S que representa la señal luminosa. No obstante, la luz de fondo B del s-SNOM también se modula intensamente a la misma frecuencia Ω . Los contrastes pueden realzarse y la fuente de dispersión S puede diferenciarse mejor del fondo B si la demodulación de la señal se realiza en un armónico más alto, $n\Omega$, $n > 1$ (véase el documento de G. Wurtz *et al.*, "The European Physical Journal - Applied Physics", vol. 5, 1999, p. 269).

La intensidad de la luz I_n detectada por el detector a la frecuencia $n\Omega$, $n>0$ en general es una suma complicada de todas las señales y los productos de interferencias de fondo posibles:

$$I_n = E_{S,n} E_{B,0} \cos(\varphi_{S,n} - \varphi_{B,0}) + E_{S,0} E_{B,n} \cos(\varphi_{S,0} - \varphi_{B,n}) + \\ \frac{1}{4} \sum_{i \neq 0,n} E_{S,i} E_{S,n+i} \cos(\varphi_{S,i} - \varphi_{S,n+i}) + \frac{1}{4} \sum_{i \neq 0,n} E_{B,i} E_{B,n+i} \\ \cos(\varphi_{B,i} - \varphi_{B,n+i}) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq 0,n} E_{B,i} E_{S,n+i} \cos(\varphi_{B,i} - \varphi_{S,n+i})$$

siendo $E_{S,i}$ y $E_{B,i}$ los i -ésimos componentes armónicos de la señal y las amplitudes de fondo, y $\varphi_{S,i}$ y $\varphi_{B,i}$ sus correspondientes fases. En la práctica, se puede suponer que $E_{B,0} \gg E_{S,i}$ y también que $E_{B,0} \gg E_{B,i}$ para todos los valores $i \geq 1$. Para un armónico suficientemente alto n (habitualmente $n \geq 2$), también se tiene $E_{B,n} \approx 0$. Entonces, la intensidad detectada es simplemente:

$$I_n = E_{S,n} E_{B,0} \cos(\varphi_{S,n} - \varphi_{B,0})$$

No obstante, este procedimiento no facilita información de fase y la cantidad medida I_n depende de las amplitudes del fondo y de la señal y la relación de fase exacta entre ambas.

Combinando la demodulación del armónico más alto con una detección interferométrica, la contribución del fondo puede reducirse significativamente, puesto que en este caso la señal contiene un término adicional que representa el producto de interferencia entre la fuente S y la onda de referencia R:

$$I_n = E_{S,n} (E_{B,0} \cos(\varphi_{S,n} - \varphi_{B,0}) + E_R \cos(\varphi_{S,n} - \varphi_R))$$

Habitualmente, el término de referencia (E_R) es dominante. Descartando adecuadamente la contribución del fondo ($E_{B,0} \ll E_R$), Taubner *et al.* ("Journal of Microscopy", vol. 210, 2003, p. 311) proponen reconstruir la amplitud y la fase midiendo la señal dos veces (obteniéndose las amplitudes de señal s_1 y s_2), con un desplazamiento de fase de referencia de 90° entre las mediciones. Con el valor de sensibilidad del detector a conocido, la amplitud $E_{S,n}$ y la fase $\varphi_{S,n}$ del n -ésimo armónico de las ondas dispersas se reconstruyen de la siguiente manera:

$$E_{S,n} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} / (a E_R) \\ \varphi_{S,n} = \arctan(s_1, s_2)$$

En un experimento de s-SNOM habitual del tipo anterior, en el que se utiliza luz infrarroja con una longitud de onda de alrededor de $10 \mu\text{m}$, se observa una relación entre la amplitud de referencia y la amplitud de fondo $E_R : E_B$ comprendida entre el valor 3 y el 10. En un caso típico de $E_R : E_B = 5$, las expresiones anteriores generan un error de hasta el 28% en la amplitud calculada $E_{S,n}$ y de hasta 17° en la fase $\varphi_{S,n}$ con respecto a los valores exactos. Además, el valor $E_{B,0}$ es desconocido y generalmente no es constante; por consiguiente, se introducen contrastes ópticos artificiales.

Por último, el ajuste del interferómetro comúnmente se realiza con una fase de referencia fija. Esto frecuentemente da por resultado una alineación subóptima, puesto que el valor máximo de la intensidad detectada no necesariamente aumenta al máximo la amplitud real de la señal, sino únicamente su proyección sobre la onda de referencia (componente de coseno). Por consiguiente, resulta ventajoso medir la amplitud y la fase de forma simultánea.

También puede obtenerse sensibilidad a la fase a través de un procedimiento interferométrico propuesto por Zenhausern *et al.* (EP 757 271). Se supone asimismo que la detección interferométrica aumentará la intensidad de la señal detectada en varios órdenes de magnitud, detectando una señal proporcional a $(k r)^3$ en lugar de $(k r)^6$ en el límite de dispersión de Rayleigh $k r \ll 1$, siendo k el vector de onda de la luz de iluminación y r el radio del dispersor. No obstante, esta suposición solo será correcta en ausencia de la señal de fondo, que en realidad amplifica la señal de dispersión medida de la misma manera en que lo hace una referencia interferométrica. Como se ha indicado anteriormente, la amplificación adicional debida a la detección interferométrica habitualmente únicamente es un factor de 10 o menos de la del fondo. En el documento EP 757 271, este efecto no se considera y, en consecuencia, no se propone ningún sistema para eliminar la contribución del fondo.

El primer, y hasta ahora el único, procedimiento capaz de eliminar la interferencia del fondo y medir simultáneamente la amplitud y la fase es el diseñado por Hillenbrand *et al.* (DE 100 35 134). Este procedimiento se basa en la detección de la dispersión en los armónicos más altos $n\Omega$ de la frecuencia de vibración de la punta, heterodinada con la onda de referencia que presenta un desplazamiento de frecuencia Δ con respecto a la luz utilizada para la ilu-

minación de la punta y la muestra. No obstante, este procedimiento heterodino puede adolecer en la práctica de los siguientes inconvenientes: el desplazamiento de frecuencia necesario para el heterodinaje es generado por un modulador acústico-óptico (AOM) que, en su salida, separa el haz desplazado del haz no desplazado por una distancia de menos de 100 mrad. En dichas circunstancias, puede resultar difícil ajustar y alinear el interferómetro Mach-Zender necesario para el procedimiento, y la alineación del haz de frecuencia desplazada cambia con la longitud de onda de la luz. Además, los moduladores AOM comercializados pueden utilizarse únicamente en algunas zonas espectrales relativamente estrechas, determinando por lo tanto que el procedimiento heterodino resulte bastante inadecuado para las aplicaciones espectroscópicas. Por último, la señal óptica puede verse afectada por la interacción mecánica punta-muestra, puesto que la expresión para el valor complejo medido de la señal

$$z_n \sim E_{S,n} E_R e^{i(\varphi_R - \varphi_{S,n} + n\psi)}$$

depende explícitamente de la fase variable ψ de la oscilación mecánica de la punta.

Objetivo de la invención

Uno de los objetivos de la presente invención es proporcionar un dispositivo óptico perfeccionado para determinar por lo menos un componente de señal luminosa, evitando las desventajas de las técnicas existentes. En particular, el dispositivo óptico perfeccionado deberá satisfacer por lo menos uno de los siguientes requisitos: supresión de fondo, amplio rango espectral de funcionamiento, fácil construcción y ajuste y alineación independiente de la longitud de onda. Asimismo, otro objetivo de la presente invención es proporcionar un procedimiento perfeccionado para determinar por lo menos un componente de señal luminosa modulada, que carezca de las desventajas de las técnicas convencionales.

Estos objetivos se alcanzan con un dispositivo óptico o un procedimiento que comprenda las características de las reivindicaciones 1 ó 15. Las formas de realización preferidas de la presente invención se definen en las reivindicaciones subordinadas.

Sumario de la invención

Según un primer aspecto de la presente invención, los objetivos anteriores se alcanzan con un dispositivo óptico para determinar por lo menos un componente de la luz de señal que es característico de la interacción óptica de campo cercano modulada de una sonda con un objeto. El dispositivo óptico comprende un dispositivo de interferómetro y un dispositivo detector para detectar una superposición interferométrica de la luz de señal con luz de fondo y luz de referencia, comprendiendo el dispositivo de interferómetro un modulador de fase del interferómetro que está adaptado para cambiar la fase del interferómetro, y comprendiendo además un dispositivo de demodulación que está adaptado para determinar los componentes de luz de señal a partir de una pluralidad de señales del detector obtenidas en tres o más estados diferentes del interferómetro. El término “fase del interferómetro” hace referencia a la diferencia de fase óptica entre la luz de referencia y la luz de señal.

Según una primera alternativa, el término “estados del interferómetro” hace referencia a las condiciones que representan tres o más fases diferentes del interferómetro. En este caso, los componentes de luz de señal se determinan a partir de una pluralidad de señales del detector obtenidas con por lo menos tres fases diferentes del interferómetro. Según una segunda alternativa, dos de los estados del interferómetro representan dos fases diferentes del interferómetro, mientras que el tercero representa un estado en el que la trayectoria de la luz de referencia está bloqueada.

En la presente memoria, el término “luz” generalmente hace referencia a la radiación electromagnética que abarca el rango de longitudes de onda comprendidas entre las UV y las microondas, es decir, desde 10 nm hasta 30 cm. El término “luz de señal” hace referencia a luz influida coherentemente por la interacción de campo cercano de la sonda y el objeto que se está investigando. La luz de señal comprende componentes de luz emitidos o transmitidos por la combinación de la sonda y el objeto que se está investigando. El término “determinar por lo menos un componente de luz de señal” hace referencia a la medición de por lo menos la amplitud o la fase de por lo menos un componente armónico de frecuencia comprendido en la luz de señal.

La presente invención da a conocer un nuevo procedimiento para medir sin interferencias de fondo la amplitud o la fase de una luz influida coherentemente (por ejemplo, dispersada por una fuente de tamaño de sublongitud de onda). Esto se logra mediante el dispositivo de interferómetro con la modulación simultánea de la señal y la fase del interferómetro.

La presente invención se basa en un interferómetro cuyo brazo de medición contiene la sonda y el objeto que se va a investigar que actúan como fuente de luz de señal (es decir, de ondas electromagnéticas dispersas). Esta luz de señal se modula periódicamente a la frecuencia fundamental Ω . La fase del interferómetro se modula de forma simultánea, preferentemente de manera periódica a una frecuencia fundamental diferente M .

La primera modulación (Ω) aplicada a la fuente de luz de señal distingue esta luz de la del entorno (el fondo). La interferencia entre la luz de señal y la luz del fondo puede separarse de la señal medida mediante la segunda

modulación (M) aplicada a la fase del interferómetro, preferentemente cambiando la longitud de la trayectoria óptica de la luz de referencia. Esta modulación adicional también permite la recuperación simultánea de la amplitud y la fase de los componentes de luz de señal.

5 La luz de señal puede comprender, por ejemplo, luz creada mediante dispersión elástica, tal como la de la microscopía s-SNOM. En cualquier caso, la luz de señal se modula a la frecuencia fundamental Ω mediante una modulación de la interacción óptica de campo cercano. Según una aplicación preferida de la presente invención, la luz de señal comprende la luz dispersada de la punta de un microscopio s-SNOM, siendo sometida dicha punta del microscopio a una oscilación en los alrededores de la muestra, de la forma conocida en la microscopía s-SNOM convencional. La
10 oscilación de la punta permite la modulación de luz dispersa a la frecuencia fundamental Ω .

La luz de señal es característica de la interacción óptica de campo cercano modulada de una sonda con un objeto. El término “sonda” abarca, por ejemplo, una sonda de apertura, una sonda de dispersión, una partícula individual o incluso una molécula individual de las que se utilizan como sonda en los procedimientos de investigación de campo
15 cercano. El término “objeto” abarca por lo menos uno de los siguientes elementos: una superficie de la muestra, una partícula individual, una molécula individual o un líquido que comprende la partícula que se está investigando.

El término “dispositivo de interferómetro” hace referencia a cualquier estructura de interferómetro que permite la superposición de la luz de señal y la luz de fondo con la luz de referencia en el dispositivo detector. En un ejemplo,
20 el dispositivo de interferómetro puede comprender un interferómetro de Mach-Zender. Es particularmente preferible utilizar un interferómetro tipo Michelson que permite ventajosamente un ensamblaje más compacto y una alineación más fácil de los haces de luz.

La presente invención introduce varias ventajas prácticas con respecto a las técnicas existentes, incluido también el
25 sistema heterodino de Hillenbrand *et al.* (DE 100 35 134) mencionado anteriormente. En comparación con el sistema heterodino, la presente invención elimina asimismo bien la contribución del fondo de la señal medida y también suministra información de amplitud y de fase simultáneamente. A diferencia del procedimiento heterodino, la información de fase óptica se obtiene con independencia de la fase de oscilación mecánica de la punta.

30 La presente invención puede utilizarse para la microscopía de campo cercano en todo el espectro visible e infrarrojo sin cambiar o realinear ningún componente. En contraste con el s-SNOM heterodino, la presente invención permite el funcionamiento simultáneo a varias longitudes de onda, incluida también la espectroscopía de campo cercano de banda ancha.

35 En contraste con la espectroscopía de transformada de Fourier convencional, en la presente invención, la luz de referencia se dirige hacia el detector sin que la luz de referencia modulada interactúe ni con la sonda ni con el objeto que se está investigando. Esto proporciona sensibilidad a la fase óptica y, todavía más importante, permite amplificar la señal interferométrica y eliminar la luz de fondo, lo cual resulta imposible con la espectroscopía de transformada de Fourier convencional.
40

Según una forma de realización preferida de la presente invención, el modulador de fase del interferómetro está adaptado para cambiar periódicamente la fase del interferómetro. Esta forma de realización presenta ventajas particulares en términos de flexibilidad de recuperación de la luz de señal que se está investigando. Según una forma de
45 realización particularmente preferida, el modulador de fase del interferómetro está adaptado para cambiar sinusoidalmente la fase de la luz de referencia a una frecuencia de modulación de referencia predeterminada (M). En este caso, el dispositivo de demodulación está adaptado para demodular las señales del detector a una o más frecuencias iguales a la suma o la resta entre un múltiplo entero de la frecuencia fundamental Ω y un múltiplo entero de la frecuencia de modulación del interferómetro M. Una ventaja particular de esta forma de realización es que el dispositivo óptico puede funcionar a frecuencias subMHz en las que los detectores y los dispositivos electrónicos son más precisos y
50 sustancialmente más económicos que los que funcionan a las frecuencias de radio necesarias para el procedimiento heterodino de Hillenbrand *et al.*.

Según una forma de realización alternativa de la presente invención, el modulador de fase del interferómetro está adaptado para cambiar gradualmente la fase del interferómetro. Esta forma de realización puede tener ventajas
55 particulares en términos del ajuste pretendido de una cantidad suficiente de tres fases del interferómetro.

Según una forma de realización particularmente preferida de la presente invención, el modulador de fase del interferómetro está adaptado para cambiar la fase del interferómetro según una función triangular, y el dispositivo de demodulación está adaptado para determinar los componentes de luz de señal mediante análisis espectral de los
60 interferogramas resultantes. Esta forma de realización tiene una ventaja particular, en la medida en que permite la espectroscopía multilínea y de banda ancha.

Otra importante ventaja de la presente invención deriva de la disponibilidad de los diferentes tipos de moduladores de fase de luz de referencia. Dependiendo de la aplicación y la estructura particular de la configuración óptica que se va a utilizar, el modulador de fase del interferómetro puede comprender uno o varios de los siguientes elementos: por lo
65 menos un espejo móvil, por lo menos un modulador electroóptico, por lo menos un tensor de fibra y por lo menos una combinación espejo-obturador. La utilización de por lo menos un espejo móvil puede comprender el desplazamiento de por lo menos un espejo a lo largo de la trayectoria de la luz de referencia del dispositivo de interferómetro o la

rotación de un espejo para desviar la trayectoria de la luz de referencia hacia por lo menos tres espejos que definen las fases de luz de referencia mencionadas anteriormente. La utilización del modulador electroóptico puede resultar ventajoso, en la medida en que evita el movimiento y las vibraciones mecánicas así como la histéresis comúnmente experimentada con los accionadores piezoeléctricos.

Preferentemente, el dispositivo óptico comprende además por lo menos una fuente de luz que emite luz de iluminación. El término "luz de iluminación" generalmente hace referencia a una irradiación comprendida dentro del rango de longitudes de onda citado, que ilumina el objeto que se está investigando.

Según una primera variante, la fuente de luz puede comprender por lo menos una fuente de láser que emite la luz de iluminación. Preferentemente, la fuente de luz comprende dos o más fuentes de láser que emiten a longitudes de onda diferentes y que pueden utilizarse en las aplicaciones de espectroscopía de la presente invención descritas en términos generales más adelante. Además, puede utilizarse una fuente de láser para generar un haz láser piloto para finalidades de ajuste. En particular, las mediciones con luz invisible se simplifican gracias a esta forma de realización, puesto que un haz piloto visible puede pasar a través de todos los componentes ópticos, a diferencia de lo que ocurre con los moduladores acústico-ópticos infrarrojos utilizados convencionalmente, que resultan opacos para la luz visible.

Según una segunda variante de la presente invención, la fuente de luz comprende una fuente de banda ancha, tal como una fuente de radiación térmica o un láser de femtosegundo.

Según otra forma de realización ventajosa de la presente invención, el dispositivo óptico comprende además un sensor de la longitud de la trayectoria de la luz. El sensor está adaptado para detectar la longitud de la trayectoria de la señal de referencia o luminosa actual impuesta por la modulación de la fase del interferómetro. La provisión del sensor representa una ventaja particular para la reconstrucción de interferogramas espaciales y la recuperación de la luz de señal utilizando algoritmos basados en software.

El dispositivo óptico según la presente invención puede utilizarse para obtener componentes de luz de señal sin interferencias de luz de fondo en cada aplicación, siendo la luz de señal característica de una propiedad particular del objeto que se está investigando y siendo modulada la luz de señal con la modulación fundamental Ω indicada anteriormente. La aplicación preferida se encuentra en la microscopía óptica de campo cercano. Ventajosamente, un microscopio óptico de campo cercano convencional puede adaptarse fácilmente a la técnica de la presente invención.

En consecuencia, un objeto independiente de la presente invención es un microscopio óptico de campo cercano que comprende una punta de sonda capaz de ser sometida a una oscilación mecánica a una frecuencia fundamental cerca (por ejemplo, encima) de una superficie de la muestra que se está investigando, por lo menos una fuente de luz para generar la luz de iluminación y el dispositivo óptico descrito anteriormente según la presente invención. En este caso, la punta de la sonda se acopla a través de una interacción de campo cercano a la superficie de la muestra que representa el objeto que se está investigando, y el dispositivo óptico de la presente invención se utiliza para recuperar la luz de señal que se está dispersando en la punta de la sonda.

Según un segundo aspecto de la presente invención, el objetivo anterior se alcanza con un procedimiento para determinar por lo menos un componente de luz de señal que es característica de una propiedad del objeto que se va a investigar y que presenta una modulación fundamental a una frecuencia Ω .

En general, el procedimiento de la presente invención comprende las etapas de iluminación del objeto con luz de iluminación para suministrar la luz de señal y generar también de ese modo la luz de fondo, superposición de la luz de señal y la luz de referencia separadas de la luz de iluminación, detección de la luz de señal y la luz de referencia superpuestas para obtener las señales de salida del detector, incluidos los componentes de la luz de señal deseados, y determinación de los componentes de luz de señal demodulando las señales de salida del detector, en la que la fase del interferómetro se cambia repetidamente y la etapa de detección comprende el registro de las salidas del detector correspondientes a por lo menos tres estados diferentes del interferómetro.

Según una forma de realización particularmente preferida de la presente invención, la modulación de la fase del interferómetro se realiza mediante la modulación de la fase de la luz de referencia. En este caso, la fase de la onda electromagnética de referencia modulada en la posición del detector puede describirse mediante una función del tiempo t , $\varphi_R(t) = \omega t + \varphi_{\text{mod}}(t) + \varphi_0$, en la que ω es la frecuencia circular de la radiación electromagnética, φ_{mod} es una función predeterminada del tiempo correspondiente a la modulación de referencia aplicada y el término φ_0 es un desplazamiento de fase constante determinado por la geometría exacta del sistema. Preferentemente, $\varphi_R(t)$ es una función periódica del tiempo que presenta un período T , correspondiente a la frecuencia fundamental $M = 1/T$.

El procedimiento de la presente invención es ventajoso en la medida en que dispone de diversas técnicas para modular la luz de referencia, que pueden seleccionarse dependiendo de los requisitos de la aplicación particular. De la misma manera, el procedimiento para demodular la señal del detector se selecciona dependiendo del procedimiento de modulación de referencia. Lo mismo se aplica a los procedimientos de calibración y sincronización provistos opcionalmente para mejorar el procesamiento de la señal.

Generalmente, se prevén tres sistemas generales diferentes, dependiendo de $\varphi_{\text{mod}}(t)$, que puede adoptar una forma sinusoidal, triangular o escalonada.

Si la fase de la luz de referencia se cambia de manera continua de acuerdo con la función sinusoidal, la amplitud o la fase de la luz de señal puede reconstruirse preferentemente a partir de la señal del detector, analizando por lo menos una frecuencia de banda lateral para un múltiplo entero predeterminado de la frecuencia fundamental Ω . Ventajosamente, la frecuencia de banda lateral correspondiente a por lo menos un múltiplo par y a por lo menos un múltiplo impar de la frecuencia de modulación de referencia puede registrarse, y la amplitud y la fase de la luz de señal pueden determinarse simultáneamente.

Si la fase de la luz de referencia se cambia de acuerdo con una función triangular según una forma de realización alternativa del procedimiento de la presente invención, la etapa de detección comprende el registro de interferogramas de la luz de referencia y de señal superpuestas a uno o más múltiplos enteros no cero de la frecuencia fundamental Ω , y la etapa de determinación de por lo menos la amplitud o la fase de los componentes de señal comprende un análisis espectral de los interferogramas registrados. Ventajosamente, los algoritmos disponibles para la espectroscopía de transformada de Fourier pueden aplicarse con esta forma de realización. Si en la práctica la función triangular no es factible o no deseada por motivos de rendimiento, los interferogramas $I_n(x)$ pueden reconstruirse midiendo simultáneamente la señal de salida del detector $I_n(t)$ y la correspondiente posición $x(t)$, utilizando el sensor de posición del modulador de referencia.

Según una forma de realización particularmente preferida de la presente invención, la luz de iluminación puede comprender dos o más longitudes de onda diferentes. La iluminación de longitud de onda múltiple según la presente invención puede suministrarse para por lo menos una de las finalidades que se indican a continuación. En primer lugar, puede seleccionarse una de las longitudes de onda de la luz de iluminación comprendida dentro del rango de longitudes de onda visibles para que el correspondiente componente de luz pueda utilizarse para ajustar el dispositivo óptico. En un ejemplo, puede suministrarse un haz láser verde o rojo piloto, junto con un haz infrarrojo de medición. Además, la segunda fuente de luz puede utilizarse para un sensor interferométrico de trayectoria óptica para el haz de referencia.

Asimismo, la iluminación de banda ancha permite combinar el procedimiento de la presente invención con un análisis espectral completo de la muestra que se está investigando.

Por último, puede recopilarse información adicional si una de las fuentes de luz de iluminación diferentes se somete a una modulación de amplitud adicional con la frecuencia L . El análisis espectral de los correspondientes interferogramas obtenidos mediante la subsiguiente demodulación de la salida del detector a una frecuencia que es la suma o la resta de la frecuencia de modulación de amplitud de iluminación L y un entero múltiplo de la frecuencia de modulación de la luz de señal Ω permite la medición de la fluorescencia estimulada o Raman simultáneamente en combinación con la microscopía óptica de campo cercano.

Si se modula la fase de la luz de referencia de acuerdo con una función escalón según otra forma de realización ventajosa de la presente invención, la etapa de detección comprende el registro de una pluralidad de señales de luz de señal y de referencia superpuestas a una frecuencia armónica predeterminada $n\Omega$. En el caso más simple, la etapa de recuperación de los componentes de la señal se simplifica, puesto que los componentes de luz de señal pueden determinarse resolviendo únicamente un sistema de tres ecuaciones lineales solo.

A continuación, se describen otros detalles y ventajas de la presente invención con referencia a las formas de realización preferidas de la presente invención ilustradas en las figuras siguientes:

Figura 1: ilustración esquemática de un dispositivo óptico según una primera forma de realización de la presente invención;

Figura 2: ilustración de la aplicación de la presente invención en la microscopía de campo cercano;

Figuras 3 a 6: ilustraciones esquemáticas de dispositivos ópticos según otras formas de realización de la presente invención;

Figura 7: representaciones gráficas de los espectros de señal generados con el procedimiento de la presente invención;

Figura 8: ilustración esquemática de un dispositivo óptico según otra forma de realización de la presente invención;

Figuras 9 a 11: ilustraciones esquemáticas de diversas aplicaciones de la presente invención.

La siguiente descripción de las formas de realización preferidas de la presente invención se refiere a las características particulares del dispositivo óptico y el procedimiento para determinar la señal luminosa modulada, que se proveen para implementar la presente invención en la práctica. No se proporciona información detallada de los componentes ópticos, tales como las fuentes de láser, los detectores y los procesadores de señales, ni tampoco de la microscopía de campo cercano, en la medida en que éstos ya se conocen en la técnica anterior. La descripción de las formas de realización preferidas se refiere a la aplicación en la microscopía de campo cercano. Debe resaltarse que los principios de la presente invención pueden aplicarse de una manera análoga a las mediciones de la luz modulada en la microscopía de campo cercano y en particular para las aplicaciones resumidas a continuación.

Según la forma de realización ilustrada esquemáticamente en la figura 1, un dispositivo óptico 100 según la presente invención comprende un dispositivo de interferómetro 10, un dispositivo detector 20, un dispositivo de demodulación 30, un modulador de fase del interferómetro 40, un dispositivo de fuente de luz 50 y opcionalmente un dispositivo sensor de trayectoria de luz de referencia 60.

El dispositivo de interferómetro comprende un divisor del haz 11 que provee las siguientes ramas del dispositivo de interferómetro. En primer lugar, una trayectoria de luz de iluminación I se dirige desde el dispositivo de fuente de luz 50 hasta la sonda 1 investigada que actúa como fuente de señal luminosa modulada (por ejemplo, de las ondas de luz dispersa). La trayectoria de luz de referencia II se extiende desde el divisor de haz 11, pasa por el modulador de fase de referencia 40 y vuelve al divisor de haz 11 y el dispositivo detector 20. Una parte de la luz de iluminación se separa en el divisor de haz 11 como luz de referencia a lo largo de la trayectoria de luz de referencia II. Por último, la trayectoria de la luz de señal III (brazo de medición) se extiende entre el objeto 1 y el dispositivo detector 20 pasando por el divisor de haz 11. La luz de señal así como la luz de fondo de la sonda 1 y el entorno de ésta se desplaza a lo largo de la trayectoria de luz de señal III hasta el dispositivo detector 20, donde se superpone a la luz de referencia que se desplaza a lo largo de la trayectoria de luz de referencia II. El divisor de haz 11 comprende un componente óptico, tal como un espejo semitransparente, una película fina o unos prismas de cuña.

El dispositivo detector 20 comprende, por ejemplo, un fotomultiplicador, un fotodiodo o un fotodiodo de avalancha. El dispositivo de demodulación 30 comprende un circuito de cálculo para implementar el procedimiento de demodulación según una de las formas de realización resumidas más adelante. El circuito de cálculo puede estar provisto de una tarjeta de circuito electrónico especialmente adaptada o un ordenador, tal como un PC. El dispositivo de demodulación 30 está conectado a un dispositivo de control (no representado) que comprende interfaces para controlar o supervisar la función del dispositivo óptico 100.

El modulador de fase del interferómetro 40 está adaptado para modular la diferencia de longitud de trayectoria óptica entre la trayectoria de luz de referencia II y la trayectoria de luz de señal III. En un ejemplo, el modulador de fase del interferómetro 40 comprende un espejo plano 41 que está dispuesto perpendicularmente a la trayectoria de luz de referencia II y que está conectado a una unidad piezoeléctrica 42 (véase en la figura rodeada por un círculo). Con la unidad piezoeléctrica 42, el espejo 41 puede desplazarse hasta por lo menos tres posiciones diferentes, y de esta forma la luz de referencia presenta pues tres fases diferentes. En las figuras 3 a 6, se ilustran otras formas de realización alternativas del modulador 40. En un ejemplo, el modulador puede estar dispuesto en la trayectoria de luz de señal (representada esquemáticamente mediante líneas discontinuas, véase también la figura 8).

El dispositivo de fuente de luz 50 comprende una o más fuentes de banda estrecha o banda ancha que funcionan a una o más longitudes de onda o rangos de longitudes de onda de emisión deseados. Se puede proveer, por ejemplo, un láser emisor de radiación IR, tal como un láser de CO₂ o un láser libre de electrones. Otra posibilidad es que el dispositivo de fuente de luz 50 comprenda una fuente de banda ancha que emite luz blanca, tal como un láser de impulsos de femtosegundo, o una fuente de radiación térmica, tal como un globo de carburo de silicio o una lámpara de filamento de tungsteno.

El número de referencia 60 designa el dispositivo sensor de longitud de trayectoria de luz representado esquemáticamente, que está adaptado para detectar por lo menos la longitud de la trayectoria de la luz de referencia o la longitud de la trayectoria de la luz de señal según el estado actual del modulador 40. Por ejemplo, el dispositivo sensor de trayectoria de luz de referencia 60 comprende por lo menos un sensor que puede ser un sensor de posición capacitivo, un sensor de deformación o un sensor interferométrico de posición.

El dispositivo óptico 100 se utiliza de acuerdo con varias prescripciones, en particular con respecto a la forma de modulación aplicada a la fase de la onda de referencia y la recuperación (demodulación) de la amplitud y la fase de la luz dispersada por la sonda 1. Los principios de modulación y demodulación se describen de forma resumida más adelante. También se indica cómo se determinan los parámetros variables correspondientes a la manipulación de la fase del interferómetro ("calibración") y cómo se sincroniza la modulación fundamental de la sonda y la modulación y la demodulación de la fase del interferómetro. También puede disponerse de una sincronización adicional con un posible movimiento de barrido. En cualquier caso, la interacción de campo cercano de la sonda 1 con el objeto que se está investigando 5 se somete a una modulación, de tal forma que la luz de señal que se desplaza a lo largo de la trayectoria de luz de señal III se modula a la misma frecuencia también.

En la aplicación de microscopía de campo cercano, la sonda comprende el elemento de sondeo 1 de un microscopio óptico de campo cercano como el ilustrado en la figura 2. Por ejemplo, el elemento de sondeo 1 comprende una punta 2 dispuesta en un cantilever oscilante 3, de tal forma que la punta 2 se dirige hacia la superficie 4 de una muestra 5 cuya imagen se desea obtener. La muestra 5 representa el objeto que se va a investigar. El elemento de sondeo 1 oscila a la frecuencia fundamental Ω . La luz de señal influenciada (por ejemplo, dispersada) por el elemento de sondeo 1 se modula periódicamente en amplitud o fase. Esta modulación permite diferenciar del fondo incluso una fuente de tamaño muy inferior a la longitud de onda.

Junto con la frecuencia de modulación fundamental Ω , la luz de señal puede contener los múltiplos enteros de ésta $n\Omega$ ("armónicos altos") y un componente no modulado (componente de "CC"). El componente de CC apenas puede proveer información que no esté contaminada por la señal de fondo. Por el contrario, los armónicos altos a menudo son cruciales en la separación de la dispersión de objetos pequeños del fondo si el fondo también se modula, como

en el caso del s-SNOM de la figura 2. La luz de fondo habitualmente pierde su intensidad de forma muy rápida con el ascenso del armónico, de tal manera que la elección de un armónico (n) suficientemente alto permite observar la dispersión del objeto investigado únicamente. No obstante, esto no puede lograrse mediante una simple detección interferométrica de la señal modulada, incluso en un armónico alto.

Puesto que tanto la luz medida del objeto como la del fondo son coherentes con la luz de iluminación incidente, éstas interfieren en el dispositivo detector 20. Esta interferencia con el fondo amplifica la señal investigada de la misma forma en que lo hace la interferencia con una onda de referencia a la misma frecuencia.

La presente invención resuelve el problema de la interferencia con el fondo mediante la modulación adicional aplicada a la onda de luz de referencia. Esta segunda modulación separa la onda de referencia del fondo y asimismo permite recuperar la amplitud y la fase de forma simultánea.

La aplicación de la presente invención no se limita a la determinación de la luz dispersa de la señal, sino que también puede aplicarse a otros tipos de emisiones, tales como la fluorescencia estimulada o la emisión Raman o incluso la transmisión. En un ejemplo, la luz de señal puede comprender luz de iluminación que ha pasado ya a través del objeto 1.

El modulador de fase del interferómetro 40 ilustrado en la figura 1 está adaptado para modular la fase de la luz de referencia de acuerdo con una pluralidad de procedimientos diferentes. Estos procedimientos comprenden en particular la modulación continua (tipo A), la modulación discreta escalonada (tipo B) y la modulación triangular (tipo C). Los tipos de modulación A, B y C se describen de forma detallada más adelante. Aunque el modulador 40 con el espejo 41 y la unidad piezoeléctrica 42 según la figura 1 es adecuado para todos los tipos de modulación, se dispone de otras formas de realización de moduladores de fase de referencia 40 particularmente adaptados solo para uno o dos de los tipos de modulación indicados. Estas formas de realización se ilustran en las figuras 3 a 6. El dispositivo de demodulación 30 no se representa en dichas figuras.

Según la figura 3, el modulador de fase del interferómetro 40 comprende un espejo plano 41 y un modulador electroóptico 43 dispuesto entre el divisor de haz 11 y el espejo 41. El modulador electroóptico comprende, por ejemplo, un cristal de LiNbO_3 o LiTaO_3 (fabricado por Electro-Optical Products Corp., modelo EO-10). Con el modulador electroóptico 43, puede obtenerse una diferencia de longitud de trayectoria óptica de hasta 10 μm . En consecuencia, la forma de realización de la figura 3 resulta particularmente adecuada para los tipos de modulación A y B.

Según la figura 4, el dispositivo de interferómetro 10 comprende dos divisores de haz 11.1 y 11.2 que asumen la función del divisor de haz 11 anterior. En este caso, la trayectoria de la luz de iluminación se extiende, por ejemplo, desde una fuente de láser 52 hasta el objeto 1, pasando por ambos divisores de haz 11.1 y 11.2, mientras que la trayectoria de luz de referencia se extiende desde el primer divisor de haz 11.1 hasta el dispositivo detector 20, pasando por dos espejos 41.1 y 41.2, un modulador de fibra óptica 44 y el segundo divisor de haz 11.2. La trayectoria de la luz de señal es como la de la figura 1. El modulador de fibra óptica 44 comprende una fibra óptica que puede estirarse con una unidad piezoeléctrica.

La figura 4 puede modificarse todavía más introduciendo otro modulador de fibra óptica u otro modulador electroóptico en una de las ramas de la trayectoria de la luz de referencia (por ejemplo, entre el primer divisor de haz 11.1 y el primer espejo 41.1). En consecuencia, el intervalo de longitud de trayectoria óptica puede incrementarse.

La figura 5 ilustra una forma de realización de la presente invención, en la que el modulador de fase de referencia 40 comprende una combinación de un espejo rotatorio 45 dispuesto en un rotador piezoeléctrico 46 con tres espejos planos terminales 41.1, 41.2 y 41.3. En esta forma de realización, la luz de referencia se desplaza desde el divisor de haz 11, pasa por el espejo rotatorio 45 y alcanza uno de los espejos terminales 41.1 a 41.3, dependiendo del ajuste actual del rotador 46. Los espejos 41.1 a 41.3 están situados de tal forma que se obtienen tres longitudes de trayectoria óptica diferentes para la trayectoria de la luz de referencia. Esta forma de realización es particularmente adecuada para el procedimiento de modulación de tipo B que se describe más adelante. Si van a ajustarse más de 3 fases de referencia para la recopilación de datos, se suministran los correspondientes espejos terminales adicionales.

En la forma de realización según la figura 6, el modulador de fase de referencia 40 comprende una combinación espejo-obturador con 3 obturadores ópticos 47.1, 47.2 y 47.3 y dos espejos terminales 41.1 y 41.2. Dependiendo del estado de los obturadores 47.1 a 47.3, pueden establecerse tres estados de la trayectoria de luz de referencia diferentes, que comprenden dos fases de luz de referencia diferentes y una condición en la que la trayectoria de la luz de referencia está bloqueada. Esta forma de realización es particularmente adecuada para el procedimiento de modulación B.

Además, la figura 6 ilustra la provisión de dos fuentes de láser 51 y 53 como dispositivo de fuente de láser. Ambas fuentes de láser 51 y 53 funcionan con longitudes de onda de emisión diferentes. Una de las fuentes de láser (por ejemplo, la fuente de láser 53) está provista de un modulador de amplitud 70 para implementar la modulación triple (tipo D) descrita más adelante. El modulador de amplitud 70 comprende, por ejemplo, un modulador acústico-óptico, una celda Pockels o una celda Kerr.

El procedimiento de demodulación de la señal que se selecciona depende del tipo de modulación de fase de referencia. Lo mismo se aplica a los procedimientos de calibración y sincronización. La elección de las fuentes de luz y los equipos electrónicos adecuados también está relacionada con el procedimiento de modulación de referencia.

Los sistemas generales A a C difieren con respecto a la modulación de fase $\varphi_{\text{mod}}(t)$, que pueden adoptar preferentemente una forma discreta escalonada o triangular periódica, particularmente sinusoidal. En cada caso, la descripción siguiente de los tipos A a C se refiere a un único armónico (n), aunque en una aplicación real puede medirse simultáneamente cualquier número de componentes armónicos de la misma forma; por ejemplo, utilizando una pluralidad de amplificadores sincrónicos, un demultiplexor y una tarjeta de adquisición de datos multicanal o descomponiendo la señal de salida del detector mediante convertidores descendentes digitales o algoritmos basados en software. Un demultiplexor puede comprender, por ejemplo, unos filtros pasabaja situados después de unos mezcladores equilibrados o unos multiplicadores de precisión que mezclan la señal de salida del detector con una señal de onda sinusoidal obtenida armónicamente a partir de una frecuencia de modulación fundamental Ω mediante un bucle de enganche de fase.

Tipo A

Modulación sinusoidal

Modulación

En general, la modulación de tipo A comprende un cambio periódico continuo de la fase de la luz de referencia.

En la figura 7, se representan los espectros de señal, de referencia y de salida del detector que ilustran las etapas de modulación y demodulación con la modulación sinusoidal. En la figura 7A, se representan los componentes armónicos de la frecuencia de modulación de la luz de señal Ω ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$). Se selecciona una frecuencia fundamental Ω del rango habitual comprendido entre 5 kHz y 5 MHz ($n = 1$). En la figura 7B, se representan los componentes de frecuencia óptica de la frecuencia de modulación de referencia sinusoidal M ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) para el caso en que $M < \Omega$. La superposición de ambas modulaciones genera el espectro de interferencia detectado según la figura 7C, en el que se observan unos picos en los armónicos de la frecuencia fundamental Ω , cada uno de los cuales presenta unos máximos de banda lateral correspondientes a los componentes armónicos de la frecuencia de modulación M . En el caso en que $M > \Omega$, los papeles de M y Ω se invierten, es decir, las bandas se centran alrededor de múltiplos de la frecuencia de modulación de referencia M y los armónicos de Ω se sitúan en las bandas laterales.

Si la fase de referencia se modula sinusoidalmente, ésta puede representarse formalmente de la siguiente forma:

$$\varphi_{\text{mod}}(t) = \gamma \sin(2\pi M t)$$

siendo γ la profundidad de modulación y M la frecuencia de modulación.

Dicha modulación puede realizarse, por ejemplo, haciendo reflejar el haz de referencia en un espejo oscilante controlado por un accionador piezoeléctrico o magnético (figura 1), haciendo pasar el haz de referencia a través de un modulador de fase electroóptico (figura 3) o a través de una fibra óptica estirada por un accionador piezoeléctrico (figura 4).

La modulación sinusoidal determina que la señal de salida del detector en el n -ésimo armónico (frecuencia $n\Omega$) se separe en bandas laterales con frecuencias $f_{n,m} = n\Omega \pm mMI$, como se ilustra en la figura 7C. La amplitud medida exacta $s_{n,m}$ de la señal a la frecuencia $f_{n,m}$ viene dada por la ecuación siguiente:

$$s_{n,m} = a E_{s,n} E_R J_m(\gamma) \cos(m\pi / 2 + \varphi_{s,n} - \varphi_{0,n})$$

en la que m es un índice de banda lateral entero, $E_{s,n}$ y $\varphi_{s,n}$ la amplitud y la fase del n -ésimo armónico de la onda dispersa, E_R la amplitud de la onda de referencia y $\varphi_{0,n}$ el desplazamiento de fase determinado por la geometría que puede establecerse en cero por motivos prácticos. J_m es la función de Bessel de primera especie y orden m , y a es la sensibilidad del detector.

Debe tenerse en cuenta que si la modulación de fase sinusoidal se aplica a la luz de señal en lugar de la luz de referencia, la potencia de supresión del fondo del procedimiento se reduce debido a la presencia de un componente de luz de fondo no modulado.

Demodulación

Según la descripción anterior, las bandas laterales de m par y m impar corresponden a los componentes de coseno y seno de la luz de señal, respectivamente. Midiendo una señal de banda lateral impar (m') y una señal de banda lateral par (m''), se puede recuperar tanto la información de amplitud como la información de fase. $J_m(\gamma)$ debe conocerse, y $a E_R$ puede medirse o simplemente descartarse, puesto que representa solo una constante multiplicativa.

Habitualmente, es preferible realizar la elección del valor más pequeño posible de m' y m'' , puesto que proporciona la profundidad de modulación γ más pequeña. Sin embargo, m'' no debe ser igual a cero, ya que entonces esta señal aparecería exactamente a la frecuencia $n\Omega$ y se superpondría pues al producto de interferencia de fondo.

ES 2 313 179 T3

Una vez elegidos los valores m' y m'' y conocido el valor J_k , la amplitud del n -ésimo armónico de la onda dispersa puede reconstruirse a partir de $s_{n,m'}$ y $s_{n,m''}$.

$$E_{s,n} = \sqrt{(s_{n,m'} / J_1)^2 + (s_{n,m''} / J_2)^2} / a E_R$$

siendo $J_1 = J_{m'}(\gamma)$ y $J_2 = J_{m''}(\gamma)$. La fase del n -ésimo armónico $\varphi_{s,n}$ se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\varphi_{s,n} = \arctan(s_{n,m'} / J_1, s_{n,m''} / J_2)$$

Siempre y cuando las amplitudes $a_{n,k}$ se consideren no negativas, la fase estará situada solo en el primer cuadrante, es decir, $\varphi_n = 0, \dots, \pi/2$. Para ampliar la fase al rango $0, \dots, 2\pi$ completo, deben tenerse en cuenta los signos correctos de las amplitudes $a_{n,k}$. Dependiendo de la implementación, éstos pueden calcularse implícitamente o con ayuda de una señal de referencia externa.

La medición simultánea de varias bandas laterales (por ejemplo, m' y m'' junto con $-m'$ y $-m''$) y el posterior cálculo del promedio pueden emplearse para incrementar la relación señal-ruido.

La demodulación también puede desarrollarse en dos etapas. Si $M < \Omega$, en la primera etapa, la salida del detector se demodula a una frecuencia que es un múltiplo de la frecuencia de modulación de la luz de señal ($n\Omega$), desplazando de ese modo eficazmente la frecuencia $n\Omega$ hasta cero. En la segunda etapa, las amplitudes a uno o más múltiplos enteros de la frecuencia de modulación de referencia M (mM) se extraen de la señal obtenida después de la primera etapa. El resultado de la demodulación de dos etapas, primero a la frecuencia $n\Omega$ y después a la frecuencia mM , es igual al de la demodulación directa a $n\Omega + mM$. Para el caso en el que $M > \Omega$, la salida del detector debe demodularse en primer lugar en uno o más armónicos de la modulación de referencia (mM) y después en el armónico de la modulación de la luz de señal elegido ($n\Omega$).

Calibración

Para que las expresiones anteriores sean utilizables, es necesario conocer de antemano los factores J_1 y J_2 . Para valores fijos de m' y m'' , dichos factores dependen de la profundidad de modulación γ . En caso de que se conozcan los desplazamientos exactos de la onda de referencia, esto conlleva solo evaluar las correspondientes funciones de Bessel J_m . Dicha posibilidad se presenta, por ejemplo, cuando se utiliza un accionador piezoeléctrico para la modulación y si éste funciona en modalidad de bucle cerrado o cuando se utiliza un modulador electroóptico calibrado.

Si se desconoce la profundidad de modulación exacta, todavía es posible determinar J_1 y J_2 aplicando un desplazamiento φ_0 a la fase de la onda de referencia y cambiándolo lentamente para hallar valores máximos de $s_{n,m'}$ y $s_{n,m''}$. Dichos valores máximos se encontrarán en el rango de desplazamientos de hasta 180 grados. Entonces, la relación J_1/J_2 es igual a la relación $\max(s_{n,m'})/\max(s_{n,m''})$. Esta relación es suficiente por sí sola para realizar las mediciones de dispersión relativas. Si las mediciones que se van a efectuar son las absolutas, la profundidad de modulación puede determinarse numéricamente realizando una búsqueda del valor γ con el cual la relación J_1/J_2 calculada es igual a la medida.

Por último, para obtener un rendimiento óptimo (peor caso de máximo de relación señal-ruido), resulta ventajoso imponer la condición $J_1 = J_2$. Esto puede conseguirse ajustando la profundidad de modulación γ hasta que se halla un valor con el cual la suma $s_{n,m'}^2 + s_{n,m''}^2$ permanece inalterada mediante la aplicación de un desplazamiento de fase arbitrario φ_0 a la onda de referencia. Si $m'=1$ y $m''=2$, el primero caso se da con $\gamma=2,63$ y $J_1=J_2=0,462$.

Sincronización

El tipo de modulación A no requiere una sincronización explícita con un posible barrido. La modulación de la fuente y la onda de referencia solo deben sincronizarse con la medición de la señal si se desea el rango de fases $0 \dots 2\pi$ completo. En tal caso existen dos opciones:

- a) Puede suministrarse una señal de referencia externa al detector sincrónico o a un sistema de adquisición de datos digital (DAQ) a la frecuencia medida exacta y con la fase correcta. Dicha señal puede obtenerse, por ejemplo, mezclando la señal o las salidas sincronizadas de los generadores que dirigen las modulaciones de la fuente de dispersión y la onda de referencia.
- b) Ambas modulaciones deben ser generadas por generadores enganchados en fase, y debe utilizarse un sistema de adquisición de datos digital. Si el muestreo se realiza enganchado en fase con la modulación, puede calcularse el signo correcto de las amplitudes $a_{n,m}$. Además, imponiendo determinadas relaciones enteras fijas entre la modulación de la fuente de dispersión, la modulación de la onda de referencia y el tiempo de muestreo, puede evitarse la rotación de la fase de las amplitudes complejas de la señal demodulada $a_{n,k}$, y los signos de éstas pueden extraerse directamente.

Tipo B

Modulación discreta (escalonada)

Modulación

La fase de referencia se cambia a través de una serie de etapas discretas, representadas formalmente como:

$$\varphi_{\text{mod}}(t) = \varphi_i \text{ para } t_{i-1} \leq (t \bmod T) < t_i$$

siendo φ_i la fase dentro del intervalo i , $i=1..N$, y T el período de modulación fundamental. Los tiempos finales del intervalo t_i están sujetos a la restricción $t_0=0$, $t_N=T$. En la mayoría de casos, los intervalos tendrán la misma duración. Se necesitan por lo menos tres etapas diferentes para reconstruir la amplitud de dispersión de valor complejo y eliminar la contribución del fondo.

Dicha modulación de etapas discretas puede realizarse, por ejemplo, utilizando espejos de deflexión eléctrica (figura 5) u obturadores accionados (figura 6) para cambiar el haz de referencia entre espejos diferentes. También puede utilizarse un modulador electroóptico rápido (figuras 3 y 8) o un accionador piezoeléctrico con una frecuencia de resonancia alta y un espejo de luz conectado al mismo (figura 1).

La fase de la luz de señal puede modularse de forma alternativa o adicional a la fase de la luz de referencia sin pérdida de potencia de supresión de la contribución del fondo. Según esta forma de realización representada en la figura 8, el modulador de fase del interferómetro 40 comprende un modulador electroóptico 43 dispuesto entre el divisor de haz 11 y el objeto 1. El modulador electroóptico comprende, por ejemplo, cristal de LiNbO_3 o LiTaO_3 (fabricado por Electro-Optical Products, Corp., modelo EO-10). Con el modulador electroóptico 43, puede obtenerse una diferencia de longitud de trayectoria óptica de hasta $10 \mu\text{m}$. En consecuencia, la forma de realización de la figura 8 es particularmente adecuada para los tipos de modulación B y C (véase más adelante). Como alternativa, la fase de la luz de señal puede modularse sustituyendo el modulador 43 por una combinación de espejos como la representada en la figura 4, que permite el establecimiento de una longitud de trayectoria óptica.

Demodulación

La detección de la señal se realiza a la frecuencia armónica elegida $n\Omega$. Después del registro, la señal se divide primero en intervalos i con la fase de referencia constante. El subsiguiente cálculo del promedio de cada intervalo da por resultado las amplitudes s_i . Puesto que es prácticamente imposible realizar transiciones infinitamente definidas entre las etapas, la señal registrada durante las transiciones deberá rechazarse.

Cuando se descarta la intensidad de la onda dispersa pura, la señal detectada es igual a

$$s_n = a E_{s,n} (E_B \cos(\varphi_{s,n} - \varphi_B) + E_R \cos(\varphi_{s,n} - \varphi_R)),$$

siendo a la sensibilidad del detector y $E_{s,n}$ y $\varphi_{s,n}$ la amplitud y la fase del n -ésimo armónico de la onda dispersa, y siendo E_R y E_B las amplitudes de la señal de la onda de referencia y de fondo y φ_B y φ_R las correspondientes fases. Con $a_n = a E_{s,n} E_R$ y $b = E_B/E_R \cos(\varphi_{s,n} - \varphi_B)$, la expresión anterior puede abreviarse de la siguiente forma

$$s_n = a_n (b + \cos(\varphi_{s,n} - \varphi_R))$$

Puesto que la fase de referencia φ_R adopta cíclicamente un conjunto de valores discretos conocidos φ_i , y los valores correspondientes de s_n se miden, sólo se conservan tres incógnitas: a_n , b y $\varphi_{s,n}$. Con $N=3$ mediciones, a_n y $\varphi_{s,n}$ se obtienen resolviendo el sistema de ecuaciones simultáneas de la forma anterior. Con $N>3$, el sistema está sobredeterminado y entonces puede utilizarse un ajuste.

Puede considerarse el caso especial de una situación en la que uno de los intervalos i_0 representa la medición con el haz de referencia completamente bloqueado (figura 6). El término del fondo $a_n b$ es pues inmediatamente igual a s_{i_0} y como tal puede restarse de los otros valores medidos. Este caso puede ser interesante para las implementaciones prácticas, puesto que impone requisitos menos severos sobre el tiempo de transición entre los dos intervalos consecutivos.

Calibración

El tipo de modulación B conlleva el paso cíclico por varios estados predeterminados, habitualmente a una frecuencia relativamente baja. Esto permite la calibración simple de las fases de referencia deseadas en una situación estática o en el funcionamiento en una modalidad de bucle cerrado.

Sincronización

Si se desea obtener la fase de la luz de señal dentro del rango $0 \dots 2\pi$ completo, la demodulación debe llevarse a cabo en fase con la modulación. Esto puede conseguirse con facilidad utilizando la señal que controla la modulación de la fuente como referencia para un amplificador sincronizado que realiza la demodulación. Para reducir al mínimo el número de transiciones entre los estados de la fase de referencia, y por consiguiente el tiempo de medición, el período de modulación de la onda de referencia debe coincidir con el tiempo de píxel si comprende un barrido.

Tipo C

Modulación triangular

Modulación

La fase de referencia puede describirse mediante una función “triangular” de la siguiente forma:

$$\varphi_{\text{mod}}(t) = \gamma \lfloor 2(t \bmod T) / T - 1 \rfloor + \varphi_0$$

siendo γ la profundidad de modulación, T el período de modulación y φ_0 un desplazamiento determinado por la geometría del interferómetro.

Dicha modulación puede realizarse utilizando los mismos medios que en la modulación sinusoidal, es decir, haciendo reflejar el haz de referencia en un espejo móvil accionado por un accionador piezoeléctrico o magnético (figura 1), haciendo pasar el haz de referencia a través de un modulador de fase electroóptico (figura 3) o a través de una fibra óptica estirada mediante un accionador piezoeléctrico (figura 4).

Si la profundidad de modulación γ necesaria es muy superior a 1 rad, la opción puede limitarse a las soluciones de espejo móvil.

Dicha modulación exhaustiva con $\gamma \gg 1$ rad es necesaria para la espectroscopía de banda ancha en conjunción con fuentes de láser de impulsos o fuentes térmicas. En el funcionamiento que conlleva una línea de láser o varias líneas de láseres espectralmente diferentes y bien separados, habitualmente es suficiente un factor γ del orden de una unidad.

Si la forma de modulación triangular que se considera suficientemente buena no es factible o no es deseada por motivos de rendimiento, es aceptable cambiar la fase de la luz de referencia según una función diferente más conveniente, siempre y cuando se conozca o mida la posición del modulador de referencia o la fase de la luz de referencia reales para cada valor de salida del detector. Para determinar la fase de referencia puede utilizarse, por ejemplo, un sensor de posición capacitivo o de deformación, así como un sistema de medición de distancia óptica (interferométrico).

Como en el caso de la modulación escalonada, la modulación de fase de referencia puede sustituirse o complementarse con la modulación de fase de luz de señal (representada en la figura 8) del mismo período, sin que esto comporte ninguna desventaja particular aparte del posible incremento de la complejidad de la implementación.

Demodulación

Para reconstruir la amplitud $E_{s,n}$ y la fase $\varphi_{s,n}$ del n -ésimo armónico de la luz dispersa, debe registrarse la señal de salida del detector en la frecuencia $n\Omega$. Suponiendo que la modulación sea una modulación triangular perfecta con una velocidad conocida, el trazado de tiempo registrado de la señal puede trasladarse directamente a un interferograma $I_n(x)$. Para el interferograma, basta con tomar solo un lado del triángulo.

Si la función de modulación se desvía de la forma triangular pero se conoce la fase de referencia exacta para cada señal de salida del detector registrada, el interferograma puede reconstruirse con facilidad, por ejemplo, calculando el índice adecuado de cada punto medido en una matriz preasignada de puntos de fases de referencia equidistantes. Como alternativa, puede construirse una función de interpolación a partir de los pares medidos (señal y posición).

Si el cambio de fase se desvía del caso ideal solo en una zona pequeña situada alrededor de los puntos de giro del movimiento triangular, la señal registrada cerca de los puntos de giro puede simplemente rechazarse a expensas de una pequeña pérdida en el poder de resolución de la frecuencia.

Una vez que se ha elaborado correctamente un interferograma espacial $I_n(x)$ utilizando cualquiera de los medios indicados, puede aplicarse la transformada discreta de Fourier (DFT) o un procedimiento equivalente (transformada rápida de Fourier o algoritmo de Gortzel) para obtener su descomposición espectral completa o parcial. El componente de frecuencia cero (CC) de la transformada contiene el producto de interferencia del fondo. La amplitud $E_{s,n}$ y la fase $\varphi_{s,n}$ deseadas de la luz dispersa están directamente contenidas en el correspondiente coeficiente complejo de Fourier. Para una diferencia de fase total γ determinada y una DFT de N puntos, este coeficiente puede hallarse a la distancia de $i = \gamma/(N/2\pi)$ separaciones desde la frecuencia cero.

Este procedimiento funciona igualmente bien incluso con varias longitudes de onda al mismo tiempo. Debe procurarse que las diferencias de fase sean suficientemente grandes como para separar los componentes individuales y realizar un muestreo suficientemente denso como para evitar el solapamiento espectral. Es importante destacar que la diferencia de fase γ depende de la longitud de onda de la luz λ y que puede calcularse a partir de la diferencia de trayectoria óptica total d según $\gamma = d/\lambda$.

El mismo principio puede aplicarse a las fuentes espectralmente anchas, tales como los láseres de impulsos de femtosegundo o las lámparas incandescentes. En este caso, las distancias ópticas recorridas por el haz de referencia y el haz de medición deben ser iguales para que se produzca una interferencia.

Calibración

Los períodos de modulación relativamente largos habitualmente permiten un funcionamiento o modulación en bucle cerrado precalibrados en una situación estática. No es necesario conocer la diferencia de fase total para el funcionamiento en línea única, puesto que ésta puede hallarse realizando una búsqueda de un máximo espectral en una frecuencia no cero.

Sincronización

La detección (mediante un amplificador sincronizado o una tarjeta DAQ) debe sincronizarse mediante procedimientos estándar con la fuente de modulación. Para reducir la frecuencia de modulación de referencia y la diferencia de fase al mínimo, dicha detección puede sincronizarse con el movimiento de barrido. En particular, un píxel de la imagen resultante debe obtenerse a partir de un lado del triángulo.

Tipo D

Modulación triple

Modulación

El procedimiento de modulación triangular (tipo C) permite el funcionamiento simultáneo con varias líneas de láseres completamente independientes. Este procedimiento representa la base para el procedimiento de modulación triple (tipo D). Además del tipo de modulación C que funciona con por lo menos dos fuentes de luz, se aplica una modulación de intensidad adicional a una frecuencia L a una de las fuentes de luz, que debe ser una fuente de láser que emite luz de longitud de onda λ_1 .

Demodulación

La luz de señal en el sistema de modulación triple (tipo D) se recupera a partir de un interferograma, tal como sucede en el caso de la demodulación de tipo C. De forma adicional o alternativa a los interferogramas de tipo C obtenidos a la frecuencia $n\Omega$, los interferogramas deben registrarse a una frecuencia $L \pm n\Omega$.

Los análisis espectrales de los interferogramas obtenidos a la frecuencia $L \pm n\Omega$ no presentarán ninguna señal correspondiente a ninguna longitud de onda de iluminación $\lambda_2 \neq \lambda_1$ si solo tienen lugar procedimientos elásticos.

No obstante, si las longitudes de onda λ_1 y λ_2 corresponden a la longitud de onda de excitación y emisión de un compuesto fluorescente, o si su diferencia de energía fotónica coincide con la energía de transición a cierto estado vibratorio del material investigado, la diafonía entre las líneas λ_1 y λ_2 puede aparecer a través de fluorescencia estimulada o emisión Raman. La intensidad de este efecto puede obtenerse directamente a partir del componente espectral correspondiente a la longitud de onda de iluminación λ_2 extraída de dicho interferograma construido a partir de la salida del detector demodulada a la frecuencia $L \pm n\Omega$.

De esta forma, la microscopía de dispersión de campo cercano puede combinarse con la microscopía Raman o de fluorescencia en un único dispositivo. En particular, cuando la modulación fundamental del objeto necesaria se induce con la vibración de una punta afilada encima de la muestra, el aumento del campo en el vértice de la punta puede utilizarse para incrementar el rendimiento Raman o de fluorescencia. Puede obtenerse otra mejora colocando la muestra sobre un sustrato con $\text{Re}(\varepsilon) \approx -1,7$, aprovechando de ese modo el efecto de resonancia de campo cercano.

Aplicabilidad de la invención

Aparte del caso especial de s-SNOM (figuras 2 y 9), la presente invención es aplicable a cualquier otra medición de campo cercano (por ejemplo, con nanopartículas, moléculas individuales o puntos cuánticos, transistores y celdas de memoria). Otras posibles aplicaciones comprenden la recuperación de información a partir de unos medios ópticos de almacenamiento de datos de alta densidad 7 (figura 10) o a partir de un conjunto de sensores químicos o biológicos densamente agrupados 8 (figura 11). Además, las figuras 9 a 11 ilustran diversas alternativas para disponer los dispositivos ópticos 100 en relación con el objeto 1.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo óptico (100) para determinar por lo menos un componente de luz de señal característico de una interacción óptica de campo cercano de una sonda (1, 2) con un objeto (5) que se va a investigar, en el que la interacción de campo cercano se somete a una modulación fundamental a una frecuencia fundamental Ω , comprendiendo dicho dispositivo óptico (100):

- un dispositivo de interferómetro (10) que comprende:

- una trayectoria de luz de iluminación (I) que se dirige hacia la sonda (1, 2),

- una trayectoria de luz de referencia (II) que se dirige hacia un dispositivo detector (20) para obtener señales de salida del detector que comprenden componentes de luz de señal, y

- una trayectoria de luz de señal (III) que se dirige desde la sonda (1, 2) hasta el dispositivo detector (20), en el que las trayectorias de la luz de referencia y de señal (II, III) se superponen en el dispositivo detector (20), y

- un dispositivo de demodulación (30) para determinar los componentes de luz de señal demodulando las señales de salida del detector, en el que

- la trayectoria de luz de referencia (II) no contiene la sonda (1, 2),

- se dispone un modulador de fase del interferómetro (40) en la trayectoria de la luz de referencia (II) o la trayectoria de la luz de señal (III) para cambiar una fase del interferómetro que comprende la diferencia de fase óptica entre la luz de referencia y la luz de señal, y **caracterizado** porque

- el dispositivo de demodulación (30) está adaptado para determinar los componentes de luz de señal a partir de las señales de salida del detector obtenidas en tres o más estados del interferómetro diferentes, que representan tres o más fases de interferómetro diferentes o por lo menos dos fases de interferómetro diferentes y por lo menos un estado en el que la trayectoria de la luz de referencia (II) está bloqueada.

2. Dispositivo óptico según la reivindicación 1, en el que el modulador de fase del interferómetro (40) comprende un dispositivo accionador (41) que está adaptado para cambiar continuamente la fase del interferómetro.

3. Dispositivo óptico según la reivindicación 2, en el que el dispositivo accionador (41) está adaptado para cambiar periódicamente la fase del interferómetro a una frecuencia de modulación de interferómetro M, y el dispositivo de demodulación (30) está adaptado para demodular las señales del detector a una o más frecuencias igual a la suma o la diferencia entre un múltiplo entero no cero de la frecuencia fundamental Ω y un múltiplo entero de la frecuencia de modulación del interferómetro M.

4. Dispositivo óptico según la reivindicación 1, en el que el modulador de fase del interferómetro (40) comprende un dispositivo accionador (42) que está adaptado para cambiar gradualmente la fase del interferómetro, y el dispositivo demodulador está adaptado para demodular la señal de salida del detector a un múltiplo entero no cero de la frecuencia fundamental Ω .

5. Dispositivo óptico según por lo menos una de las reivindicaciones anteriores, en el que el modulador de fase del interferómetro (40) comprende por lo menos uno de los siguientes dispositivos: un espejo móvil, un modulador electroóptico, un tensor de fibra o una combinación espejo-obturador.

6. Dispositivo óptico según la reivindicación 5, en el que el por lo menos un espejo móvil comprende por lo menos un espejo que puede desplazarse a lo largo de una trayectoria de luz o un espejo giratorio en combinación con por lo menos tres espejos que definen fases diferentes del interferómetro.

7. Dispositivo óptico según la reivindicación 5, en el que el modulador de fase del interferómetro (40) comprende un modulador electroóptico que está dispuesto para permitir diversas pasadas de la luz.

8. Dispositivo óptico según la reivindicación 5, en el que el modulador de fase del interferómetro (40) comprende por lo menos dos combinaciones espejo-obturador.

9. Dispositivo óptico según por lo menos una de las reivindicaciones anteriores, en el que el dispositivo demodulador (30) comprende por lo menos uno de los siguientes dispositivos: un mezclador equilibrado, un multiplicador analógico, un amplificador sincronizado, una tarjeta de adquisición de datos, un convertidor descendente digital o un circuito electrónico digital capaz de realizar la transformada rápida de Fourier.

10. Dispositivo óptico según por lo menos una de las reivindicaciones anteriores, que comprende además por lo menos una fuente de luz (50) para generar la luz de iluminación.

11. Dispositivo óptico según la reivindicación 10, en el que la por lo menos una fuente de luz (50) comprende un láser (51), un sincrotrón o una fuente de radiación térmica (52).

12. Dispositivo óptico según las reivindicaciones 10 u 11, en el que la por lo menos una fuente de luz (50) comprende además una fuente láser de ajuste.

13. Dispositivo óptico según por lo menos una de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un dispositivo sensor de la longitud de la trayectoria de la luz (60) para detectar por lo menos la longitud de trayectoria de la luz de referencia o la longitud de la trayectoria de la luz de señal.

14. Microscopio óptico de campo cercano (200), que comprende:

- una punta de sonda (2) que es capaz de ser sometida a oscilación mecánica a una frecuencia fundamental Ω cerca de la superficie de una muestra que se está investigando,
- por lo menos una fuente de luz (50) para generar luz de iluminación, y
- un dispositivo óptico (100) según por lo menos una de las reivindicaciones anteriores para determinar la luz de señal que es dispersada por la punta de la sonda (2).

15. Procedimiento para determinar por lo menos un componente de luz de señal característico de una interacción óptica de campo cercano de una sonda (1, 2) con un objeto (5) que se va a investigar, en el que la interacción de campo cercano se somete a una modulación fundamental a una frecuencia fundamental Ω , que comprende las etapas siguientes:

- iluminar la sonda con luz de iluminación para obtener luz de señal,
- superponer la luz de señal y la luz de referencia,
- detectar la luz de señal y la luz de referencia superpuestas para obtener las señales de salida del detector que comprenden los componentes de luz de señal, y
- determinar los componentes de luz de señal demodulando las señales de salida del detector,

comprendiendo la etapa siguiente:

- cambiar una fase del interferómetro con un modulador de fase del interferómetro (40), comprendiendo la fase del interferómetro la diferencia de fase óptica entre la luz de referencia y la luz de señal, en el que
- la sonda no se ilumina con la luz de referencia, y

caracterizado porque

- la etapa de detección comprende la demodulación de las señales de salida del detector en tres o más estados diferentes del interferómetro, que representan tres o más fases diferentes del interferómetro o dos fases diferentes del interferómetro con un estado en el que la trayectoria de luz de referencia (II) está bloqueada.

16. Procedimiento según la reivindicación 15, en el que la etapa de cambio de fase del interferómetro comprende un cambio continuo de fase del interferómetro.

17. Procedimiento según la reivindicación 15, en el que la fase del interferómetro se cambia continuamente de acuerdo con una función periódica que presenta una frecuencia de modulación del interferómetro M , y la etapa de demodulación comprende la demodulación de las señales del detector a una o más frecuencias iguales a la suma o la resta entre un múltiplo entero no cero n de la frecuencia fundamental Ω y un múltiplo entero de la frecuencia de modulación del interferómetro M .

18. Procedimiento según la reivindicación 17, en el que la fase del interferómetro se cambia continuamente de acuerdo con una función periódica constituida por lo menos por una función sinusoidal.

19. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que por lo menos la amplitud o la fase de la luz de señal se reconstruye a partir de por lo menos un múltiplo par y por lo menos un múltiplo impar de la frecuencia de modulación del interferómetro M para un múltiplo entero predeterminado de la frecuencia fundamental Ω .

20. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que el por lo menos un componente de luz de señal se reconstruye mediante las etapas siguientes:

- demodular la señal de salida del detector a un múltiplo de la frecuencia de modulación fundamental Ω ($n\Omega$) para la obtención de una señal intermedia, y subsiguientemente
- extraer las amplitudes a uno o más múltiplos enteros de la frecuencia de modulación del interferómetro M (mM) a partir de la señal intermedia.

21. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que el por lo menos un componente de luz de señal se reconstruye mediante las etapas siguientes:

- demodular la señal de salida del detector a uno o más múltiplos enteros de la frecuencia de modulación de referencia M (mM) para la obtención de una o más señales intermedias, y subsiguientemente
- extraer las amplitudes a un múltiplo de la frecuencia de modulación fundamental Ω ($n\Omega$) a partir de una o más de dichas señales intermedias.

22. Procedimiento según la reivindicación 17, en el que el múltiplo entero n se selecciona para cumplir $|n| \geq 2$.

23. Procedimiento según por lo menos una de las reivindicaciones 15 a 22, en el que la etapa de detección comprende el registro de los interferogramas de la luz de señal y de referencia superpuestas a uno o más múltiplos enteros no cero de la frecuencia fundamental Ω , y la etapa de determinación de por lo menos uno de los componentes de luz de señal comprende un análisis espectral de los interferogramas.

24. Procedimiento según por lo menos una de las reivindicaciones 15 a 23, en el que la luz de iluminación comprende una pluralidad de longitudes de onda diferentes.

25. Procedimiento según la reivindicación 23 ó 24, que comprende además la etapa de modulación de intensidad de una fuente de luz de iluminación a una frecuencia de modulación L, y la etapa de demodulación de las señales de salida del detector comprende el registro de los interferogramas a una o más frecuencias iguales a la suma o la resta entre un múltiplo entero no cero de la frecuencia fundamental Ω y la frecuencia de modulación de intensidad L.

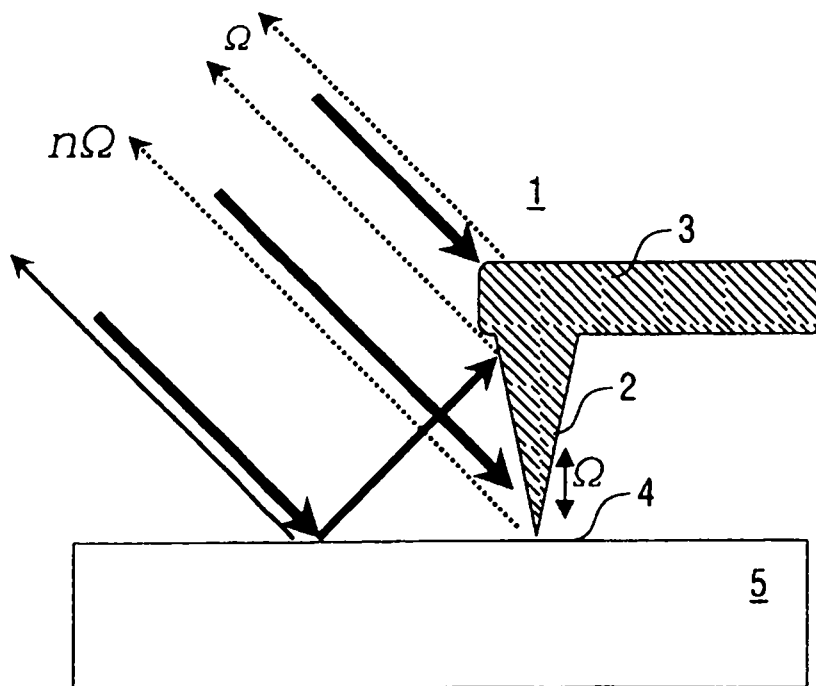
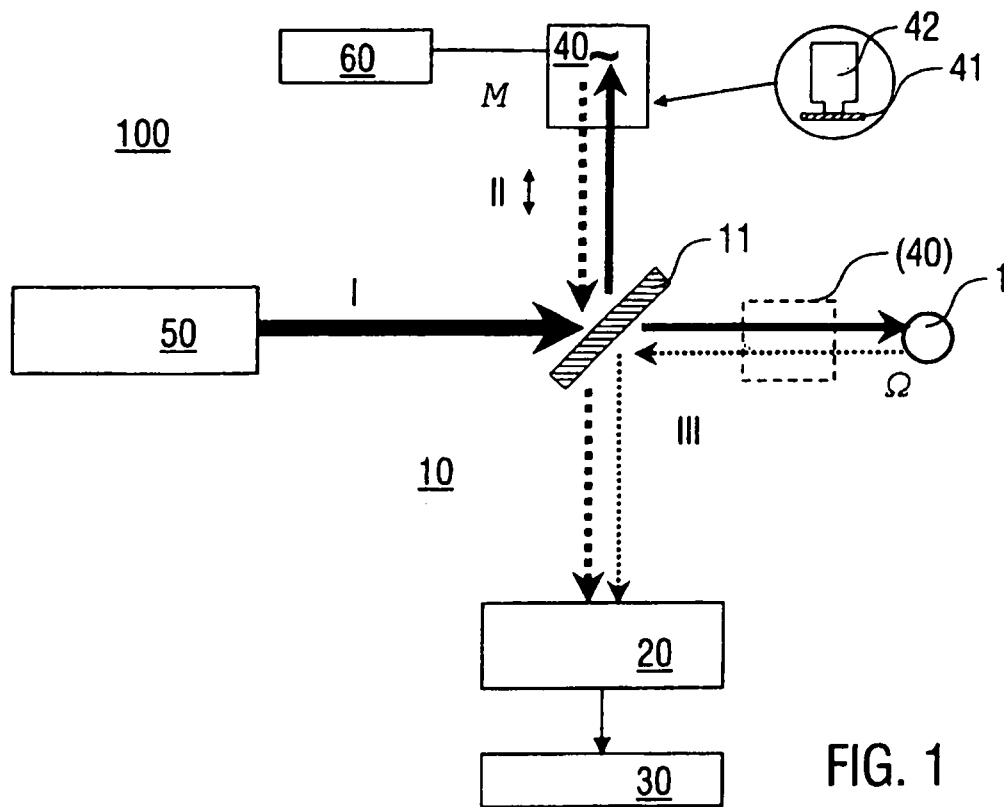
26. Procedimiento según por lo menos una de las reivindicaciones 15 a 25, en el que la etapa de cambio de la fase del interferómetro comprende un cambio gradual de fase de luz de iluminación, la etapa de detección comprende el registro de la salida del detector con tres o más fases del interferómetro a una frecuencia armónica predeterminada $n\Omega$, y la etapa de determinación de los componentes de la señal comprende la resolución de un sistema de ecuaciones que comprende una pluralidad de representaciones de las señales registradas.

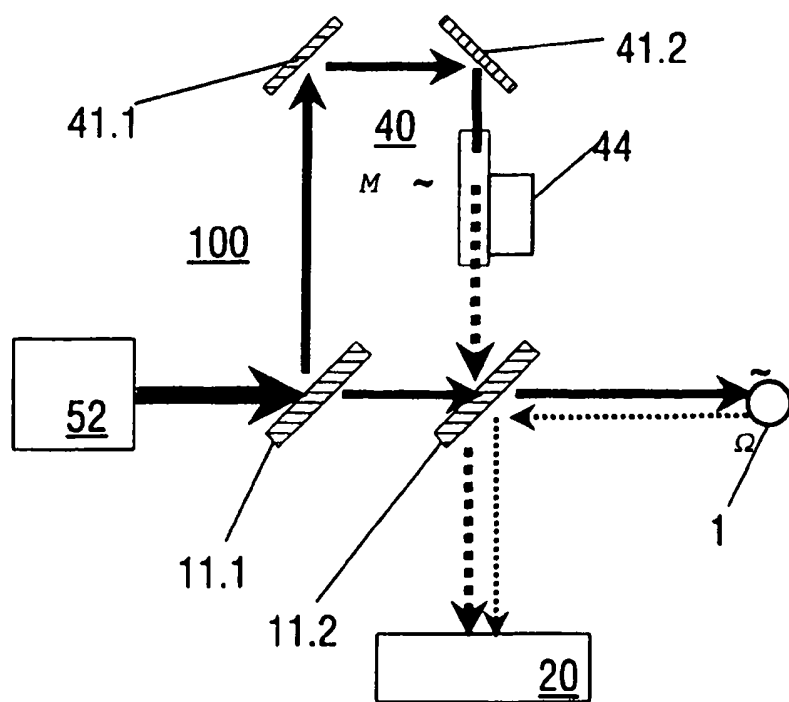
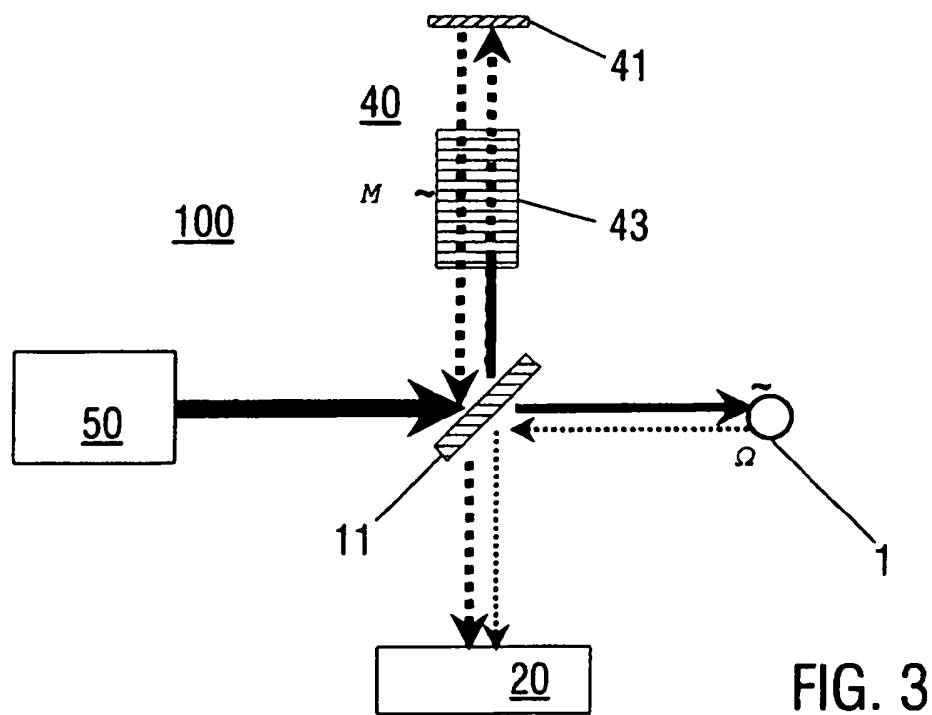
27. Procedimiento según por lo menos una de las reivindicaciones 15 a 26, que comprende además la etapa de detectar por lo menos la longitud de la trayectoria de la luz de referencia o la longitud de la trayectoria de la luz de señal con un dispositivo sensor de la trayectoria de luz (60) o con un haz láser de ajuste.

28. Procedimiento para determinar por lo menos un componente de luz de señal característico de una interacción óptica de campo cercano de una sonda (1, 2) con un objeto (5) que se va a investigar, en el que el procedimiento según por lo menos una de las reivindicaciones 17 a 27 se aplica simultáneamente para una pluralidad de múltiplos enteros predeterminados diferentes n.

29. Procedimiento para utilizar un dispositivo óptico (100) o un procedimiento según por lo menos una de las reivindicaciones anteriores para:

- microscopia de campo cercano,
- recuperación óptica de los datos almacenados, o
- lectura de los conjuntos de sensores.





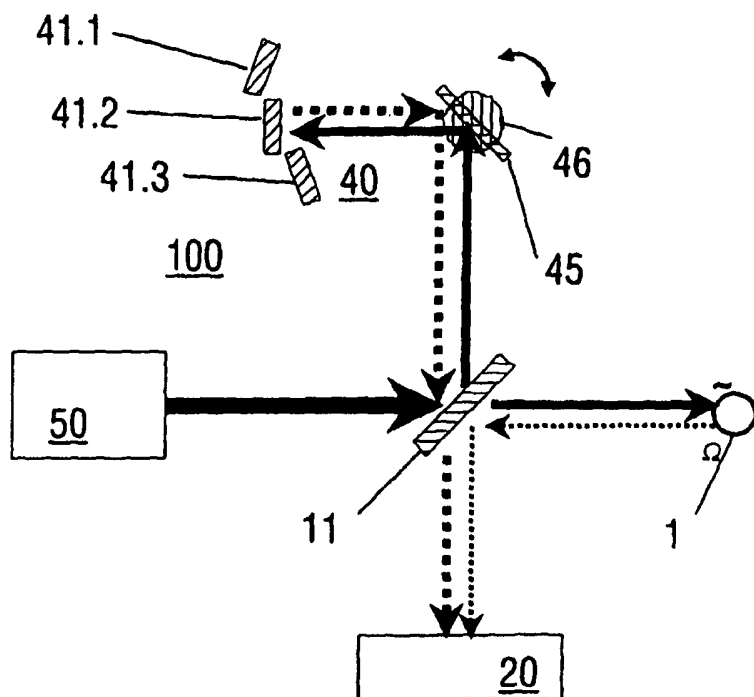


FIG. 5

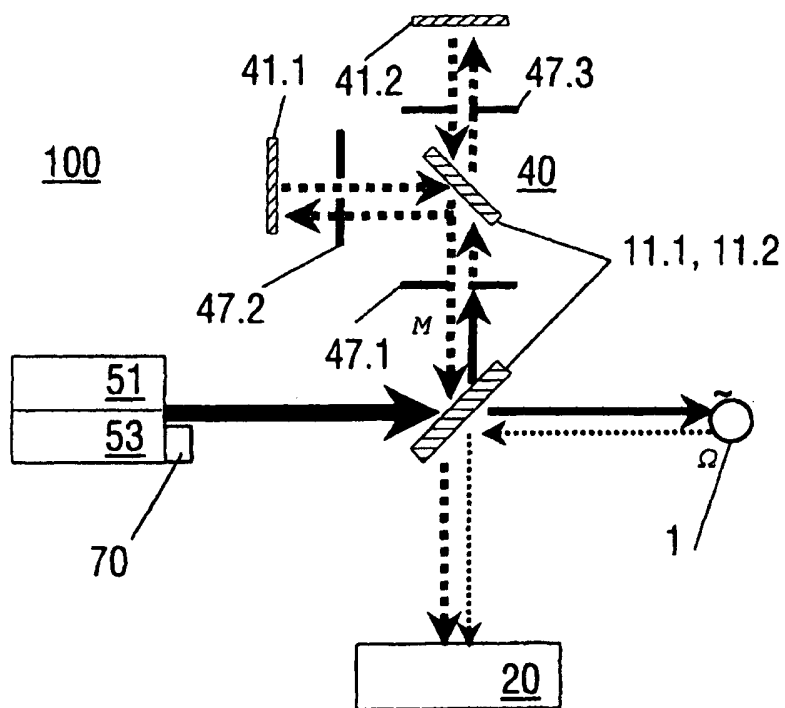


FIG. 6

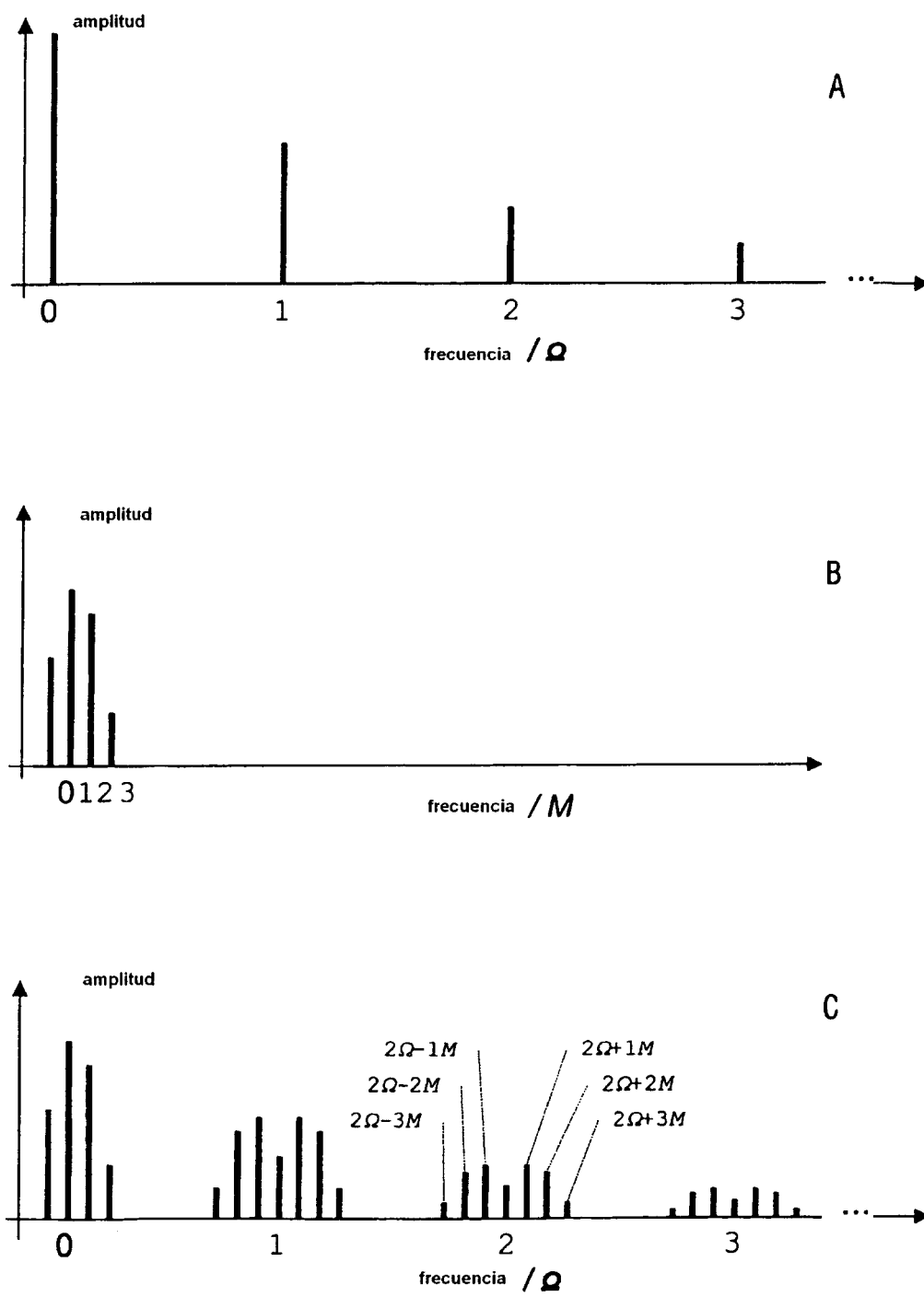
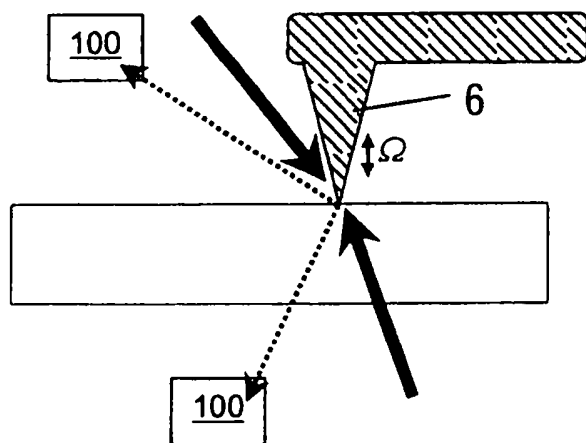
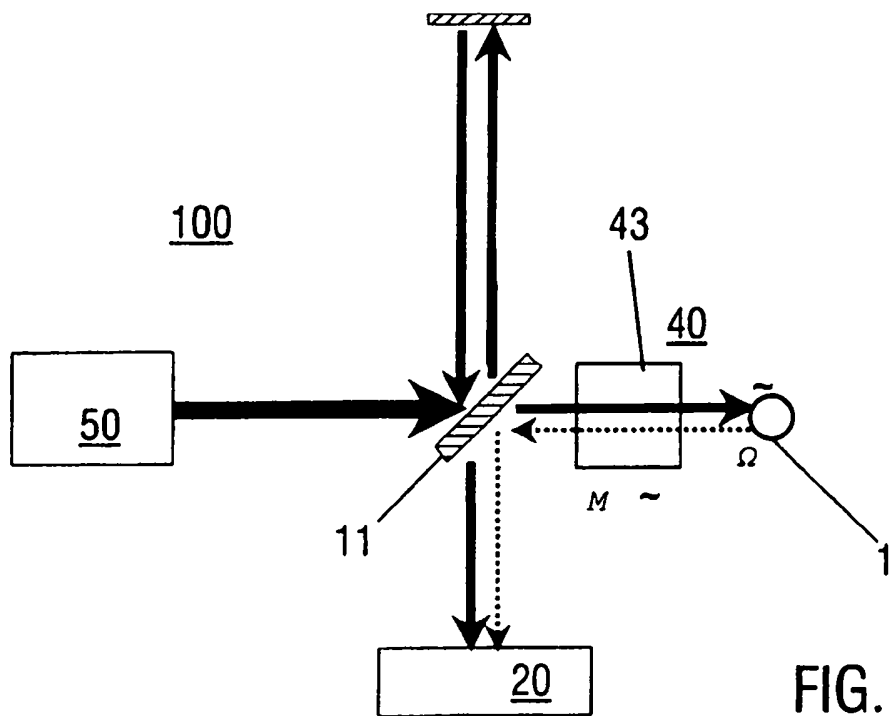


FIG. 7



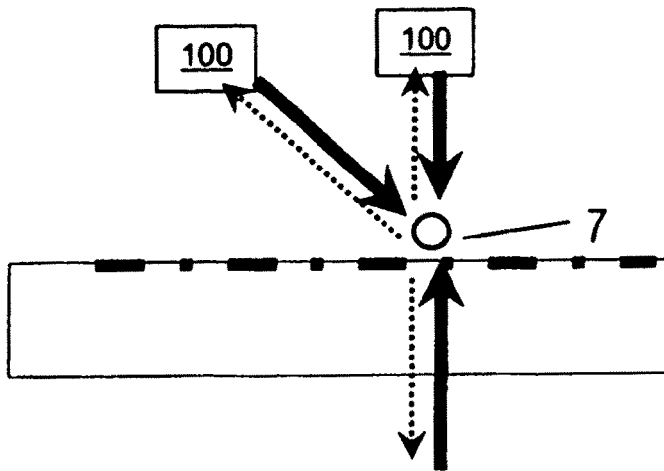


FIG. 10

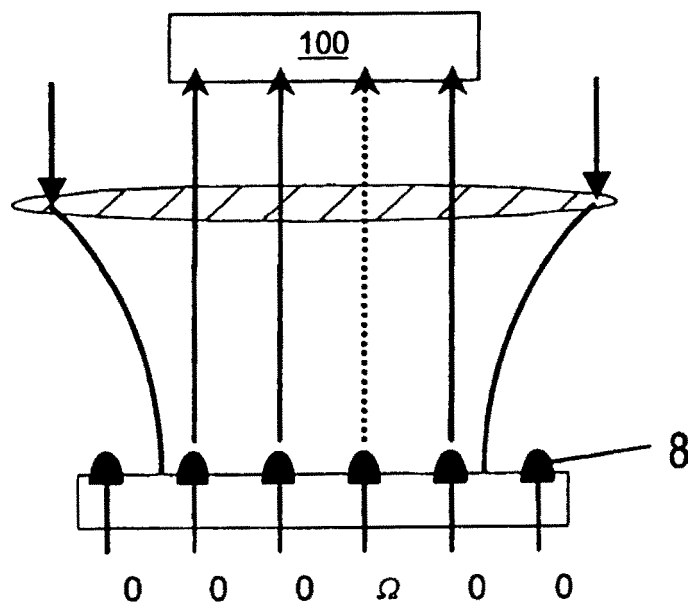


FIG. 11