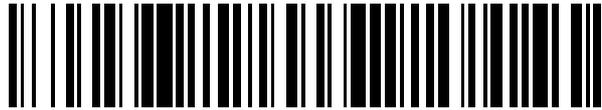


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 749 378**

51 Int. Cl.:

G01B 9/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.05.2006 PCT/US2006/019350**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.11.2006 WO06125131**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.05.2006 E 06760145 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.08.2019 EP 1883781**

54 Título: **Análisis de señales de interferometría de baja coherencia para estructuras de película delgada**

30 Prioridad:

19.05.2005 US 682742 P

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

20.03.2020

73 Titular/es:

**ZYGO CORPORATION (100.0%)
21 Laurel Brook Road
Middlefield, CT 06455-0448, US**

72 Inventor/es:

DE GROOT, PETER

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 749 378 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

Análisis de señales de interferometría de baja coherencia para estructuras de película delgada

Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

5 En virtud del U.S.C. 35 § 119(e), la presente solicitud reivindica prioridad a la solicitud de patente provisional de EE.UU. N.º 60/682.742, presentada el 19 de mayo de 2005 y titulada "METHOD AND SYSTEM FOR ANALYZING LOW-COHERENCE INTERFEROMETRY SIGNALS FOR SURFACE TOPOGRAPHY MEASUREMENT OVER THIN FILM STRUCTURES".

Antecedentes

10 La invención se refiere a la utilización de la interferometría de exploración para medir la topografía superficial y/u otras características de objetos que tienen estructuras superficiales complejas, tales como película(s) delgada(s), estructuras discretas de materiales disímiles, o estructuras discretas que se infraresuelvan mediante la resolución óptica de un microscopio de interferencia. Dichas mediciones son relevantes para la caracterización de componentes de pantallas de panel plano, la metrología de las obleas de semiconductores y el análisis in situ de películas delgadas y materiales disímiles.

15 Las técnicas interferométricas comúnmente se utilizan para medir el perfil de una superficie de un objeto. Para ello, un interferómetro combina un frente de onda de medición reflejado desde la superficie de interés con un frente de onda de referencia reflejado desde una superficie de referencia para producir un interferograma. Las franjas en el interferograma son indicativas de variaciones espaciales entre la superficie de interés y la superficie de referencia.

20 Un interferómetro de exploración escanea la diferencia de longitud de la trayectoria óptica (OPD) entre las patas de referencia y de medición del interferómetro en un rango comparable, o mayor que, la longitud de coherencia de los frentes de onda de interferencia, para producir una señal de interferometría de exploración para cada píxel de la cámara utilizada para medir el interferograma. Se puede producir una longitud de coherencia limitada (o "baja"), por ejemplo, utilizando una fuente de luz de banda ancha (por ejemplo, una fuente de luz blanca), lo que se denomina interferometría de luz blanca de exploración (SWLI). Una señal típica de interferometría de luz blanca de exploración (SWLI) son unas pocas franjas situadas cerca de la posición de diferencia de trayectoria óptica (OPD) cero. La señal se caracteriza normalmente por una modulación portadora sinusoidal (las "franjas") con una envolvente de contraste de franja en forma de campana. La idea convencional que subyace en la metrología SWLI es hacer uso de la ubicación de las franjas para medir los perfiles superficiales. Las señales de interferometría de baja coherencia también se pueden producir con una luz de banda estrecha que ilumine un objeto con un amplio rango de ángulos.

30 Las técnicas para procesar señales de interferometría de baja coherencia incluyen dos tendencias principales. El primer enfoque consiste en localizar el pico o el centro de la envolvente, suponiendo que esta posición se corresponde con la diferencia de trayectoria óptica (OPD) cero de un interferómetro de dos haces para la que un haz se refleja desde la superficie del objeto. El segundo enfoque consiste en transformar la señal en el dominio de frecuencia y calcular la velocidad de cambio de fase con la longitud de onda, suponiendo que una inclinación, en esencia, lineal es directamente proporcional a la posición del objeto. Este último enfoque se denomina como análisis de dominio de frecuencia (FDA). En presencia de estructuras de película delgada, el análisis puede ser más complicado.

40 Las solicitudes de patente de EE.UU. publicadas como US-2005-0078318-A1 bajo el título "METHODS AND SYSTEMS FOR INTERFEROMETRIC ANALYSIS OF SURFACES AND RELATED APPLICATIONS" y US-2005-0078319-A1 bajo el título "SURFACE PROFILING USING AN INTERFERENCE PATTERN MATCHING TEMPLATE", ambas de Peter J. de Groot, describen técnicas adicionales para el análisis de señales de interferometría de baja coherencia procedentes de una muestra de película delgada. Una de las técnicas descritas identifica la parte de una señal de interferometría de luz blanca de exploración (SWLI) correspondiente al perfil de la superficie superior de una estructura de película delgada. Para una película suficientemente delgada, las señales individuales correspondientes a las interfaces superior e inferior de la película son inseparables, en el sentido de que el contraste de las franjas sólo tiene un pico; sin embargo, podemos argumentar por fundamentos físicos que las primeras pocas franjas de la derecha se relacionan más estrechamente con el perfil de la superficie superior. Esta técnica identifica el borde de ataque en forma de trompeta de la señal y lo atribuye al perfil de la superficie superior. Una técnica adicional descrita en estas solicitudes publicadas describe una forma de situar el borde de ataque u otro segmento de una señal utilizando una técnica de correspondencia de patrones, un ejemplo de la cual se denomina análisis de plantilla de correlación (CTA). Ambas de dichas solicitudes publicadas se admiten comúnmente con las presentes solicitudes.

Resumen

55 Las formas de realización preferidas descritas en la presente memoria presentan un procedimiento de mínimos cuadrados (LSQ) por ventana deslizante para analizar señales de interferometría de baja coherencia. El procedimiento se puede utilizar para identificar con precisión partes de las señales de interés de la interferometría de baja coherencia. El procedimiento realiza un ajuste de forma secuencial a través de la exploración por medio de una optimización de mínimos cuadrados. La primera etapa es crear una función de ajuste en función de un modelo de la

señal que esperamos ver, y luego utilizar uno o más parámetros variables, incluyendo un valor de fase de interferencia, para optimizar el ajuste a la señal real en cada posición de exploración. El resultado final deseado es situar la señal, y la fase, en el punto donde la posición de exploración para el ajuste LSQ es la más satisfactoria.

5 De manera más general, resumimos a continuación algunos aspectos generales, características y ventajas de la invención.

10 En general, en un aspecto, la invención presenta un método que incluye: proporcionar una señal de interferometría de exploración de baja coherencia producida por un interferómetro de exploración para una primera ubicación de un objeto de prueba que tiene una película delgada; proporcionar una función modelo de la señal de interferometría de exploración producida por el interferómetro de exploración, en donde la función modelo se parametriza mediante uno o más valores de los parámetros; ajustar la función modelo a la señal de interferometría de exploración para cada uno de una serie de desplazamientos en la posición de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración mediante la variación de los valores de los parámetros; comprendiendo el ajuste la determinación de un primer desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un primer ajuste óptimo y la determinación de un segundo desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un segundo ajuste óptimo; y determinar un espesor de la película delgada en función de los desplazamientos primero y segundo en la posición de exploración para la primera ubicación.

20 En general, en otro aspecto, la invención presenta un sistema que incluye: un interferómetro de exploración de baja coherencia configurado para proporcionar una señal de interferometría de exploración para cada una de las múltiples ubicaciones de un objeto de prueba; y un procesador electrónico configurado para analizar las señales de interferometría. El procesador electrónico se configura para: i) ajustar una función modelo de la señal de interferometría de exploración producida por el interferómetro de exploración a la señal de interferometría de exploración correspondiente a cada una de las una o más de las ubicaciones del objeto de prueba, para cada uno de una serie de desplazamientos en la posición de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración respectiva, variando uno o más valores de los parámetros que parametrizan la función modelo; comprendiendo el ajuste determinar un primer desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un primer ajuste óptimo y determinar un segundo desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un segundo ajuste óptimo; y ii) determinar un espesor de la película delgada en función de los desplazamientos primero y segundo en la posición de exploración para la primera ubicación.

La invención se define por las reivindicaciones adjuntas. Los siguientes ejemplos son útiles para comprender la invención, incluso si algunos ejemplos incluyen características que no se reivindican.

35 Las técnicas descritas en la presente memoria se pueden aplicar a cualquiera de las siguientes solicitudes: i) películas delgadas simples (por ejemplo, el parámetro variable de interés puede ser el espesor de la película, el índice de refracción de la película, el índice de refracción del sustrato o alguna combinación de los mismos); ii) películas delgadas multicapa; iii) bordes afilados y características superficiales que difracten o generen de otro modo efectos de interferencia complejos; iv) rugosidad superficial no resuelta; v) características superficiales no resueltas, por ejemplo, una ranura de anchura de la sublongitud de onda en una superficie que de otra manera sería lisa, y v) materiales disímiles.

40 A menos que se defina lo contrario, todos los términos técnicos y científicos utilizados en la presente memoria tienen el mismo significado que se entiende comúnmente por un experto en la técnica a la que pertenece esta invención. Todas las patentes, solicitudes de patentes y referencias mencionadas en la presente memoria se incorporan en la presente memoria por referencia; en caso de conflicto, prevalecen las definiciones en la presente memoria.

45 Otras características, objetivos, y ventajas de la invención serán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada.

Breve descripción de los dibujos

La FIG. 1 es un diagrama esquemático de un sistema de interferometría.

La FIG. 2 es un gráfico simulado de la señal de intensidad de un sistema SWLI típico.

La FIG. 3 es un diagrama esquemático de un objeto de medición que presenta múltiples interfaces junto con una señal SWLI correspondiente.

50 La FIG. 4 es un gráfico de una señal SWLI simulada que presenta contribuciones distinguibles de dos interfaces.

La FIG. 5 representa una señal de modelo truncada que se ajusta a una señal SWLI simulada.

La FIG. 6 representa una señal de modelo utilizada en una técnica de correspondencia de patrones LSQ por ventana deslizante y una señal SWLI simulada.

La FIG. 7 es un diagrama de flujo que muestra el flujo de una forma de realización de ejemplo de la técnica de correspondencia de patrones LSQ por ventana deslizante.

La FIG. 8a es un diagrama esquemático que muestra una vista de arriba hacia abajo de un objeto 30 que incluye un sustrato, por ejemplo, una oblea, 32 y una capa superpuesta, por ejemplo, la capa de fotoresist 34.

5 La FIG. 8b es un diagrama esquemático que muestra un lado en la vista del objeto 30.

La FIG. 9a es un diagrama esquemático que muestra un dispositivo 500 de ejemplo de la estructura de la película resultante de la deposición de un dieléctrico 504 sobre características de cobre 502 depositadas sobre un sustrato 501.

10 La FIG. 9b es un diagrama esquemático del dispositivo 500 mostrado en la FIG. 9a después de someterse a un procesamiento químico mecánico.

La FIG. 10a es un diagrama esquemático de una estructura 1050 adecuada para utilizar en el procesamiento de bultos de soldadura.

La FIG. 10b es un diagrama esquemático de la estructura 1050 de la FIG. 10a después de que haya ocurrido el procesamiento de bultos de soldadura.

15 La FIG. 11 es un diagrama esquemático de una matriz LCD pasiva 450 que se compone de varias capas.

La FIG. 12 es un gráfico de una señal de medición SWLI simulada 1201.

La FIG. 13a es un gráfico del espectro de caracterización del sistema obtenido a partir de la señal de medición 1201.

La FIG. 13b es un gráfico de los datos de fase para el espectro de caracterización del sistema obtenidos a partir de la señal de medición 1201.

20 La FIG. 14 es un gráfico de los datos de caracterización del sistema promediados obtenidos a partir de la señal de medición 1201.

La FIG. 15a es un gráfico de la señal modelo para utilizar en un análisis de correspondencia de patrones LSQ por ventana deslizante de la señal de medición 1201.

25 La FIG. 15b es un gráfico de la señal modelo enmarcada para utilizar en un análisis de correspondencia de patrones LSQ por ventana deslizante de la señal de medición 1201.

La FIG. 16a es un gráfico que muestra el resultado del análisis de correspondencia de patrones LSQ de la señal de medición 1201.

La FIG. 16b es un gráfico de la función de mérito obtenida a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ de la señal de medición 1201.

30 La FIG. 17a es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de resolución normal obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ de la señal de medición 1201.

La FIG. 17b es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de alta resolución obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ de la señal de medición 1201.

La FIG. 18 es un gráfico de los datos de caracterización del sistema promediados del ejemplo 2.

35 La FIG. 19a es un gráfico de la señal modelo asimétrica para utilizar en el análisis de correspondencia de patrones LSQ por ventana deslizante descrito en el ejemplo 2.

La FIG. 19b es un gráfico de la señal modelo asimétrica enmarcada para utilizar en el análisis de correspondencia de patrones LSQ por ventana deslizante descrito en el ejemplo 2.

40 La FIG. 20a es un gráfico que muestra el resultado del análisis de correspondencia de patrones LSQ descrito en el ejemplo 2.

La FIG. 20b es un gráfico de la función de mérito obtenida a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ descrito en el ejemplo 2.

La FIG. 21a es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de resolución normal obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ descrito en el ejemplo 2.

45 La FIG. 21b es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de alta resolución obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ descrito en el ejemplo 2.

La FIG. 22a es un gráfico que muestra el resultado del análisis de correspondencia de patrones LSQ descrito en el ejemplo 3.

La FIG. 22b es un gráfico de la función de mérito obtenida a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ descrito en el ejemplo 3.

5 La FIG. 23a es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de resolución normal obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ descrito en el ejemplo 3.

La FIG. 23b es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de alta resolución obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ descrito en el ejemplo 3.

10 La FIG. 24 es un diagrama esquemático del objeto de medición 2400 compuesto de una capa delgada de 600 nm de fotoresist conformal 2401 sobre un par de almohadillas cuadradas de aluminio 2402 sobre un sustrato de silicio 2403.

La FIG. 24a es un gráfico que muestra el resultado del análisis de correspondencia de patrones LSQ de la señal SWLI de un punto en el objeto de medición 2400.

15 La FIG. 25a es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de resolución normal obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ de la señal SWLI del objeto de medición 2600.

La FIG. 25b es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de alta resolución obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ de una señal SWLI del objeto de medición 2400.

20 La FIG. 26 es un diagrama esquemático del objeto de medición 2600 que presenta una zanja de 10 micras de ancho y 440 nm de profundidad 2601 en un espesor nominal de 940 nm de dióxido de silicio 2602 sobre un sustrato de silicio 2603.

La FIG. 27 es un gráfico que muestra el resultado del análisis de correspondencia de patrones LSQ de la señal SWLI de un punto en el objeto de medición 2600.

La FIG. 28a es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de resolución normal obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ de la señal SWLI del objeto de medición 2600.

25 La FIG. 28b es un gráfico del perfil de la altura de la superficie superior de alta resolución obtenido a partir del análisis de correspondencia de patrones LSQ de la señal SWLI del objeto de medición 2600.

Los mismos números de referencia en diferentes dibujos se refieren a elementos comunes.

Descripción detallada

30 A continuación, se describen formas de realización del procedimiento de correspondencia de patrones LSQ por ventana deslizante para analizar señales de interferometría de baja coherencia. Se describe un sistema de interferometría de exploración de ejemplo utilizado para adquirir una señal interferente. Se describen las técnicas generales de correspondencia de patrones. Se presentan los principios básicos de la forma de realización de un análisis LSQ por ventana deslizante, seguido de un ejemplo de un análisis LSQ por ventana deslizante que utiliza muestreo discreto. Se describen aplicaciones de ejemplo del procedimiento de correspondencia de patrones. Finalmente se presentan varios experimentos de ejemplo simulados y reales de formas de realización del procedimiento de correspondencia de patrones.

Adquisición de la señal interferente

40 Con referencia a la FIG. 1, un sistema de medición de ejemplo 50 para la obtención de señales interferentes incluye un interferómetro 51 y un sistema de control computarizado automático 52. El sistema de medición 50 se puede utilizar para determinar una o más propiedades espaciales de un objeto de medición 53. En cualquier caso, el sistema 50 se puede utilizar para determinar una o más propiedades espaciales de objetos que incluyan una o más capas que cubran al menos parcialmente, por ejemplo, un sustrato en contacto con una capa de fotoresist o soldadura.

45 Una fuente 54, que puede ser una fuente de banda ancha espectral, tal como una lámpara de luz blanca, o incluir varias longitudes de onda diferentes, por ejemplo, procedentes de varios diodos emisores de luz, ilumina una pantalla difusora 55. Como alternativa o en combinación con una fuente de banda ancha, la fuente 54 puede incluir una fuente de banda estrecha o cuasi-monocromática, que normalmente tiene una alta apertura numérica. Una señal interferente de baja coherencia se puede obtener utilizando una fuente monocromática en combinación con una apertura numérica alta, por ejemplo, la longitud de coherencia puede ser del orden de unas pocas micras o menos.

50 El objetivo 56 transmite un haz colimado a un elemento de separación del haz 57 que transmite una primera parte del haz a un objetivo 62 y al objeto de referencia 58. En algunas formas de realización, el objeto de referencia 58 es ópticamente plano e incluye sólo una única superficie reflectante. Por ejemplo, el objeto de referencia 58 puede ser

un espejo de referencia. En algunas formas de realización, el objeto de referencia 58 presenta una topografía superficial tridimensional y/o incluye más de una capa diferente que refleja la luz. En la siguiente descripción, se asume sin limitación que el objeto de referencia 58 es un espejo de referencia que incluye una única superficie reflectante.

5 El elemento de separación del haz 57 dirige una segunda parte del haz hacia un objetivo 60, que enfoca el haz en el objeto de medición 53. El elemento de separación del haz 57 combina la luz reflejada desde el espejo de referencia 58 y desde el objeto de medición 53. La luz combinada se dirige a un objetivo 61, que enfoca la luz combinada a un detector 59. La luz reflejada desde el objeto de medición 53 y desde el espejo 58 interfieren en el detector 59, lo que produce señales del detector indicativas de la intensidad del haz resultante.

10 El detector 59 normalmente incluye varios elementos detectores, por ejemplo, píxeles, dispuestos en al menos una y más generalmente dos dimensiones. En la siguiente descripción, se asume sin limitación que el detector 59 incluye una matriz bidimensional de elementos detectores, tal como un CCD, que incluye varios píxeles. En la forma de realización mostrada, el objetivo 60 y el objetivo 61 enfocan la luz reflejada desde el objeto de medición 53 en el detector 59 de modo que cada elemento detector del detector 59 corresponde a un punto respectivo, por ejemplo,
15 una pequeña región o ubicación del objeto de medición 53. Además, el objetivo 62 coopera con el objetivo 61 para captar la imagen del objeto de referencia 58 en el detector 59. Por lo tanto, se puede observar un patrón de interferencia en el detector 59, incluso para iluminación extendida (es decir, espacialmente incoherente).

El objeto de medición 53 incluye más de una superficie reflectante, tal como un sustrato que incluye una o más capas al menos parcialmente transmisivas ópticamente. Una primera superficie reflectante se define por la interfaz
20 entre la capa ópticamente transmisiva más externa y la atmósfera circundante (o vacío). Las superficies reflectantes adicionales se definen por cada interfaz entre capas o entre capas y el sustrato. La luz reflejada desde el objeto de medición 53 incluye una contribución, por ejemplo, un haz diferente, reflejado desde cada superficie o interfaz reflectante. Dado que cada superficie o interfaz reflectante suele estar separada a lo largo del eje de propagación del haz, cada haz diferente genera un patrón de interferencia diferente cuando se combina con la luz reflejada desde el
25 objeto de medición 53. El patrón de interferencia observado por el detector 59 incluye la suma de los patrones de interferencia generados por cada haz diferente reflejado desde el objeto de medición.

El Sistema 50 se configura normalmente para crear una diferencia de longitud de la trayectoria óptica (OPD) entre la luz dirigida y reflejada desde el objeto de referencia 58 y la luz dirigida y reflejada desde el objeto de medición 53. En algunas formas de realización, el objeto de medición 53 se puede desplazar o accionar mediante un transductor
30 electromecánico 63, tal como un transductor piezoeléctrico (PZT), y la electrónica de accionamiento 64 asociada controlada por ordenador 52 de modo que se efectúen exploraciones precisas a lo largo de una dirección que varía la OPD del interferómetro 51. En algunas formas de realización, el sistema 50 se configura para modificar la OPD moviendo el objeto de referencia 58. En algunas formas de realización, el sistema 50 se configura para modificar la OPD en una cantidad al menos tan grande como las variaciones de altura en una topografía del objeto. En algunas
35 formas de realización, la longitud de la trayectoria óptica varía aproximadamente una distancia al menos tan grande como una longitud de coherencia del interferómetro, por ejemplo, en el orden de unas pocas micras.

El Sistema 50 puede adquirir varias señales del detector a medida que se modifica la OPD, tal como escaneando una posición del objeto de medición 53. Las señales del detector adquiridas de este modo se pueden almacenar en formato digital como una matriz de señales interferentes, una señal interferente adquirida de cada píxel del detector
40 59, representando cada señal interferente la variación de intensidad como una función de la OPD para una ubicación diferente del objeto de medición 53. Por ejemplo, si el detector 59 incluye una matriz de 128 x 128 píxeles y si 64 imágenes se almacenan durante una exploración, entonces habrá aproximadamente 16.000 señales interferentes cada 64 puntos de datos en longitud. En las formas de realización que utilizan una fuente de banda ancha 54, las señales interferentes se pueden denominar señales interferentes de interferometría de luz blanca de exploración
45 (SWLI), más generalmente como señales interferentes de exploración de longitud de baja coherencia.

Una vez adquiridos los datos, el ordenador 52 puede procesar 67 la señal interferente de acuerdo con, por ejemplo, las técnicas de correspondencia de patrones descritas a continuación y los datos de salida indicativos de una topografía superficial del objeto de medición.

La forma de realización mostrada en la FIG. 1 muestra esquemáticamente un interferómetro del tipo Michelson, en el que el divisor de haz desvía la luz de referencia del eje óptico de la luz de prueba (por ejemplo, el divisor de haz se puede orientar a 45 grados de la luz de entrada para que la luz de prueba y la de referencia se desplacen en ángulo recto entre sí). En otras formas de realización, el sistema de interferometría 50 puede ser de otro tipo de interferómetros. Por ejemplo, el sistema de interferometría puede incluir un microscopio configurado para utilizar con uno o más objetivos de interferencia diferentes, proporcionando cada uno una ampliación diferente. Cada objetivo de
55 interferencia incluye un divisor de haz para separar la luz de entrada en luz de medición y luz de referencia.

Ejemplos de diferentes objetivos de interferencia incluyen un objetivo de interferencia tipo Michelson y tipo Mirau, que incluye una lente objetivo para dirigir la luz de entrada hacia (y recoger la luz de) las superficies de prueba y de referencia, seguido por un divisor de haz para separar la luz de entrada en la luz de prueba y de referencia. En el objetivo de tipo Michelson, el divisor de haz se orienta con un ángulo agudo respecto al eje óptico definido por la lente objetivo (por ejemplo, a 45 grados) para dirigir la luz de referencia a un espejo de referencia lateral. En el objetivo tipo Mirau, el divisor de haz se orienta para dirigir la luz de referencia de vuelta a lo largo del eje óptico hacia
60

un pequeño espejo de referencia en la trayectoria de la luz de entrada. El espejo de referencia puede ser pequeño, y por lo tanto no afectar sustancialmente a la luz de entrada, debido al enfoque mediante la lente objetivo). En otra forma de realización adicional, el objetivo de interferencia puede ser del tipo Linnik, en cuyo caso el divisor de haz se coloca antes de la lente objetivo para la superficie de prueba (con respecto a la luz de entrada) y dirige la luz de prueba y de referencia a lo largo de diferentes trayectorias. Se utiliza una lente objetivo diferente para enfocar la luz de referencia al objetivo de referencia. En otras palabras, el divisor de haz separa la luz de entrada en la luz de prueba y de referencia, y separa las lentes objetivo para luego enfocar la luz de prueba y de referencia a las respectivas superficies de prueba y de referencia. Lo ideal es que las dos lentes objetivo se adapten entre sí, de modo que la luz de prueba y de referencia tengan aberraciones y trayectorias ópticas similares.

5 También son posibles configuraciones adicionales de interferómetros. Por ejemplo, el sistema se puede configurar para recoger la luz de prueba que se transmite a través de la muestra de prueba y a continuación posteriormente se combina con la luz de referencia. Para dichas formas de realización, por ejemplo, el sistema puede implementar un interferómetro Mach-Zehnder con objetivos de microscopio duales en cada pata.

15 La fuente de luz del interferómetro puede ser cualquiera de: una fuente incandescente, tal como una bombilla halógena o una lámpara de halogenuros metálicos, con o sin filtros de paso de banda espectral; un diodo láser de banda ancha; un diodo emisor de luz; una combinación de varias fuentes de luz del mismo tipo o de tipos diferentes; una lámpara de arco; cualquier fuente de la región espectral visible; cualquier fuente de la región espectral del infrarrojo, en particular para la visualización de superficies ásperas y la aplicación del perfil de fase; y cualquier fuente de la región espectral del ultravioleta, en particular, para mejorar la resolución lateral. Para aplicaciones de banda ancha, la fuente tiene preferiblemente un ancho de banda espectral neto superior al 5% de la longitud de onda media, o más preferiblemente superior al 10%, 20%, 30% o incluso al 50% de la longitud de onda media. Para aplicaciones sintonizables de banda estrecha, el rango de sintonización es preferiblemente amplio (por ejemplo, mayor de 50 nm, mayor de 100 nm, o incluso mayor de 200 nm, para luz visible) para proporcionar información de reflectividad sobre un amplio rango de longitudes de onda, mientras que el ancho espectral en cualquier ajuste en particular es preferiblemente estrecho, para optimizar la resolución, por ejemplo, tan pequeño como 10 nm, 2 nm o 1 nm. La fuente también puede incluir uno o más elementos difusores para aumentar la extensión espacial de la luz de entrada emitida desde la fuente.

25 Además, las diversas etapas de translación en el sistema, tales como la etapa de translación 150, pueden ser: accionadas por cualquier dispositivo piezoeléctrico, un motor paso a paso y una bobina de voz; implementadas optomecánicamente u optoelectrónicamente en lugar de por pura translación (por ejemplo, utilizando cualquiera de cristales líquidos, efectos electro-ópticos, fibras tensadas y placas de ondas giratorias) para introducir una variación de la longitud de la trayectoria óptica; cualquier actuador con una montura de flexión y cualquier actuador con una etapa mecánica, por ejemplo, rodamientos de rodillos o rodamientos neumáticos.

30 El detector electrónico puede ser cualquier tipo de detector para medir un patrón de interferencia óptica con resolución espacial, tal como un detector CCD o CMOS multielemento.

35 Con referencia a la FIG. 2, una señal interferente 150 de baja coherencia simulada incluye varios valores de intensidad del detector obtenidos a partir de un único punto de un objeto, por ejemplo, un punto de una oblea de silicio con una única interfaz reflectante. Los valores de intensidad se representan en función de la diferencia de longitud de la trayectoria óptica (OPD) entre la luz reflejada desde el punto del objeto y la luz reflejada desde un objeto de referencia. La señal interferente 150 es una señal de interferometría de luz blanca de exploración (SWLI) de baja coherencia obtenida mediante la exploración de la OPD, por ejemplo, moviendo una óptica y/o el objeto para variar la trayectoria óptica recorrida por la luz que se refleja desde el objeto o la luz de referencia. Un interferómetro puede, alternativamente o en combinación, variar la OPD detectando una distribución espacial de la luz reflejada desde el objeto y la luz de referencia, con la OPD que varía en función de la posición espacial en un detector.

40 En la FIG. 2, los valores de intensidad se representan en función de la OPD (aquí posición de exploración) y se traza un patrón de interferencia 151 que tiene varias franjas 152, que decaen a cada lado de un máximo de acuerdo con una envolvente de baja coherencia 154. En ausencia de una envolvente de baja coherencia, las franjas de un patrón de interferencia suelen tener amplitudes similares en un amplio rango de diferencias de trayectoria óptica. La envolvente 154 en sí misma no aparece expresamente en dichas señales interferentes, pero se muestra para su descripción. La ubicación del patrón de interferencia a lo largo del eje OPD se relaciona generalmente con una posición de OPD cero, por ejemplo, una posición de exploración o una posición espacial correspondiente a OPD cero entre la luz reflejada desde el punto del objeto y desde un objeto de referencia. La posición cero de la exploración OPD es una función de la topografía del objeto, que describe la altura relativa de cada punto del objeto, y la orientación y posición del propio objeto, que influyen en la posición de cada punto del objeto con respecto al interferómetro. La señal interferente también incluye contribuciones instrumentales relacionadas con, por ejemplo, la óptica del interferómetro, por ejemplo, la apertura numérica (NA) de la óptica, la velocidad de adquisición de datos, la velocidad de exploración, las longitudes de onda de la luz utilizadas para adquirir la señal interferente, la sensibilidad del detector en función de la longitud de onda y otras propiedades instrumentales.

45 El ancho de la envolvente de coherencia 154 que modula las amplitudes de las franjas 152 corresponde generalmente a la longitud de coherencia de la luz detectada. Entre los factores que determinan la longitud de coherencia se encuentran los fenómenos de coherencia temporal relacionados con, por ejemplo, el ancho de banda

espectral de la fuente, y los fenómenos de coherencia espacial relacionados con, por ejemplo, el rango de los ángulos de incidencia de la luz que ilumina el objeto. Normalmente, la longitud de coherencia disminuye cuando: a) aumenta el ancho de banda espectral de la fuente y/o b) aumenta el rango de los ángulos de incidencia. Dependiendo de la configuración de un interferómetro utilizado para adquirir los datos, uno u otro de estos fenómenos de coherencia puede dominar o ambos pueden contribuir sustancialmente a la longitud de coherencia global. La longitud de coherencia de un interferómetro se puede determinar obteniendo una señal interferente de un objeto que tenga una única superficie reflectante, por ejemplo, no una estructura de película delgada. La longitud de coherencia corresponde al máximo de la mitad de la anchura total de la envolvente que modula el patrón de interferencia observado.

Según se puede ver en la FIG. 2, la señal interferente 150 resulta de la detección de luz que tiene un rango de diferencias de trayectoria óptica que varía en más del ancho de la envolvente de coherencia y, por lo tanto, en más de la longitud de coherencia de la luz detectada. En general, una señal interferente de baja coherencia puede resultar de la obtención de franjas de interferencia moduladas por la envolvente de coherencia de la luz detectada. Por ejemplo, el patrón de interferencia se puede obtener sobre una OPD para la cual la amplitud de las franjas de interferencia observadas difiera en al menos un 20%, al menos un 30% o al menos un 50% entre sí.

Un interferómetro de baja coherencia se puede configurar para detectar una señal interferente en un rango de OPD que sea comparable o superior a la longitud de coherencia del interferómetro. Por ejemplo, el rango de OPD detectado puede ser al menos 2 veces mayor o al menos 3 veces mayor que la longitud de coherencia. En algunas formas de realización, la longitud de coherencia de la luz detectada está en el orden de las variaciones de altura de las características del objeto, por ejemplo, en el orden de un par de micras o menos pero más que una longitud de onda nominal de la luz detectada.

En general, las contribuciones relacionadas con el instrumento a la señal interferente, por ejemplo, a la forma y fase de los patrones de interferencia, tienden a variar lentamente con la topografía y la posición del objeto. Por otra parte, los patrones de interferencia se desplazan a lo largo del eje de la posición de exploración para las señales interferentes obtenidas a partir de puntos del objeto con diferentes propiedades espaciales, por ejemplo, diferentes alturas relativas o diferentes posiciones relativas con respecto al interferómetro. Por consiguiente, los patrones de interferencia obtenidos a partir de diferentes puntos del objeto pueden tener formas similares, pero se desplazan a lo largo del eje de la posición de exploración aproximadamente una cantidad relacionada con las propiedades espaciales de cada punto.

Con referencia a la FIG. 3, una señal interferente 190 se adquiere a partir de un objeto 191, que incluye un sustrato 192 y una capa superpuesta, por ejemplo, una película delgada 193. El sustrato y la película definen una interfaz entre las mismas. Una superficie externa de la película 195 define una interfaz entre el objeto y su entorno, por ejemplo, el aire, otro gas o el vacío. Las interfaces se definen generalmente mediante un cambio en el índice de refracción entre las partes de un objeto.

La señal interferente 190 incluye un primer patrón de interferencia 196 que resulta de la interfaz 194 y un segundo patrón de interferencia 197 que resulta de la interfaz 195. Los patrones de interferencia primero y segundo 196, 197 se superponen. Por ejemplo, los máximos de los patrones de interferencia 196, 197 se separan por una OPD inferior a la longitud de coherencia del interferómetro y los patrones 196, 197 no se separan por una región de intensidad cero. Los métodos existentes para determinar las propiedades espaciales de un objeto con interfaces que producen patrones de interferencia superpuestos pueden producir resultados erróneos porque los patrones de interferencia superpuestos se distorsionan entre sí.

Con referencia a la FIG. 4, para muestras de película suficientemente gruesas, hay dos o más señales fácilmente identificables 301, 302 que corresponden a las interfaces entre materiales diferentes en la pila de películas.

Correspondencia de patrones

Un enfoque para el análisis de las señales de interferometría de una muestra de película delgada es la observación de que múltiples reflexiones generan múltiples señales, que a menudo se pueden separar entre sí. Se pueden emplear técnicas de correspondencia de patrones que operen directamente con las señales interferentes generadas mediante la exploración de la diferencia de trayectoria óptica. Para estructuras de superficie complejas de composición desconocida y películas relativamente gruesas (por ejemplo, >1 micra), este enfoque es flexible. En la medida en que la correspondencia de patrones en el dominio de la exploración se puede extender a películas más delgadas, este enfoque generalmente no requiere un conocimiento previo de los materiales de película delgada.

La idea que subyace a la correspondencia de patrones en el dominio de la exploración es la siguiente. Se genera una señal experimental variando la OPD mediante una exploración mecánica del interferómetro en la dirección de la coordenada de altura, según se muestra en la FIG. 2. Se espera ver franjas de interferencia registradas como una señal sinusoidal posiblemente modulada en contraste de franja por los efectos de coherencia. Normalmente, los algoritmos SWLI buscan identificar una característica tal como el pico de la envolvente o el centroide de la señal, seguido de la fase de las franjas subyacentes para una mayor resolución.

Un enfoque de correspondencia de patrones supone que todos los píxeles de un conjunto de datos SWLI contienen el mismo patrón de interferencia básico y localizado, que sólo se reescala y desplaza en posición para cada píxel, y

que tal vez se duplica cuando hay películas según se muestra en las FIG. 3 y 4. Un enfoque para la correspondencia de patrones es, por ejemplo, modelar la señal con una función matemática simple, tal como una portadora de longitud de onda única modulada en contraste por una envolvente gaussiana. Se puede utilizar una simple correlación punto-producto para comparar este modelo con los datos obtenidos experimentalmente para localizar la posición de mejor correspondencia.

El análisis de plantillas de correlación (CTA) va una etapa más allá y genera el núcleo de correlación empíricamente a partir de la señal real del instrumento. Como resultado, la señal modelo no necesita ser la función analítica idealizada habitual, tal como un coseno modulado gaussiano, puede tener cualquier envolvente arbitraria o un componente de fase no lineal en las franjas portadoras. Si la parte de prueba es, por ejemplo, una superficie sólida, la señal modelo se deriva del propio conjunto de datos experimentales, utilizando un promedio de desplazamiento invariante para extraer una única plantilla de patrón de interferencia representativa de las principales características de la señal observadas repetidamente en todos los píxeles. Por lo tanto, la señal modelo se adapta bien al instrumento, incorporando todas las características específicas del interferómetro, incluyendo la dispersión de fase, la longitud de onda media, la distribución espectral, etc.

El CTA también puede ir más allá de la simple correlación punto-producto y emplea herramientas matemáticas para identificar características arbitrarias de la señal que pueden ser de mayor interés que el pico, el centroide u otra característica elemental de la envolvente de coherencia. Por ejemplo, en una técnica descrita en la publicación de solicitud de patente de EE.UU. US-2005-0078318-A1, la señal modelo se trunca de modo que la función de mérito identifique el borde de ataque de la señal, en lugar de su pico.

Con referencia a la FIG. 5, se muestra una ilustración de esta técnica mediante simulación. Una señal SWLI 551 se obtiene a partir de un objeto de muestra compuesto de 950 nm de SiO₂ en Si. Para simplificar, la simulación supone que el sistema interferométrico tiene una apertura numérica, en esencia, igual a cero, de modo que sólo se deben considerar las ondas planas. El sistema opera con una longitud de onda central de 570nm con un ancho de banda de 120nm. La exploración se realiza desde el interior de la pieza hacia el exterior, por lo que las mayores alturas de superficie se encuentran a la derecha.

Según se muestra en la FIG. 5, la señal interferente 551 contiene dos patrones de interferencia 552, 553 debido, por ejemplo, a un efecto de película delgada como el descrito anteriormente. Los patrones son inseparables, en el sentido de que el contraste de las franjas sólo tiene un pico 554; sin embargo, se puede argumentar en fundamentos físicos que las primeras pocas franjas de la derecha se relacionan más estrechamente con el perfil de la superficie superior. Por lo tanto, la señal modelo truncada 555 sólo incluye por lo tanto la parte derecha en forma de trompeta de una señal de superficie única. Esta técnica, en adelante en la presente memoria denominada como una técnica de modelo truncado, utiliza este modelo truncado 555 para identificar el borde de ataque 556 encontrando la mejor posición de correspondencia, incluso aunque la señal alcance un pico más a la izquierda.

Existen varias otras técnicas disponibles para la correspondencia de patrones. Algunas técnicas de CTA utilizan una correlación normalizada en el dominio de la frecuencia equivalente al coeficiente de correlación producto-momento de Pearson r conocido de las estadísticas. Confiando extensivamente en las Transformadas de Fourier de grandes conjuntos de datos, este dominio de frecuencia puede ser demasiado lento para algunas aplicaciones de producción. Para acelerar el análisis, las correlaciones de Pearson se pueden reemplazar con productos punto estándar en el dominio del tiempo o en el dominio de la exploración, según se describe en la Publicación de la solicitud de patente de EE.UU. US-2005-0078318-A1, descrita anteriormente. El algoritmo resultante se denomina en la presente memoria como una técnica basada en producto punto. Con esta simplificación, la ubicación de la señal se define efectivamente por la intensidad de pico de la señal dentro del rango de frecuencias definido por la señal modelo. La técnica basada en producto punto retiene la idea de una señal modelo generada directamente desde el instrumento; pero de alguna manera ha perdido la capacidad de implementar efectivamente la técnica de modelo truncado. Esto es una solución intermedia razonable para las películas más gruesas que se encuentran, por ejemplo, en pantallas de panel plano, y en las que el tiempo es escaso.

En lo que sigue, el solicitante describe aún más técnicas para extraer información precisa sobre el objeto de prueba en presencia de películas incluso más delgadas. Las técnicas reintroducen la técnica de modelo truncado descrita anteriormente utilizando una técnica de mínimos cuadrados (LSQ) por ventana deslizante considerablemente más potente que proporciona mejores resultados que las técnicas r de Pearson, a la vez que conserva las ventajas de velocidad de las técnicas basadas en el producto punto.

LSQ por ventana deslizante: principio básico

Con referencia a la FIG. 6, se registra una señal interferente 601 para varias posiciones de exploración del interferómetro. La primera etapa es crear una función de ajuste 602 en función de un modelo de la señal esperada que incluya uno o más parámetros variables, por ejemplo, un valor de fase de interferencia. En una posición de exploración determinada, los parámetros se modifican para optimizar el ajuste a la señal real en cada posición de exploración por medio de, por ejemplo, una optimización de mínimos cuadrados (aunque se pueden utilizar otras técnicas de optimización). A continuación, la técnica de correspondencia de patrones realiza un ajuste secuencial a través de la exploración por medio de una optimización de mínimos cuadrados (aunque se pueden utilizar otras técnicas de optimización). La posición de exploración para la que el ajuste LSQ es más satisfactorio sitúa la señal, y la fase en este punto es el resultado final deseado.

Una función de ajuste f adecuada que comprende un modelo de señal oscilante compleja \tilde{T} con compensación independiente m^{dc} , magnitud media m y fase local φ en K^0 :

$$f(y, \hat{\xi}) = m^{dc}(y) + m(y) \operatorname{Re} \left\{ \tilde{T}(\hat{\xi}) \exp[i\varphi(y)] \right\} \quad (1)$$

5 Para simplificar, se utiliza una única coordenada lateral y para mostrar una dependencia de la ubicación dentro de la imagen, aunque para una captación de imagen completa deberían ser por supuesto dos coordenadas x, y . Según se muestra en la FIG. 6, existe una posición de exploración *global* ζ para la señal experimental I y una coordenada de exploración *local* $\hat{\xi}$ asociada con la función de ajuste f de la Ecuación (1). La virgulilla sobre \tilde{T} denota una cantidad compleja, potencialmente con una fase y magnitud no lineales y dependientes de la exploración. Un ejemplo ilustrativo de un modelo de señal complejo con una fase lineal que pasa a través de cero en $\hat{\xi}=0$ es

$$10 \quad \tilde{T}(\hat{\xi}) = C(\hat{\xi}) \exp(-i\hat{\xi}K^0) \quad (2)$$

donde C es la envolvente de coherencia.

A continuación, se ajusta la ubicación de esta señal y (m^{dc} , m , φ) se permite que varíen con la posición de exploración ζ , según sea necesario para optimizar el ajuste de f a la señal I

$$f(y, \hat{\xi}, \zeta) = m^{dc}(y, \zeta) + m(y, \zeta) \operatorname{Re} \left\{ \tilde{T}(\hat{\xi}) \exp[i\varphi(y, \zeta)] \right\}. \quad (3)$$

15 La técnica LSQ por ventana deslizante resuelve los parámetros (m^{dc} , m , φ) utilizando la optimización de ajuste dentro de una ventana cónica w en cada una de las posiciones de exploración ζ . Por lo tanto, el objetivo es minimizar la siguiente función de diferencia cuadrada en cada ζ

$$\chi^2(y, \zeta) = \int w(\hat{\xi}) \left[I(y, \zeta + \hat{\xi}) - f(y, \zeta, \hat{\xi}) \right]^2 d\hat{\xi}. \quad (4)$$

20 La ventana w pone límites de rango en la exploración local $\hat{\xi}$ y nos permite concentrarnos en determinadas características de la señal con pocos cálculos. Según se conoce en la técnica, una ventana cónica tal como un coseno elevado perdona más las imperfecciones en la exploración ζ que una simple ventana cuadrada. Véase, por ejemplo, P. de Groot, "Derivation of phase shift algorithms for interferometry using the concept of a data sampling window", Appl. Opt. 34(22) 4723-4730 (1995), incorporada por referencia en la presente memoria.

25 Se espera que la solución más adecuada para la intensidad de la señal m en cada posición de exploración ζ suba y baje de acuerdo con la envolvente de la señal experimental I . La posición de exploración que minimiza la diferencia cuadrada χ^2 mientras la intensidad de la señal m es fuerte sitúa la señal. Se deduce la fase θ en K^0 y $\zeta=0$ a partir del valor de fase φ para esta posición de mejor ajuste y , por lo tanto, la medición de la altura de la superficie de alta resolución. La compensación m^{dc} es el valor de compensación DC local, útil para generar y analizar la imagen sin franjas del objeto.

30 Muestreo discreto

En un instrumento interferométrico de exploración real, la señal interferente se graba normalmente mediante una cámara CCD configurada para capturar múltiples imágenes, o fotogramas de cámara, cada uno en una posición de exploración diferente. Por lo tanto, la intensidad de la señal del interferómetro I se muestrea normalmente en un total de Y posiciones de campo discreto y indexadas por el número de píxeles $j = 0 \dots (Y-1)$ y ζ posiciones de exploración discretas indexadas por el número de fotogramas de cámara $z = 0 \dots (N-1)$. El incremento de exploración es ζ^{step} y por lo tanto una exploración centrada en cero es

$$\zeta_z = \left[z - (N-1)/2 \right] \zeta^{step} \quad (5)$$

La función diferencia cuadrada se traduce a la equivalente discreta

$$\chi_{j,z}^2 = \sum_{\hat{z}=0}^{\hat{N}-1} \left(I_{j,z+\hat{z}-\hat{z}} - f_{j,z,\hat{z}} \right)^2 w_{z,\hat{z}} \quad (6)$$

40 donde \hat{N} es el número de posiciones de exploración local dentro de la ventana w , la función de ajuste f es

$$f_{j,z,\hat{z}} = m_{j,z}^{dc} + m_{j,z} \operatorname{Re} \left[\tilde{T}_{\hat{z}} \exp(i\varphi_{j,z}) \right] \quad (7)$$

y $\hat{\Delta}$ es una compensación entera que centra la ventana w con respecto al índice de exploración z , necesario porque muchos lenguajes de programación requieren índices vectoriales tales como z , \hat{z} para empezar desde cero. El ancho de la ventana \hat{N} se establece equilibrando el rendimiento y la velocidad; una mayor robustez y repetibilidad implica un \hat{N} más grande, a costa de más cálculos. Un compromiso típico es $\hat{N} = 21$ para una adquisición de datos de cuatro fotografías por franja.

5

Para una función de ajuste simétrico, la compensación $\hat{\Delta}$ es

$$\hat{\Delta} = \text{round} \left[\left(\hat{N} - 1 \right) / 2 \right] \quad (8)$$

y la posición de exploración local es

$$\hat{\zeta}_z = \left[\hat{z} - \left(\hat{N} - 1 \right) / 2 \right] \zeta^{\text{step}} \quad (9)$$

10 Para una técnica LSQ truncada, la función de ajuste puede ser asimétrica, incorporando sólo la mitad derecha de la señal modelo:

$$\hat{\Delta} = 0 \quad (10)$$

$$\hat{\zeta}_z = \hat{z} \zeta^{\text{step}} \quad (11)$$

15 Otros segmentos de señal o patrones derivados son posibles según sea necesario para aislar partes específicas de la señal experimental.

Modelo de señal

Hay (al menos) dos maneras de crear la señal modelo compleja \tilde{T} : a partir de la teoría o de la experimentación.

20 En algunos casos, es suficiente describir la señal teóricamente como una portadora que evoluciona a una frecuencia K^0 modulada por una envolvente de contraste de franja C , como en la Ecuación (2). Una señal modelo compleja de muestreo discreto que sigue este enfoque es

$$\tilde{T}_z = C_z \exp \left[-i \hat{\zeta}_z K^0 \right] \quad (12)$$

25 Un término de fase negativa en la Ecuación (12) preserva la convención tradicional de signos, para la cual una exploración creciente corresponde a alejar el objetivo de interferencia de la pieza. Esto se contrapone a un aumento de la altura de la superficie, que por definición corresponde a un cambio positivo de fase. La Ecuación (12) es un modelo idealizado razonable de la clase de señal que esperamos ver en un sistema SWLI.

Un segundo enfoque es utilizar datos empíricos adquiridos del propio instrumento, en cuyo caso utilizamos una Transformada discreta de Fourier (DFT) inversa en función de la representación en el dominio de frecuencia $\overline{q}^{\text{sys}}$ de una señal típica:

$$\tilde{T}_z = \sum_{v=vmin}^{vmax} \overline{q}_v^{\text{sys}} \exp \left[-i \hat{\zeta}_z K_v \right] \quad (13)$$

30 El $\overline{q}^{\text{sys}}$ es el promedio sobre muchos píxeles de datos de la representación en el dominio de la frecuencia de una señal interferente típica para el instrumento. Téngase en cuenta que esta señal modelo puede tener una envolvente complicada y una fase no lineal, dependiendo de las características reales del instrumento. Las variables $vmin$, $vmax$ definen el rango de frecuencias positivas K (por ejemplo, en unidades de radianes de fase por micra de exploración) dentro de una *región de interés* (ROI) en el espectro que deseamos incluir en la reconstrucción de una señal modelo

35 \tilde{T} . La ROI se puede definir, por ejemplo, como el doble de la anchura total al 30% del máximo del pico del espectro en el dominio de la frecuencia. También son posibles otras definiciones para la ROI. Por lo general, la ROI se selecciona para capturar la parte significativa de la dispersión de frecuencia, mientras que principalmente las partes menos significativas son las que incluyen el ruido.

40 El problema de cálculo de la caracterización del sistema $\overline{q}^{\text{sys}}$ a partir de los datos de intensidad dominio-exploración I^{sys} , se describe en detalle a continuación.

Soluciones LSQ

La función diferencia cuadrada discreta de la Ecuación (6) después de sustituir la Ecuación (3) es

$$\chi_{j,z}^2 = \sum_{\hat{z}=0}^{\hat{N}-1} \left\{ I_{j,z+\hat{z}-\hat{\Delta}} - m_{j,z}^{dc} - m_{j,z} \operatorname{Re} \left[\tilde{T}_{\hat{z}} \exp(i\varphi_{j,z}) \right] \right\}^2 w_{\hat{z}}, \quad (14)$$

que se puede ampliar a

$$\chi_{j,z}^2 = \sum_{\hat{z}=0}^{\hat{N}-1} \left[I_{j,z+\hat{z}-\hat{\Delta}} - m_{j,z}^{dc} - m_{j,z} \cos(\varphi_{j,z}) \operatorname{Re}(\tilde{T}_{\hat{z}}) + m_{j,z} \sin(\varphi_{j,z}) \operatorname{Im}(\tilde{T}_{\hat{z}}) \right]^2 w_{\hat{z}}. \quad (15)$$

que define un vector de solución

$$\Lambda_{j,z} = \begin{bmatrix} m_{j,z}^{dc} \\ m_{j,z} \cos(\varphi_{j,z}) \\ m_{j,z} \sin(\varphi_{j,z}) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

La Ecuación (15) se puede reescribir como

$$\chi_{j,z}^2 = \sum_{\hat{z}=0}^{\hat{N}-1} \left[I_{j,z+\hat{z}-\hat{\Delta}} - (\Lambda_{j,z})_0 - (\Lambda_{j,z})_1 \operatorname{Re}(\tilde{T}_{\hat{z}}) + (\Lambda_{j,z})_2 \operatorname{Im}(\tilde{T}_{\hat{z}}) \right]^2 w_{\hat{z}}. \quad (17)$$

10 El mínimo para la función diferencia cuadrada χ^2 se puede encontrar ajustando a cero las derivadas parciales

$$\frac{\partial \chi_{j,z}^2}{\partial (\Lambda_{j,z})_0} = -2 \sum [] w_{\hat{z}} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \chi_{j,z}^2}{\partial (\Lambda_{j,z})_1} = -2 \sum [] \operatorname{Re}(\tilde{T}_{\hat{z}}) w_{\hat{z}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \chi_{j,z}^2}{\partial (\Lambda_{j,z})_2} = 2 \sum [] \operatorname{Im}(\tilde{T}_{\hat{z}}) w_{\hat{z}}, \quad (20)$$

15 donde [] se refiere al término entre paréntesis de la Ecuación (15) y las sumas se entienden sobre el índice de exploración local $\hat{z} = 0 \dots \hat{N}-1$. El ajuste de las ecuaciones (18)-(20) a cero da como resultado la siguiente ecuación matricial para el vector solución Λ :

$$\Lambda_{j,z} = \Xi_z D_{j,z} \quad (21)$$

para

$$\Xi_z = \begin{bmatrix} \sum w_{\hat{z}} & \sum w_{\hat{z}} \operatorname{Re}(\tilde{T}_{\hat{z}}) & -\sum w_{\hat{z}} \operatorname{Im}(\tilde{T}_{\hat{z}}) \\ \sum w_{\hat{z}} \operatorname{Re}(\tilde{T}_{\hat{z}}) & \sum w_{\hat{z}} \operatorname{Re}(\tilde{T}_{\hat{z}})^2 & -\sum w_{\hat{z}} \operatorname{Re}(\tilde{T}_{\hat{z}}) \operatorname{Im}(\tilde{T}_{\hat{z}}) \\ \sum w_{\hat{z}} \operatorname{Im}(\tilde{T}_{\hat{z}}) & \sum w_{\hat{z}} \operatorname{Re}(\tilde{T}_{\hat{z}}) \operatorname{Im}(\tilde{T}_{\hat{z}}) & -\sum w_{\hat{z}} \operatorname{Im}(\tilde{T}_{\hat{z}})^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (22)$$

$$D_{j,z} = \begin{bmatrix} \sum w_{\hat{z}} I_{j,z+\hat{z}-\hat{\Delta}} \\ \sum w_{\hat{z}} \operatorname{Re}(\tilde{T}_{\hat{z}}) I_{j,z+\hat{z}-\hat{\Delta}} \\ \sum w_{\hat{z}} \operatorname{Im}(\tilde{T}_{\hat{z}}) I_{j,z+\hat{z}-\hat{\Delta}} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

20

Los resultados de los parámetros clave son:

$$m_{j,z}^{dc} = (\Lambda_{j,z})_0 \quad (24)$$

$$m_{j,z}^2 = (\Lambda_{j,z})_1^2 + (\Lambda_{j,z})_2^2 \quad (25)$$

$$\varphi_{j,z}^{\pi} = \arctan \left[(\Lambda_{j,z})_2 / (\Lambda_{j,z})_1 \right] \quad (26)$$

5 donde la triple prima indica que hay una triple incertidumbre en el orden de las franjas de la fase local φ , primero a través de la posición de exploración, a continuación de píxel a píxel, y finalmente en general con respecto a una posición de inicio absoluta para la exploración.

Función de mérito

10 La definición de la función de mérito para localizar la señal y determinar el perfil de superficie es flexible y depende en gran medida de lo que se intente conseguir. Por ejemplo, si es suficientemente cierto que la intensidad de la señal de pico corresponde a la ubicación de la señal, entonces la función de mérito más simple es directamente proporcional a la magnitud de la señal m que se deriva a la Ecuación (25). Defina esta función de mérito de intensidad de señal de pico como

$$\Pi_{j,z}^m = m_{j,z}^2 \cdot (27)$$

15 Esta es una función de mérito de propósito general perfectamente razonable, similar a la función de mérito del producto punto utilizada en técnicas basadas en el producto punto tal como las que se describen en la solicitud de patente de EE.UU. US-2005-0078319-A1.

20 El proceso de ajuste utilizado en las técnicas LSQ por ventana deslizante proporciona información adicional útil para localizar la señal y determinar los perfiles de superficie o de espesor. La señal se puede situar, para cada posición de exploración, comparando la función modelo con la señal de medición. La ubicación de la señal se puede identificar encontrando la posición de exploración correspondiente a un ajuste óptimo de la función modelo a la señal de medición. En los casos en los que el objeto de medición está formado por múltiples superficies, la señal de cada superficie se puede situar identificando múltiples posiciones de exploración, cada una correspondiendo a un ajuste óptimo.

25 Por ejemplo, se puede definir una función de mérito que depende de la similitud entre la señal del interferómetro y la señal modelo obtenida en cada posición de exploración global después de que se haya realizado el ajuste de mínimos cuadrados. Dichas funciones de mérito basadas en el ajuste pueden ser más efectivas para situar la señal y determinar el perfil de superficie que las funciones de mérito basadas en la simple magnitud, particularmente para aplicaciones que involucren objetos de medición con superficies con múltiples espacios próximos. El grado de similitud entre la señal del interferómetro y la función modelo se puede cuantificar de varias maneras, incluyendo, por ejemplo, la suma de las diferencias cuadradas entre los valores de intensidad de la señal del interferómetro y los valores de intensidad de la función modelo, o la suma del valor absoluto de las diferencias entre los valores de intensidad de la señal del interferómetro y los valores de intensidad de la función modelo.

30 Por ejemplo, se puede definir una función de mérito que dependa de la similitud entre la función modelo y la señal del interferómetro cuantificada por el inverso de la minimización de la función χ de la Ecuación (15) después de resolverla para los parámetros (m^{dc} , m , φ). Para asegurar que la magnitud de la señal m es todavía razonablemente fuerte en la posición seleccionada, la magnitud de la señal se incluye en la definición de una función de mérito de mejor ajuste.

$$\Pi_{j,z}^{\chi} = \frac{m_{j,z}^2}{1 + \chi_{j,z}^2} \cdot (28)$$

El 1 añadido a χ^2 en el denominador evita la división accidental por cero.

40 La mayor parte de una señal SWLI tiene valores de magnitud demasiado bajos para ser considerados en la función de mérito, por lo que es sensato aplicar un criterio *MinMod* en función de la magnitud m . Aquellas posiciones de exploración para las que $m < \text{MinMod}$ deberían tener el valor de la función de mérito correspondiente Π ajustado a cero.

45 Al igual que en los algoritmos de película delgada anteriores, existen varios modos de medición disponibles de acuerdo con la tarea que se esté llevando a cabo, con la lógica de búsqueda de picos asociada. Al determinar el perfil de la altura de la superficie superior de un objeto de prueba, se identifica el pico más a la derecha en la función de mérito a lo largo de la dirección de la exploración. Si se utiliza una función de mérito en función del ajuste, la ubicación de este pico es la posición de exploración correspondiente a un ajuste óptimo de la función modelo a la señal de medición. Al determinar el espesor de la película, se utilizan los dos picos más fuertes de la función de

mérito. Si se utiliza una función de mérito en función del ajuste, la ubicación de cada pico es una posición de exploración que corresponde a un ajuste óptimo de la función modelo a la señal de medición. Al determinar el espesor de la película delgada más alta en un objeto compuesto de múltiples películas, se identifican los dos primeros picos más a la derecha a lo largo de la dirección de exploración. A continuación, se presentan ejemplos de cálculos de la altura de superficie y del espesor de película.

Cálculo de la altura de superficie

El enfoque LSQ por ventana deslizante puede proporcionar tanto un modo de *resolución normal* como un modo de *alta resolución*. La resolución normal o LSQ-Norm se obtiene directamente de un resultado de búsqueda de pico de la función de mérito. El modo de alta resolución LSQ-High utiliza la fase de las franjas subyacentes en la ubicación de la señal identificada para refinar la medición de resolución normal, según se describe a continuación.

El pico (o secuencia de picos) se sitúa en el número entero de fotograma correspondiente al número de fotograma de la cámara que mejor se ajuste. Por el momento, supongamos que sólo hay un pico de interés y llamémoslo z^{best} . La interpolación sitúa la posición óptima de exploración z^{fine} en unidades continuas de fotogramas de cámara, por ejemplo, mediante ajuste cuadrático a la función de mérito en la vecindad de z^{best} . La posición de exploración correspondiente proporciona directamente la medición de altura LSQ-Norm:

$$h_j^\Theta = \zeta^{step} z_j^{fine} \quad (29)$$

donde el superíndice Θ indica que la medición de la altura h^Θ (a diferencia de la altura real h) se basa en un análisis de coherencia o contraste de franjas.

Para la medición de alta resolución, la fase se encuentra interpolando los valores de fase ϕ calculados a partir de la Ecuación (26). El resultado es el desfase

$$A_j'' = \left(\frac{\Phi_{j,z_j^{best}-1}'' + \Phi_{j,z_j^{best}+1}''}{2} \right) + \left(\frac{\Phi_{j,z_j^{best}-1}'' - \Phi_{j,z_j^{best}+1}''}{2} \right) (z_j^{fine} - z_j^{best}). \quad (30)$$

que define la fase en la posición del fotograma z^{fine} de mejor ajuste.

Se espera que el desfase A'' evolucione con la posición de exploración debido a la fase acumulada en K^0 . Para obtener el valor de fase θ en la posición de exploración cero, esta tendencia se elimina primero con

$$\theta_j'' = A_j'' + \Theta_j \quad (31)$$

donde Θ es el perfil de coherencia en unidades de fase a la frecuencia angular nominal K^0 :

$$\Theta_j = K^0 h_j^\Theta. \quad (32)$$

Sigue existiendo una incertidumbre del orden de franja entre los píxeles, que ahora se puede eliminar con un desfase aproximado conectado al campo α' y

$$\theta_j' = \theta_j'' - 2\pi \text{Round} \left[\frac{A_j'' - \alpha'}{2\pi} \right] \quad (33)$$

donde la función *Round* devuelve el entero más cercano a su argumento. El desfase aproximado más simple α' utiliza una técnica de promedio seno-coseno descrita en la solicitud de patente de EE.UU. publicada como US 2004-0027585 A1 titulada "PHASE GAP ANALYSIS FOR SCANNING INTERFEROMETRY", cuyos contenidos se incorporan en la presente memoria por referencia. Alternativamente, se puede utilizar la técnica descrita en, por ejemplo, "Determination of fringe order in white-light interference microscopy", Appl. Opt. 41(22) 4571 (2002). Finalmente, el perfil de la altura de la superficie viene dado por

$$h_j^\Theta = \theta_j' / K^0. \quad (34)$$

Espesor de película

La técnica LSQ por ventana deslizante proporciona la capacidad de medir el espesor de película utilizando una señal modelo simétrica. El procedimiento comienza con un fotograma de cámara de pico de mérito de segunda superficie z^{best2} y una posición interpolada z^{fine2} , además de un primer fotograma de cámara de pico de mérito de superficie z^{best1} y una posición interpolada z^{fine1} . Una cuantificación inicial del espesor de la película delgada es

$$L_j^\ominus = \frac{\zeta^{step}}{nc_\ominus} [z_j^{fine2} - z_j^{fine1}], \quad (35)$$

5 donde n es el índice de la película delgada y el factor c_\ominus es una corrección para el efecto geométrico de la iluminación oblicua, que debido a la refracción tiende a hacer que la película parezca más delgada de lo que realmente es. El factor de corrección c_\ominus se puede determinar teóricamente, experimentalmente o por la técnica de compromiso de una simulación. No se desvía significativamente de 1 a menos que la iluminación NA sea grande. Por esta razón, puede ser preferible utilizar topes de apertura en los objetivos de mayor aumento, que en cualquier caso mejoran la calidad de la señal para aplicaciones de espesor de película (no son necesarios para mediciones de solamente la superficie superior).

Una cuantificación de mayor resolución de la medición comienza con el desfase de la película delgada.

$$10 \quad A_j'^L = A_j^{n(2)} - A_j^{n(1)} \quad (36)$$

donde $A^{(1)}$ = A^n calculado en la Ecuación (30) y $A^{n(2)}$ se calcula de la misma manera que la Ecuación (30) utilizando z^{best2} y z^{fine2} en lugar de z^{best} y z^{fine} . Sólo hay una prima para la incertidumbre del orden de franja de $A_j'^L$

porque es una fase para el segundo pico referenciado al primer pico, por lo que no hay prima asociada a un plano de referencia fijo. El perfil de fase es entonces

$$15 \quad \theta_j'^L = A_j'^L + \Theta_j^L \quad (37)$$

donde

$$\Theta_j^L = K^0 c^\ominus n L_j^\ominus. \quad (38)$$

La parte de la incertidumbre del orden de franja que depende del campo en $\theta_j'^L$ desaparece con un desfase aproximado conectado al campo α^L :

$$20 \quad \theta_j^L = \theta_j'^L - 2\pi \text{Round} \left(\frac{A_j'^L - \alpha^L}{2\pi} \right) \quad (39)$$

Finalmente

$$L_j^\ominus = \theta_j^L / n K^0. \quad (40)$$

Esto completa el análisis LSQ para perfilar un espesor de película.

Caracterización del sistema

25 Las secciones anteriores describen cómo generar una señal modelo compleja \tilde{T} empíricamente a partir de datos de caracterización del sistema (SysChar). Los datos SysChar pueden ser idénticos a los datos de medición si la pieza es una superficie sólida homogénea. Para una estructura de superficie complicada como una película delgada, utilizamos una medición SysChar diferente y almacenamos los resultados en un archivo, utilizando una representación en el dominio de frecuencia \overline{q}^{sys} del espectro de señal promedio. Como se indicó anteriormente, el

30 cálculo de la señal modelo compleja \tilde{T} se realiza a partir de un DFT inverso de \overline{q}^{sys} utilizando un rango seleccionado de frecuencias dentro de la ROI.

Si la señal SysChar en el dominio de exploración I^{sys} tiene un muestreo uniforme, entonces una Transformada de Fourier (FT) previa proporciona directamente q^{sys} para cada píxel para contribuir al promedio de frecuencia positivo \overline{q}^{sys} :

$$35 \quad \tilde{q}_{j,v>0}^{sys} = \sum_{z=0}^{N_{sys}-1} I_j^{sys} \exp[i \zeta_z K_v]. \quad (41)$$

La \sim sobre q^{sys} indica que el espectro en la Ecuación (41) contiene sólo las frecuencias positivas distintas de cero. La siguiente etapa es extraer y promediar las magnitudes y fases dentro de la ROI definida por los índices de frecuencia (o bins) $vmin < v < vmax$:

$$\overline{P_v^{sys}} = \frac{1}{Y} \sum_{j=0}^{Y-1} P_{j,v}^{sys} \quad (42)$$

$$\overline{\phi_{j,v}^{sys}} = \frac{1}{Y} \sum_{j=0}^{Y-1} \phi_{j,v}^{sys} \quad (43)$$

donde

$$P_{j,v}^{sys} = \left| \tilde{q}_{j,v}^{sys} \right| \quad (44)$$

5 y la fase medida como una función de la frecuencia angular es

$$\phi_{j,v}^{sys} = \text{connect} \left(\phi_{j,v}^{m^{sys}} \right) \quad (45)$$

para

$$\phi_{j,v}^{m^{sys}} = \arg \left(\tilde{q}_{j,v}^{sys} \right). \quad (46)$$

10 Las contribuciones espectrales fuera de la ROI se ajustan a cero. Las tres primas para los datos de fase $\phi^{m^{sys}}$ en el dominio de la frecuencia indican que hay múltiples incertidumbres $2-\pi$ en la información de fase: de la frecuencia angular a la frecuencia angular K , de píxel a píxel, y en general con respecto a una referencia absoluta. La función *connect* en la Ecuación (45) elimina una de estas primas al conectarse a través de frecuencias angulares para cada píxel, de manera similar a como se hace en el FDA. El promedio de campo en la Ecuación (43) elimina otra prima, dejando sólo la prima única que nos recuerda que se desconoce el valor de compensación total de la fase. Después
15 de promediar la fase y las magnitudes de forma independiente, construimos el espectro parcial independientemente de la altura.

$$\overline{\tilde{q}_v^{sys}} = \overline{P_{v>0}^{sys}} \exp \left[\text{nonlin} \left(\overline{\phi_{v>0}^{sys}} \right) \right] \quad (47)$$

donde la función *nonlin* devuelve la parte del argumento que no es lineal con respecto a la frecuencia angular K , eliminando de este modo el cambio de fase lineal con frecuencia angular asociada con el perfil de superficie.

20 Tenga en cuenta que el uso del valor correcto de K^0 es un parámetro clave para determinar el perfil de alta resolución h^0 , ya que suponemos que los valores de fase ϕ se refieren a esta frecuencia. Una excelente estimación de K^0 se obtiene del promedio ponderado o centroide de las frecuencias en el espectro:

$$K^0 = \frac{\sum_{v=vmin}^{vmax} \left(\overline{P_{j,v>0}^{sys}} \right)^2 K_v}{\sum_{v=vmin}^{vmax} \left(\overline{P_{j,v>0}^{sys}} \right)^2} \quad (48)$$

Captación de imagen con eliminación de franjas utilizando el desplazamiento de señal

25 El parámetro de desplazamiento m^{dc} calculado con el número de fotograma de la cámara de mejor ajuste z^{best} es una excelente estimación de la intensidad de franja eliminada I^0 :

$$I_j^0 = m_{j,z^{best}}^{dc} \quad (49)$$

Aunque se podría argumentar a favor de la interpolación al valor de z^{fine} , m^{dc} varía lo suficiente lentamente como para que esto parezca innecesario.

30 Eficiencia computacional

Estos cálculos LSQ incluyen la multiplicación de la matriz de la Ecuación (21) y las sumas relacionadas que, en principio, se realizan para cada fotograma de la cámara z y para cada píxel j . Aunque este cálculo parece en un principio excesivo y lento, no es tan intensivo como se podría suponer. Con cierto cuidado, el número total de cálculos es comparable (aunque ciertamente mayor) al requerido en las técnicas basadas en producto punto. Por lo tanto, las técnicas LSQ son lo suficientemente rápidas para aplicaciones de producción.
35

En primer lugar, téngase en cuenta que la matriz de ajuste $3 \times 3 \mathbf{E}$ no incluye la señal experimental y , y, por lo tanto, se puede calcular antes de la adquisición de datos. A continuación, los dos últimos elementos $D1$, $D2$ dados en la Ecuación (23) son las partes real e imaginaria, respectivamente, del producto punto del modelo de señal compleja enmarcado $w \tilde{\mathbf{T}}$ y de la señal experimental I , un cálculo del tipo ya requerido por las técnicas basadas en producto

- punto. La misma comparación se aplica al número de cálculos arcotangentes, que son los mismos. Los cálculos adicionales durante el proceso, por lo tanto, con respecto a las técnicas basadas en producto punto para la función de mérito simple de la Ecuación (27), son la suma D_0 enmarcada dada en la Ecuación (23), que requiere \hat{N} multiplicaciones y adiciones, y el cálculo matricial de la Ecuación (21), que implica 9 multiplicaciones y adiciones.
- 5 Estas operaciones son generalmente rápidas, ya que no implican funciones o divisiones trigonométricas.
- La función de mérito más agresiva en función del ajuste de la Ecuación (28) evalúa la función de diferencia cuadrada χ para los valores encontrados de Λ_1, Λ_2 en cada posición de exploración y en cada píxel utilizando la Ecuación (17). En esencia, esto requiere la recuperación para utilizar y la realización de algo como $4\hat{N}$ multiplicaciones y adiciones, lo que podría afectar el tiempo de procesamiento. No hay funciones trigonométricas adicionales y sólo una división
- 10 adicional.
- El LSQ por ventana deslizante es un algoritmo de señal en el dominio de exploración similar a la técnica del producto punto y, por lo tanto, un candidato para varias estrategias de aceleración, incluyendo el muestreo disperso de la función de mérito, la prueba previa de la modulación de la señal estimada para reducir el número de cálculos innecesarios y la búsqueda rápida de sólo la reflexión de la superficie superior de una película multicapa.
- 15 Diagrama de flujo
- A la luz de lo anterior, con referencia a la FIG. 7, se muestra un diagrama de flujo 700 para una aplicación de ejemplo de la técnica LSQ por ventana deslizante. En la primera etapa 701, los datos de medición SWLI $I_{j,z}$ se obtienen, por ejemplo, directamente de un sistema interferométrico o de un archivo de datos. Si se ha realizado previamente una caracterización del sistema, los datos de caracterización del sistema $\tilde{q}_{j,v}^{sys}$ se lee desde un archivo.
- 20 Alternativamente, los datos de caracterización del sistema SWLI $I_{j,z}^{sys}$ se obtienen para ser utilizados en la etapa de caracterización del sistema 703. Los datos de caracterización del sistema SWLI pueden ser los propios datos de medición.
- En la etapa 702, se realiza la configuración. Se ajustan varios parámetros, por ejemplo, N, \hat{N}, Y . Se ajustan las exploraciones globales y locales $\zeta^{step}, \zeta_z, \zeta_2$, y se establece la escala de dominio de frecuencia K .
- 25 Si los datos de caracterización del sistema $\tilde{q}_{j,v}^{sys}$ no se leen desde un archivo en la etapa 701, se calculan a partir de los datos de caracterización del sistema SWLI $I_{j,z}^{sys}$ en la etapa 703. Los datos de caracterización del sistema se analizan en función de la frecuencia y se eligen los componentes positivos que no son de frecuencia cero, produciendo $\tilde{q}_{j,v}^{sys}$. Las magnitudes y fases en el dominio de la frecuencia se promedian sobre el campo de imagen, produciendo \overline{P}_v^{sys} y $\overline{\Phi}_{j,v}^{sys}$ respectivamente. Se establece la región de interés del dominio de frecuencia (ROI) donde reside la señal útil. Finalmente, se elimina la parte lineal de la fase (eliminando de este modo el sesgo de altura de la
- 30 caracterización del sistema) y un espectro parcial \tilde{q}_v^{sys} se crea a partir de la magnitud y las fases promediadas en el campo. Este espectro se almacena como datos de caracterización del sistema.
- En la etapa 704, se definen las matrices LSQ enmarcadas. La señal modelo \tilde{T}_2 se calcula tomando la transformada discreta de Fourier (DFT) de los datos de caracterización del sistema en el dominio de la frecuencia \tilde{q}_v^{sys} . Se define una ventana de evaluación cónica w_2 . El modelo de señal y la ventana se utilizan para definir la matriz de ajuste LSQ \tilde{H} según se describió anteriormente.
- 35 En la etapa 705, se resuelve el problema LSQ. El vector producto punto $D_{j,z}$ se calcula utilizando los datos de medición. Opcionalmente, para mejorar la eficiencia computacional, se puede utilizar inicialmente una preexploración para identificar áreas de fuerte intensidad de señal. El problema LSQ se resuelve para encontrar los mejores valores de fase y magnitud $\Lambda_{j,z}$ para un ajuste óptimo de la señal modelo a los datos en cada posición de exploración. Se identifican y descartan las posiciones de exploración que tienen una intensidad de señal insuficiente para su procesamiento posterior. Si se va a utilizar una función de mérito en función del ajuste, se calcula el valor de la diferencia cuadrada resultante para las soluciones LSQ $\chi_{j,z}^2$. Finalmente, se calcula o bien una función de mérito en función de la magnitud $\Pi_{j,z}^m$ o una función de mérito en función del ajuste $\Pi_{j,z}^x$.
- 40 En la etapa 706, se realiza una búsqueda de picos. Se busca la función de mérito Π para encontrar el fotograma de cámara óptimo z_j^{best1} . tanto para el primer pico válido o para el pico más alto. Si se desea un cálculo del espesor de la película, se busca la función de mérito Π para encontrar un segundo (o más) fotograma óptimo de la cámara z_j^{best2} para un segundo pico válido.
- En la etapa 707, se determina un perfil de la altura de la superficie superior. La frecuencia K^0 de los datos de interferencia media o nominal se determina a partir de las medias ponderadas del espectro de caracterización del sistema. Una estimación de la posición de exploración mejorada z_j^{fine1} se determina en función de z_j^{best1} interpolando entre posiciones de exploración discretas. Un perfil de la altura de la superficie de resolución normal h_j^g se determina comparando la altura de la superficie medida con la posición de exploración $\zeta^{step} z_j^{fine1}$. El desfase A_j' se determina interpolando para encontrar la fase φ en z_j^{fine1} . El análisis de desfase se utiliza para encontrar un desfase
- 50

aproximado conectado al campo α' . Se elimina la incertidumbre del orden de las franjas y se calcula el perfil de la altura de la superficie de alta resolución h_j^θ .

En la etapa 708, se realiza la eliminación de franjas. La compensación en el fotograma óptimo de la cámara z^{best1} se identifica y se iguala a la intensidad I^θ eliminada de la franja en cada píxel, produciendo un perfil de intensidad con franja eliminada I_j^θ .

Si se desea una medición del perfil del espesor de película, se realiza la etapa 709. Una estimación de la posición de exploración mejorada z_j^{fine2} se determina en función de z_j^{best2} interpolando entre posiciones de exploración discretas. Un perfil de espesor de película de resolución normal h_j^θ se determina igualando el perfil de espesor medido L_j^θ con la diferencia de las posiciones de exploración z_j^{best1} y z_j^{best2} , escalado por el índice de refracción. El desfase del espesor de la película A_j^L se determina interpolando para encontrar los valores de fase en las dos posiciones de pico z_j^{fine1} y z_j^{fine2} . El análisis de desfase se utiliza para encontrar un desfase aproximado conectado al campo α^L . Se elimina la incertidumbre del orden de las franjas y se calcula el perfil de espesor de la película de alta resolución L_j^θ .

Aplicaciones de ejemplo

Los métodos y sistemas de interferometría de baja coherencia descritos anteriormente se pueden utilizar para cualquiera de los siguientes problemas de análisis de superficie: películas delgadas simples; películas delgadas multicapa; bordes afilados y características de superficie que difractan o generan de otro modo efectos de interferencia complejos; rugosidad de superficie no resuelta; características de superficie no resueltas, por ejemplo, una ranura de anchura de la sublongitud de onda en una superficie que de otra manera sería lisa; materiales disímiles; propiedades de la superficie dependientes de la polarización; y desviaciones, vibración o movimientos de la superficie o características de la superficie deformable que dan lugar a perturbaciones del fenómeno de la interferencia dependientes de ángulos de incidencia. Para el caso de las películas delgadas, el parámetro variable de interés puede ser el espesor de la película, el índice de refracción de la película, el índice de refracción del sustrato, o alguna combinación de los mismos. A continuación, se describen aplicaciones de ejemplo que incluyen objetos y dispositivos que exhiben dichas características.

Procesamiento de semiconductores

Los sistemas y métodos descritos anteriormente se pueden utilizar en un proceso de semiconductores para la supervisión específica de herramientas o para controlar el propio flujo del proceso. En la aplicación de monitorización de procesos, las películas de una o múltiples capas se cultivan, depositan, pulen o graban en obleas de Si no estampadas (obleas de supervisión) por medio de la herramienta de proceso correspondiente y, posteriormente, el espesor y/o las propiedades ópticas se miden utilizando el sistema de interferometría que emplea la técnica LSQ por ventana deslizante que se describe en la presente memoria. El promedio, así como dentro de la uniformidad de las obleas, del espesor (y/o propiedades ópticas) de estas obleas de supervisión se utilizan para determinar si la herramienta de proceso asociada está funcionando con especificaciones objetivo o si debe ser reorientada, ajustada o retirada de la utilización en la producción.

En la aplicación de control de proceso, estas últimas películas de una o múltiples capas se cultivan, depositan, pulen o graban en Si estampado, las obleas de producción se producen por medio de la herramienta de proceso correspondiente y, posteriormente, el espesor y/o las propiedades ópticas se miden con el sistema de interferometría que emplea la técnica LSQ por ventana deslizante que se describe en la presente memoria. Las mediciones de producción utilizadas para el control de procesos típicas incluyen un pequeño sitio de medición y la capacidad de alinear la herramienta de medición con la región de la muestra de interés. Este sitio puede consistir en una pila de películas multicapa (que a su vez puede tener un patrón) y, por lo tanto, requiere un modelado matemático complejo para extraer los parámetros físicos relevantes. Las mediciones de control de proceso determinan la estabilidad del flujo de proceso integrado y determinan si el procesamiento integrado debe continuar, reorientarse, redirigirse a otro equipo o detenerse por completo.

Específicamente, por ejemplo, el sistema de interferometría descrito en la presente memoria se puede utilizar para supervisar el siguiente equipo: difusión, recocido térmico rápido, herramientas de deposición química por vapor (tanto de baja presión como de alta presión), grabado dieléctrico, pulidores químicos mecánicos, deposición de plasma, grabado de plasma, pista de litografía, y herramientas de exposición de litografía. Además, el sistema de interferometría descrito en la presente memoria se puede utilizar para controlar los siguientes procesos: zanjado y aislamiento, formación de transistores, así como formación dieléctrica entre capas (tal como el damasquinado dual).

Estructuras de interconexión de cobre y pulido químico mecánico

Cada vez es más común entre los fabricantes de chips utilizar el llamado proceso de "cobre de damasquinado dual" para fabricar interconexiones eléctricas entre las diferentes partes de un chip. Este es un ejemplo de un proceso que se puede caracterizar eficazmente utilizando un sistema de topografía de superficie adecuado. El proceso de doble damasquinado se puede considerar que consta de seis partes: (1) una deposición dieléctrica entre capas (ILD), en la que una capa de material dieléctrico (tal como un polímero o vidrio) se deposita sobre la superficie de una oblea

(que contiene varios chips individuales); (2) pulido químico mecánico (CMP), en el que la capa dieléctrica se pule con el fin de crear una superficie lisa, adecuada para la litografía óptica de precisión, (3) una combinación de etapas de modelado litográfico y grabado iónico reactivo, en la que se crea una red compleja que comprende zanjas estrechas que discurren paralelamente a la superficie de la oblea y pequeñas vías que se discurren desde el fondo de las zanjas hasta una capa que conduce de electricidad más baja (previamente definida), (4) una combinación de etapas de deposición de metal que dan como resultado la deposición de zanjas y vías de cobre, (5) una etapa de deposición dieléctrica en el que se aplica un dieléctrico sobre las zanjas y vías de cobre, y (6) una etapa final CMP en la que se elimina el exceso de cobre, dejando una red de zanjas (y posiblemente de vías) llenas de cobre rodeadas de material dieléctrico.

5
10
15
Con referencia a la FIG. 9a, un dispositivo 500 es un ejemplo de la estructura de la película resultante de la deposición de un dieléctrico 504 sobre características de cobre 502 depositado sobre un sustrato 501. El dieléctrico 504 tiene una superficie externa 506 no uniforme que presenta variaciones de altura a lo largo de la misma. Las señales interferentes obtenidas a partir del dispositivo 500 pueden incluir patrones de interferencia resultantes de la superficie 506, una interfaz 508 entre las características de cobre 502 y el dieléctrico 504, y una interfaz 510 entre el sustrato 501 y el dieléctrico 504. El dispositivo 500 puede incluir otras varias características que también generen patrones de interferencia.

20
25
Con referencia a la FIG. 9b, un dispositivo 500' ilustra el estado del dispositivo 500 después de la etapa CMP final. La superficie superior 506 se ha aplanado a una superficie 506', y la interfaz 508 ahora se puede exponer a los alrededores. La interfaz 510 en la superficie del sustrato permanece intacta. El rendimiento y la uniformidad del dispositivo depende críticamente de la supervisión del aplanado de la superficie 504. Es importante apreciar que la velocidad de pulido, y por lo tanto el espesor del cobre (y dieléctrico) restantes después del pulido, depende en gran medida y de manera compleja de las condiciones de pulido (tales como la presión de la almohadilla y la composición de la lechada de pulido), así como de la disposición local detallada (es decir, la orientación, la proximidad y la forma) del cobre y de las regiones dieléctricas circundantes. Por lo tanto, se pueden grabar partes de la superficie 506 sobre elementos de cobre 502 a diferentes velocidades que otras partes de la superficie 506. Además, una vez que la interfaz 508 de los elementos de cobre 502 se expone, los elementos dieléctricos y de cobre pueden presentar diferentes velocidades de grabado.

30
35
40
Esta "velocidad de pulido dependiente de la posición" es conocida por dar lugar a una topografía de superficie variable en muchas escalas de longitudes laterales. Por ejemplo, puede significar que los chips situados más cerca del borde de una oblea en el agregado se pulen más rápidamente que los situados cerca del centro, creando regiones de cobre que son más delgadas de lo deseado cerca de los bordes y más gruesas de lo deseado en el centro. Este es un ejemplo de un proceso de "escala de oblea" no uniforme, es decir, uno que ocurre en una escala de longitud comparable al diámetro de la oblea. También se sabe que las regiones que tienen una alta densidad de zanjas de cobre pulen a una velocidad mayor que las regiones cercanas con bajas densidades de líneas de cobre. Esto conduce a un fenómeno conocido como "erosión inducida por CMP" en las regiones de alta densidad de cobre. Este es un ejemplo de un proceso de "escala de chip" no uniforme, es decir, uno que ocurre en una escala de longitud comparable a (y a veces mucho menor que) las dimensiones lineales de un solo chip. Otro tipo de falta de uniformidad de escala de chips, conocida como "desprendimiento", ocurre en regiones de zanjas llenas solo de cobre (que tienden a pulirse a una velocidad mayor que el material dieléctrico circundante). En el caso de zanjas de más de unas pocas micras de anchura, el desprendimiento puede llegar a ser severo, con el resultado de que las líneas afectadas posteriormente exhiben una resistencia eléctrica excesiva, lo que conduce a un fallo del chip.

45
La falta de uniformidad en los procesos a escala de obleas y chips inducidos por CMP es intrínsecamente difícil de predecir, y está sujeta a cambios con el tiempo a medida que evolucionan las condiciones dentro del sistema de procesamiento CMP. Para supervisar de forma eficaz y ajustar adecuadamente las condiciones del proceso con el propósito de asegurar que cualquier falta de uniformidad permanezca dentro de los límites aceptables, es importante que los ingenieros de proceso realicen mediciones frecuentes de topografía de superficie sin contacto en los chips en un gran número y en una amplia variedad de ubicaciones. Esto es posible utilizando las formas de realización de los métodos y sistemas de interferometría descritas anteriormente.

50
55
60
En algunas formas de realización, una o más propiedades espaciales, por ejemplo, la topografía de la superficie 506 y/o el espesor del dieléctrico 504, se supervisan obteniendo señales interferentes de baja coherencia de la estructura antes y/o durante el CMP. En función de las propiedades espaciales, las condiciones de pulido se pueden modificar para conseguir la superficie plana deseada 506'. Por ejemplo, la presión de la almohadilla, la distribución de la presión de la almohadilla, las características del agente de pulido, la composición y el flujo del disolvente, y otras condiciones se pueden determinar en función de las propiedades espaciales. Después de un tiempo de pulido, se puede volver a determinar la propiedad espacial y cambiar las condiciones de pulido según sea necesario. La topografía y/o el espesor también son indicativos del punto final en el que se alcanza, por ejemplo, la superficie 504'. Por lo tanto, las señales interferentes de baja coherencia se pueden utilizar para evitar depresiones causadas por el pulido excesivo de diferentes regiones del objeto. Los métodos y sistemas de interferencia de baja coherencia tienen ventajas a este respecto a causa de las propiedades espaciales del dispositivo, por ejemplo, las alturas relativas de la superficie del dieléctrico (a) sobre los elementos de cobre 502 y (b) sobre la superficie del sustrato 510 pero los elementos de cobre adyacentes 502 se pueden determinar incluso en presencia de las múltiples interfaces.

Fotolitografía

En muchas aplicaciones de microelectrónica, la fotolitografía se utiliza para modelar una capa de fotorresistencia cubriendo un sustrato, por ejemplo, una oblea de silicio. Con referencia a las FIG. 8a y 8b, un objeto 30 incluye un sustrato, por ejemplo, una oblea, 32 y una capa de recubrimiento, por ejemplo, la capa de fotoresist 34. El objeto 30 incluye varias interfaces como ocurre entre materiales de diferente índice de refracción. Por ejemplo, una interfaz objeto-alrededores 38 se define cuando una superficie externa 39 de la capa de fotoresist 34 hace contacto con el entorno que rodea al objeto 30, por ejemplo, líquido, aire, otro gas o el vacío. Se define una interfaz de capa sustrato 36 entre una superficie 35 de la oblea 32 y una superficie inferior 37 de la capa de fotoresist 34. La superficie 35 de la oblea puede incluir varias características modeladas 29. Algunas de estas características tienen la misma altura que partes adyacentes del sustrato, pero un índice de refracción diferente. Otras características se pueden extender hacia arriba o hacia abajo en relación con partes adyacentes del sustrato. Por consiguiente, la interfaz 36 puede presentar una topografía variable y compleja subyacente de la superficie externa de la fotorresistencia.

Un aparato de fotolitografía capta la imagen de un patrón sobre el objeto. Por ejemplo, el patrón puede corresponder con elementos de un circuito electrónico (o el negativo del circuito). Después de la toma de imágenes, se eliminan partes de la fotorresistencia que dejan al descubierto el sustrato subyacente a la fotorresistencia eliminada. El sustrato dejado al descubierto se puede grabar, cubrir con material depositado o modificar de otra manera. Los restos de fotorresistencia protegen otras partes del sustrato de dicha modificación.

Para aumentar la eficiencia de fabricación, a veces se prepara más de un dispositivo a partir de una única oblea. Los dispositivos pueden ser iguales o diferentes. Cada dispositivo requiere que se capte la imagen de un subconjunto de la oblea con un patrón. En algunos casos, se capta la imagen del patrón secuencialmente en diferentes subconjuntos. La captación de imágenes secuenciales se puede realizar por varias razones. Las aberraciones ópticas pueden impedir que se logre una calidad de enfoque de patrón adecuada en áreas más grandes de la oblea. Incluso en ausencia de aberraciones ópticas, las propiedades espaciales de la oblea y de la fotorresistencia también pueden impedir que se consiga un enfoque adecuado del patrón en grandes áreas de la oblea. A continuación, se describen aspectos de la relación entre las propiedades espaciales de la oblea/resistencia y la calidad del enfoque.

Con referencia de nuevo a la FIG. 8b, el objeto 30 se muestra con un número N de subconjuntos 40_i , cada uno más pequeño que un área total 41 del objeto del que se va a captar la imagen. Dentro de cada subconjunto 40_i , las variaciones de las propiedades espaciales, por ejemplo, variaciones de altura e inclinación de la oblea o fotoresist, son normalmente menores que cuando se toman sobre el área total 41. Sin embargo, la oblea o fotoresist de los diferentes subconjuntos 40_i suelen tener diferentes alturas e inclinaciones. Por ejemplo, la capa 34 presenta espesores Δt_1 y Δt_2 , que varían la altura y la inclinación de la superficie 39 (FIG. 7a). Por lo tanto, cada subconjunto del objeto puede tener una relación espacial diferente con el generador de imágenes fotolitográficas. La calidad del enfoque está relacionada con la relación espacial, por ejemplo, la distancia entre el objeto y el generador de imágenes fotolitográficas. Para enfocar correctamente diferentes subconjuntos del objeto puede ser necesario un reposicionamiento relativo del objeto y del generador de imágenes. Debido a las variaciones en la altura y la inclinación del objeto, no se puede lograr un enfoque apropiado del subconjunto únicamente determinando la posición y orientación del objeto con respecto a una parte del objeto que esté separada del subconjunto captado, por ejemplo, un lado 43 del objeto.

Se puede lograr un enfoque adecuado determinando una propiedad espacial de un objeto dentro de un subconjunto del objeto del que se va a captar la imagen (o procesar de otra manera). Una vez que se ha determinado la posición del subconjunto, el objeto (y/o una parte del generador de imágenes fotolitográficas) se puede mover, por ejemplo, desplazar, girar y/o inclinar, para modificar la posición del subconjunto con respecto a una referencia, por ejemplo, una parte del generador de imágenes fotolitográficas. La determinación y el movimiento (si es necesario) se pueden repetir para cada subconjunto del que captar la imagen.

La determinación de la propiedad espacial del subconjunto puede incluir la determinación de una posición y/o altura de uno o más puntos de una superficie externa de una capa delgada del objeto, el uno o más puntos que se encuentran dentro del subconjunto del objeto del que se va a captar la imagen. Por ejemplo, la posición y orientación de la superficie externa 39 del subconjunto 40_2 (FIG. 8a) se puede determinar en función de las posiciones de los puntos 42_1 - 42_3 dentro del subconjunto. La determinación de la propiedad espacial del subconjunto para captar la imagen puede incluir la utilización de un interferómetro para iluminar el subconjunto con luz y la detección de una señal interferente que incluya la luz reflejada desde el subconjunto iluminado. En algunas formas de realización, se capta la imagen de varios subconjuntos simultáneamente con luz para obtener varias señales interferentes. Cada señal interferente es indicativa de una o más propiedades espaciales de un subconjunto. Por lo tanto, las señales interferentes se pueden utilizar para preparar una imagen indicativa de la topografía del objeto sobre varios de los subconjuntos. Durante la fotolitografía de los subconjuntos, la oblea se coloca sobre la topografía de los subconjuntos individuales según se determina a partir de las varias señales interferentes. Por lo tanto, cada subconjunto se puede colocar para un enfoque óptimo con respecto al aparato de fotolitografía.

La detección de una señal interferente a partir de cada subconjunto de un objeto del que se va a captar la imagen puede incluir la detección de la luz reflejada desde el subconjunto y la luz de referencia sobre un rango OPD que sea al menos tan grande como la longitud de coherencia de la luz detectada. Por ejemplo, la luz se puede detectar al menos sobre su longitud de coherencia. En algunas formas de realización, el interferómetro se configura de modo

que la luz reflejada desde el subconjunto iluminado sea dominada por la luz reflejada desde o bien una interfaz externa (tal como la superficie externa 39) o bien una interfaz interna (tal como la interfaz 36). Una propiedad espacial de un objeto también se puede determinar en función de únicamente una parte de la señal interferente. Por ejemplo, si la señal interferente incluye dos o más patrones de interferencia superpuestos, se puede determinar una propiedad espacial del objeto en función de una parte de uno de los patrones de interferencia dominados por las contribuciones procedentes de una única interfaz del objeto.

Procesamiento de bultos de soldadura

Con referencia a las FIG. 10a y 10b, una estructura 1050 es un ejemplo de una estructura producida durante el procesamiento de bultos de soldadura. La estructura 1050 incluye un sustrato 1051, regiones 1002 no mojables por la soldadura, y una región 1003 mojada por la soldadura. Las regiones 1002 tienen una superficie externa 1007. La región 1003 tiene una superficie externa 1009. Por consiguiente, se forma una interfaz 1005 entre las regiones 1002 y el sustrato 1001.

Durante el proceso, una masa de soldadura 1004 se coloca en contacto con la región mojada 1003. Después de que la soldadura fluya, la soldadura forma un contacto seguro con la región mojada 1003. Las regiones adyacentes no mojables 1002 actúan como un dique que evita que la soldadura que fluye migre de forma no deseada sobre la estructura. Se desea conocer las propiedades espaciales de la estructura, incluyendo las alturas relativas de las superficies 1007, 1009 y las dimensiones de la soldadura 1004 en relación con la superficie 1002. Según se puede determinar a partir de otras descripciones en la presente memoria, la estructura 1050 incluye varias interfaces que pueden dar como resultado cada una un patrón de interferencia. La superposición entre los patrones de interferencia impide determinar con precisión las propiedades espaciales utilizando técnicas de interferencia conocidas. La aplicación de los sistemas y métodos descritos en la presente memoria permite que se determinen las propiedades espaciales.

Las propiedades espaciales determinadas a partir de la estructura 1050 se pueden utilizar para cambiar las condiciones de fabricación, tales como los tiempos de deposición para las capas 1002, 1003 y la cantidad de soldadura 1004 utilizada por área de la región 1003. Además, las condiciones de calentamiento utilizadas para el hacer fluir la soldadura también se pueden modificar en función de las propiedades espaciales para lograr un flujo adecuado y/o evitar la migración de la soldadura.

Pantallas de cristal líquido

Con referencia a la FIG. 11, una matriz pasiva LCD 450 está compuesta de varias capas. Las partes principales son dos placas de vidrio 452, 453 conectadas por sellos 454. Se aplica un polarizador 456 a la placa de vidrio delantera 453 para polarizar la luz entrante en una única dirección. La luz polarizada pasa a través de la placa de vidrio delantera 453. Una capa de óxido de estaño de indio (ITO) 458 se utiliza como electrodo. Una capa de pasivación 460, a veces llamada capa de recubrimiento dura, en función de SiO_x, se recubre sobre el ITO 458 para aislar eléctricamente la superficie. La poliimida 462 se imprime sobre la capa de pasivación 460 para alinear el fluido de cristal líquido 464. El fluido de cristal líquido es sensible a los campos eléctricos y cambia de orientación cuando se aplica un campo eléctrico. El cristal líquido también es ópticamente activo y gira la dirección de polarización de la luz entrante. El espacio entre celdas Δg , es decir, el espesor de la capa de cristal líquido 464, se determina por los separadores 466, que mantienen las dos placas de vidrio 452, 453 a una distancia fija. Cuando no hay potencial eléctrico desde la placa delantera 453 a la placa trasera 452, la luz polarizada se gira 90 grados a medida que pasa a través de la capa de cristal líquido 464. Cuando se aplica un potencial eléctrico de una placa a la otra, la luz no se gira. Después de que la luz haya pasado a través de la capa de cristal líquido 464, pasa a través de otra capa de poliamida 468, otra capa de capa de recubrimiento dura 470, un electrodo ITO trasero 472 y la placa de vidrio trasera 452. Después de alcanzar un polarizador trasero 474, la luz o bien se transmitió a través o se absorbió, dependiendo si se había o no girado 90 grados. La celda 450 puede incluir filtros 476 u otros elementos colorantes para proporcionar una visualización en color.

El espacio entre celdas Δg determina en gran medida las propiedades optoelectricas de la pantalla LCD, por ejemplo, la relación de contraste y el brillo. El control del espacio entre celdas durante la fabricación es fundamental para obtener pantallas uniformes y de calidad. El espacio real de las celdas puede diferir de las dimensiones de los separadores 466 porque, durante el montaje, se aplica presión o vacío para introducir el medio cristalino líquido, los sellos 454 se curan y pueden cambiar las dimensiones, y el medio cristalino líquido añadido genera fuerzas capilares entre las placas 452, 453. Tanto antes como después de añadir el medio cristalino líquido 464, las superficies 480, 482 de las placas 452, 453 reflejan la luz que da como resultado un patrón de interferencia indicativo del espacio entre celdas Δg . La naturaleza de baja coherencia de la señal interferente, ya sea por sí misma o en combinación con las técnicas de procesamiento de señales interferentes descritas, se puede utilizar para supervisar las propiedades de la celda, incluyendo el espacio entre celdas Δg , durante la fabricación, incluso en presencia de interfaces formadas por otras capas de la celda.

Un método de ejemplo puede incluir la obtención de una señal interferente de baja coherencia, que incluya los patrones de interferencia indicativos del espacio entre celdas Δg antes de añadir la capa 464. El espacio entre celdas (u otra propiedad espacial de la celda) se determina a partir de los patrones de interferencia y se puede comparar con un valor especificado. Las condiciones de fabricación, por ejemplo, una presión o vacío aplicado a las placas 452, 453 se pueden cambiar para modificar el espacio entre celdas Δg si una diferencia entre el valor

especificado y el espacio entre celdas determinado excede las tolerancias. Este proceso se puede repetir hasta lograr el espacio entre celdas deseado. El medio cristalino líquido se introduce a continuación en la celda. La cantidad de medio cristalino líquido a añadir se puede determinar a partir de la propiedad espacial medida de la celda. Esto puede evitar que la celda se llene en exceso o en defecto. El proceso de llenado también se puede controlar observando las señales interferentes de las superficies 480, 482. Una vez que la celda se ha llenado, se obtienen patrones adicionales de interferencia de baja coherencia para supervisar el espacio entre celdas Δg (u otra propiedad espacial). Una vez más, las condiciones de fabricación se pueden modificar de modo que el espacio entre celdas se mantenga o se sitúe dentro de las tolerancias.

Grabado y corte Láser

10 Los láseres se pueden utilizar para trazar objetos en preparación para separar estructuras diferentes, fabricadas simultáneamente, por ejemplo, estructuras microelectrónicas. La calidad de la separación está relacionada con las condiciones de trazado, por ejemplo, el tamaño del foco láser, la potencia del láser, la velocidad de traslación del objeto y la profundidad del trazado. Debido a que la densidad de las características de la estructura puede ser grande, las líneas de trazado pueden ser películas finas adyacentes o capas de las estructuras. Las interfaces asociadas con la capa o películas delgadas pueden crear patrones de interferencia que aparecen cuando se utiliza la interferometría para determinar la profundidad de trazado. Los métodos y sistemas descritos en la presente memoria se pueden utilizar para determinar la profundidad de trazado incluso en presencia de dichas películas o capas adyacentes.

20 Un método de ejemplo puede incluir el trazado de una o más estructuras electrónicas y la separación de las estructuras a lo largo de las líneas de trazado. Antes y/o después de la separación, se pueden utilizar señales interferentes de baja coherencia para determinar la profundidad de trazado. Se conocen otras condiciones de trazado, por ejemplo, el tamaño del punto láser, la potencia del láser y la velocidad de traslación. La profundidad de trazado se puede determinar a partir de las señales interferentes. La calidad de la separación en función de las condiciones de trazado, incluyendo la profundidad de trazado, se puede determinar evaluando las estructuras separadas. En función de dichas determinaciones, se pueden determinar las condiciones de trazado necesarias para lograr una calidad de separación deseada. Durante la fabricación continuada, se pueden obtener señales interferentes de baja coherencia de regiones trazadas para supervisar el proceso. Las condiciones de trazado se pueden cambiar para mantener o llevar las propiedades de trazado dentro de las tolerancias.

Ejemplos

30 La determinación de una propiedad espacial de un objeto de medición se describe adicionalmente en el contexto de los cinco ejemplos siguientes no limitantes.

1. Determinación de un perfil de la altura de la superficie de un objeto de medición con una única superficie (datos simulados)

35 Con referencia a la FIG. 12, la señal interferente simulada 1201 se obtiene a partir de un único punto en un objeto sólido de dióxido de silicio. La señal interferente 1201 no es más que una de las 101 señales interferentes totales que representan un trazado lineal a través de la superficie del objeto. Para mayor comodidad, no se muestran las 100 señales interferentes restantes. La superficie del objeto de dióxido de silicio tiene un perfil aproximadamente esférico con $PV=600$ nm. El sistema interferométrico utiliza una longitud de onda de irradiación de 550 nm con un ancho de banda de 100 nm. El ancho de banda es Gaussiano en número de onda. La apertura numérica del sistema es de 0,01 para luz colimada con incidencia normal. Cada señal interferente tiene una resolución digital a escala completa de 256 pasos de escala de grises. La intensidad de señal promedio es 20 niveles de gris de amplitud AC por encima de 65 niveles de gris DC. Las señales tienen ruido aleatorio con una desviación estándar de 2 niveles de gris. Este es un ejemplo de superficie sólida sin estructura de película y, por lo tanto, se utilizará una señal modelo simétrica y la función de mérito en función de la magnitud de la Ecuación (27) para obtener un perfil de la altura de la superficie.

45 Las 101 señales interferentes se transforman en un dominio inverso utilizando la transformada de Fourier. Las señales interferentes transformadas se utilizan para preparar una plantilla transformada que incluya las contribuciones de todas las señales interferentes transformadas. Las señales transformadas se promedian, utilizando las técnicas descritas anteriormente, para producir datos de intensidad de caracterización del sistema transformado. Con referencia a las FIG. 13a y 13b, se muestran el espectro de magnitud 1300 y la fase 1310 de los datos SysChar transformados. El espectro de caracterización del sistema se encuentra en su punto máximo con un valor K^0 . Una región de interés 1302 se muestra como centrada alrededor del pico. Téngase en cuenta el mínimo ruido uniforme del espectro de magnitud 1300, debido al promedio de más de 101 señales.

55 Con referencia a la FIG. 14, se muestran los datos de intensidad de caracterización del sistema promediados 1401 a partir de los cuales se extrae la señal modelo \tilde{I} en el dominio de la posición de exploración. También se muestran los límites de la ventana 1402, 1403. Téngase en cuenta la ausencia de ruido aleatorio en comparación con la FIG. 12 debido al promedio y al filtrado ROI en el dominio de la frecuencia.

Con referencia a la FIG. 15a, se muestra la señal modelo simétrica \tilde{T} 1501. La FIG. 15b muestra la señal modelo \tilde{T} 1501 multiplicada por una función ventana 1502.

5 Con referencia a la FIG. 16a, la señal modelo 1601 ha sido ajustada al conjunto de datos simulado 1201 de la FIG. 12 utilizando la técnica LSQ por ventana deslizante. La señal modelo se muestra en el fotograma de cámara de mejor ajuste z^{best} 1602, después de aplicar los parámetros m^{dc} , m , φ encontrados por el análisis LSQ para esta posición. Se realiza un ajuste similar para las 100 señales interferentes restantes.

Con referencia a la FIG. 16b, la función de mérito en función de la magnitud $1610 \Pi^m$ de la Ecuación (27) para el ajuste LSQ se representa como una función de la posición de exploración. El valor pico 1611 se identifica con la reflexión de la superficie superior. Como este es un ejemplo de superficie sólida, no hay un segundo pico.

10 Con referencia a las FIG. 17a y 17b, la altura de la superficie del objeto de medición se muestra en función de la posición lateral a lo largo de la superficie del objeto según se determina a partir de las señales interferentes 101 y la señal modelo 1501. La FIG. 17a muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un cálculo de altura de resolución normal (LSQ normal). La FIG. 17b muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un cálculo de altura de alta resolución (LSQ alto).

15 2. Determinación de un perfil de la altura de la superficie de un objeto de medición con múltiples superficies (datos simulados)

20 Las señales interferentes simuladas se obtienen a partir de 101 puntos en una exploración lineal a través de un objeto compuesto de una capa de dióxido de silicio sobre un sustrato de silicio. El espesor de la película oscila entre 1000 nm en los bordes y 1600 nm en el centro. La superficie superior tiene un perfil aproximadamente esférico con PV=600 nm. El sistema interferométrico utiliza una longitud de onda de irradiación de 550 nm con un ancho de banda de 100 nm. El ancho de banda es Gaussiano en número de onda. La apertura numérica del sistema es de 0,01 para luz colimada con incidencia normal. Cada señal interferente tiene una resolución digital a escala completa de 256 pasos de escala de grises. La intensidad promedio de la señal es de 20 niveles de gris de amplitud AC por encima de 80 niveles de gris DC. Las señales tienen ruido aleatorio con una desviación estándar de 2 niveles de gris. A diferencia del ejemplo anterior, este es un ejemplo de superficie múltiple con estructura de película. Por lo tanto, se utilizará una señal modelo asimétrica y la función de mérito en función del ajuste LSQ de la Ecuación (28) para obtener un perfil de la altura de la superficie.

30 Con referencia a la FIG. 18, se muestran los datos de intensidad de caracterización del sistema promediados 1801 de los que se extrae la señal modelo \tilde{T} en el dominio de la posición de exploración. También se muestran los límites de la ventana 1802, 1803. Téngase en cuenta que sólo la parte derecha o la parte del borde de ataque de la señal se mantiene dentro de la ventana. Esto proporcionará una función modelo asimétrica.

Con referencia a la FIG. 19a, se muestra la señal modelo asimétrica \tilde{T} 1901. La FIG. 19b muestra la señal modelo \tilde{T} 1901 multiplicada por una función ventana 1902.

35 Con referencia a la FIG. 20a, la señal modelo 2000 se ha ajustado al conjunto de datos simulado 2001 utilizando la técnica LSQ por ventana deslizante. La señal modelo se muestra en el fotograma de cámara de mejor ajuste z^{best} , después de aplicar los parámetros m^{dc} , m , φ encontrados por el análisis LSQ para esta posición. Se realiza un ajuste similar para las 100 señales interferentes restantes.

40 Con referencia a la FIG. 20b, la función de mérito en función del ajuste 2011 Π^x de la Ecuación (28) para el ajuste LSQ se representa como una función de la posición de exploración. El valor pico 2012 se identifica con la reflexión de la superficie superior. Nótese que el pico izquierdo 2013 correspondiente a la segunda superficie es más corto que el primer pico, incluso aunque la intensidad de la señal sea mayor en esta posición, porque el ajuste es mejor en el borde de ataque.

45 Con referencia a las FIG. 21a y 21b, se muestra la altura de la superficie del objeto de medición en función de la posición lateral a lo largo de la superficie del objeto, determinada a partir de las señales interferentes 101 y la señal modelo 1501. La FIG. 21a muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un cálculo de altura de resolución normal (LSQ normal). La FIG. 21b muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un cálculo de altura de alta resolución (LSQ alto).

3. Determinación de un perfil de la altura de la superficie de un objeto de medición de película delgada con múltiples superficies (Simulado)

50 Los datos de la señal interferente simulada se obtienen a partir de 101 puntos en una exploración lineal a través de un objeto compuesto de una capa de dióxido de silicio sobre un sustrato de silicio. El espesor de la película aumenta desde 0 nm en el borde izquierdo hasta 2500 nm en el borde derecho en incrementos de 25 nm. La superficie superior es plana. El sistema interferométrico utiliza una longitud de onda de irradiación de 550 nm con un ancho de banda de 100 nm. El ancho de banda es Gaussiano en número de onda. La apertura numérica del sistema es de 0,01 para luz colimada con incidencia normal. Cada señal interferente tiene una resolución digital a escala completa de 256 pasos de escala de grises. La intensidad de señal promedio es de 20 niveles de gris de amplitud AC por

55

encima de 80 niveles de gris DC. Las señales tienen ruido aleatorio con una desviación estándar de 2 niveles de gris. Como en el ejemplo anterior, este es un ejemplo de superficie múltiple con estructura de película. Por lo tanto, se utilizará una señal modelo asimétrica y la función de mérito en función de ajuste LSQ de la Ecuación (28) para obtener un perfil de la altura de la superficie.

5 Con referencia a la FIG. 22a, la señal modelo se ha ajustado a los datos de la señal de interferómetro simulada 2201 utilizando la técnica LSQ por ventana deslizante. La señal modelo 2202 se muestra en el fotograma de cámara de mejor ajuste 2203 z^{best} , después de aplicar los parámetros m^{dc} , m , φ encontrados por el análisis LSQ para esta posición. Téngase en cuenta que las dos señales de superficie no se pueden separar por la intensidad de la señal, sin embargo, la técnica LSQ por ventana deslizante identifica correctamente el borde de ataque.

10 Con referencia a la FIG. 22b, se representa la función de mérito en función del ajuste 2211 Π^X de la Ecuación (28) para el ajuste LSQ como una función de la posición de exploración. El valor pico 2212 se identifica con la reflexión de la superficie superior. Téngase en cuenta que existe un pico izquierdo 2213 para la segunda superficie, incluso aunque las dos señales parezcan inseparables.

15 Con referencia a las FIG. 23a y 23b, la altura de la superficie del objeto de medición se muestra en función de la posición lateral a lo largo de la superficie del objeto, según se determina a partir de las señales interferentes 101 y la señal modelo 1501. La FIG. 21a muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un cálculo de altura de resolución normal (LSQ normal). La FIG. 21b muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un cálculo de altura de alta resolución (LSQ alto). La coordenada lateral es el espesor de la película en micras. Recuerde que el perfil de la altura de la superficie del objeto de medición es plano, de modo que el resultado ideal sería una línea horizontal a cero. Los mejores resultados se obtienen para 0,7 micras y más; y se obtienen resultados razonablemente correctos para espesores de película por debajo de 0,5 micras. Esto se compara favorablemente con el punto de fallo de 1,0 micra de las técnicas basadas en producto punto.

20 4. Determinación de un perfil de la altura de la superficie de un objeto de medición de múltiples superficies (datos reales)

25 Los datos de la señal interferente se obtienen en una exploración lineal a través de un objeto de medición 2400. Con referencia a la FIG. 24, el objeto de medición 2400 está compuesto por una capa delgada de 600 nm de fotoresist conformal 2401 sobre un par de almohadillas cuadradas de aluminio 2402 sobre un sustrato de silicio 2403. Como en el ejemplo anterior, este es un ejemplo de superficie múltiple con estructura de película. Por lo tanto, se utilizará una señal modelo asimétrica y la función de mérito en función del ajuste LSQ de la Ecuación (28) para obtener un perfil de la altura de la superficie.

30 Con referencia a la FIG. 24a, la señal modelo 2411 se ha ajustado a los datos de la señal del interferómetro 2412 utilizando la técnica LSQ por ventana deslizante. La señal modelo 2411 se muestra en el fotograma de cámara de mejor ajuste 2413 z^{best} , después de aplicar los parámetros m^{dc} , m , φ encontrados por el análisis LSQ para esta posición. Téngase en cuenta que la señal de la primera superficie es difícil de identificar debido a la debilidad de la señal y a la distorsión causada por la superposición de las señales de superficie primera y segunda. La técnica LSQ por ventana deslizante con una señal modelo asimétrica identifica la parte derecha de la primera señal de superficie, en la que los datos son relativamente poco distorsionados por la segunda superficie.

35 Con referencia a las FIG. 25a y 25b, la altura de la superficie del objeto de medición se muestra en función de la posición lateral a través del objeto. La FIG. 25a muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un cálculo de altura de resolución normal (LSQ normal). La FIG. 25b muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un cálculo de altura de alta resolución (LSQ alto). Las áreas más altas corresponden a las mediciones sobre las almohadillas A1.

40 5. Determinación de un perfil de la altura de la superficie de un objeto de medición de múltiples superficies (datos reales)

45 Los datos de la señal interferente se obtienen en una exploración lineal a través de un objeto de medición 2600. Con referencia a la FIG. 26, el objeto de medición 2600 presenta una zanja de 10 micras de ancho y 440 nm de profundidad 2601 en un espesor nominal de 940 nm de dióxido de silicio 2602 sobre un sustrato de silicio 2603. Como en el ejemplo anterior, este es un ejemplo de superficie múltiple con estructura de película. Por lo tanto, se utilizará una señal modelo asimétrica y la función de mérito en función del ajuste LSQ de la Ecuación (28) para obtener un perfil de la altura de la superficie.

50 Con referencia a la FIG. 27, la señal modelo 2701 se ha ajustado a los datos de la señal del interferómetro 2702 utilizando la técnica LSQ por ventana deslizante. La señal modelo 2701 se muestra en el fotograma de cámara de mejor ajuste 2703 z^{best} , después de aplicar los parámetros m^{dc} , m , φ encontrados por el análisis LSQ para esta posición. Téngase en cuenta que las dos señales de superficie no se pueden separar por la intensidad de la señal, sin embargo, la técnica LSQ por ventana deslizante identifica correctamente el borde de ataque.

55 Con referencia a las FIG. 28a y 28b, la altura de la superficie del objeto de medición se muestra en función de la posición lateral a través del objeto. La FIG. 28a muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un cálculo de altura de resolución normal (LSQ normal). La FIG. 28b muestra un perfil de la altura de la superficie utilizando un

cálculo de altura de alta resolución (LSQ alto). Los perfiles se han desplazado en altura de modo que las áreas fuera de la zanja tengan una altura de 940 nm. La zanja mide 460 nm de profundidad con respecto a la superficie superior, y 480 nm de espesor con respecto a la supuesta posición del sustrato en función de un espesor supuesto de 940 nm fuera de la zanja.

5 Extensiones: Compensación de errores de exploración y vibraciones

En formas de realización adicionales, el sistema y el método se pueden modificar para acomodar incrementos de exploración arbitrarios, a diferencia del PSI convencional, que requiere una exploración de velocidad constante. Por ejemplo, se puede implementar un interferómetro de exploración convencional con un interferómetro de medición de distancia (DMI) de bajo coste, o alguna otra técnica, para supervisar el movimiento de exploración real, junto con la corrección por software utilizando una técnica LSQ.

La extensión del método LSQ por ventana deslizante a exploraciones desiguales conocidas implica algunos cambios en el algoritmo. La diferencia principal es que debe haber una señal modelo \tilde{T} diferente para cada índice de exploración z , y por consiguiente, también debe haber una matriz de ajuste \tilde{H} diferente en cada posición. La señal modelo \tilde{T} correcta se deriva del DFT de la Ecuación (13) cuando se incluyen los errores de exploración conocidos. Estos vectores ahora *dependientes de z* \tilde{T} y las matrices \tilde{H} se calculan por adelantado, por lo que no hay impacto en el tiempo de procesamiento. Los cálculos de la Ecuación (21) son un tanto complicados porque hay que hacer un seguimiento del índice correcto de \tilde{T} y \tilde{H} en cada posición de exploración, pero no hay que realizar multiplicaciones adicionales ni otras operaciones. Con esta sencilla modificación, podemos compensar cualquier error de exploración arbitrario.

20 Programa de ordenador

Cualquiera de los métodos de análisis por ordenador descritos anteriormente se puede implementar por hardware, o una combinación de ambos. Los métodos se pueden implementar con programas informáticos utilizando técnicas de programación estándar siguiendo el método y las figuras descritas en la presente memoria. El código de programa se aplica a los datos de entrada para realizar las funciones descritas en la presente memoria y generar información de salida. La información de salida se aplica a uno o más dispositivos de salida, tales como un monitor de visualización. Cada programa se puede implementar en un lenguaje de programación de alto nivel de proceso u orientado a objetos para comunicarse con un sistema informático. Sin embargo, los programas se pueden implementar en lenguaje ensamblador o máquina, si se desea. En cualquier caso, el lenguaje puede ser un lenguaje compilado o interpretado. Además, el programa se puede ejecutar en circuitos integrados dedicados preprogramados para ese fin.

Cada dicho programa de ordenador se almacena preferiblemente en un medio o dispositivo de almacenamiento (por ejemplo, ROM o disquete magnético) legible por un ordenador programable de propósito general o especial, para configurar y hacer funcionar el ordenador cuando el medio o dispositivo de almacenamiento sea leído por el ordenador para llevar a cabo los procedimientos descritos en la presente memoria. El programa de ordenador también puede residir en la caché o en la memoria principal durante la ejecución del programa. El método de análisis también se puede implementar como un medio de almacenamiento legible por ordenador, configurado con un programa de ordenador, donde el medio de almacenamiento así configurado hace que un ordenador opere de forma específica y predefinida para realizar las funciones descritas en la presente memoria.

Las formas de realización se relacionan con los sistemas y métodos de interferometría para determinar la información sobre un objeto de prueba. Información adicional sobre adecuados sistemas de interferometría de baja coherencia, sistemas de procesamiento electrónico, software y algoritmos de procesamiento relacionados se describen en Solicitudes de patente de EE.UU. de propiedad colectiva publicadas como US-2005-0078318-A1 bajo el título "METHODS AND SYSTEMS FOR INTERFEROMETRIC ANALYSIS OF SURFACES AND RELATED APPLICATIONS", US-2004-0189999-A1 bajo el título "PROFILING COMPLEX SURFACE STRUCTURES USING SCANNING INTERFEROMETRY", y US-2004-0085544-A1 bajo el título "INTERFEROMETRY METHOD FOR ELLIPSOMETRY, REFLECTOMETRY, AND SCATTEROMETRY MEASUREMENTS, INCLUDING CHARACTERIZATION OF THIN FILM STRUCTURES".

Se han descrito varias formas de realización de la invención. No obstante, se entenderá que se pueden realizar diversas modificaciones sin apartarse del alcance de la invención.

50

REIVINDICACIONES

1. Método para determinar el espesor de una película delgada en función de mediciones interferométricas de baja coherencia, que comprende:
- 5 proporcionar una señal de interferometría de exploración producida por un interferómetro de exploración de baja coherencia para una primera ubicación de un objeto de prueba, en donde el objeto de prueba comprende una película delgada;
- proporcionar una función modelo de la señal de interferometría de exploración producida por el interferómetro de exploración, en donde la función modelo se parametriza mediante uno o más valores de los parámetros;
- 10 ajustar la función modelo a la señal de interferometría de exploración para cada uno de una serie de desplazamientos en la posición de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración mediante la variación de los valores de los parámetros, en donde el ajuste comprende, para la primera ubicación, la determinación de un primer desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un primer ajuste óptimo y la determinación de un segundo desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un segundo ajuste óptimo; y
- 15 determinar la información sobre el objeto de prueba en la primera ubicación en función del ajuste, en donde la información determinante comprende la determinación del espesor de la película delgada en función de los desplazamientos primero y segundo en la posición de exploración para la primera ubicación.
2. El método de la reivindicación 1, que además comprende: proporcionar una señal de interferometría de exploración producida por el interferómetro de exploración de baja coherencia para cada una de las ubicaciones adicionales del objeto de prueba; ajustar la función modelo a cada una de las señales de interferometría de exploración correspondientes a las ubicaciones adicionales del objeto de prueba para cada uno de una serie de desplazamientos en las posiciones de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración respectiva mediante la variación de los valores de los parámetros; y determinar la información sobre el objeto de ensayo en las ubicaciones adicionales en función de la adaptación adicional.
- 20 3. El método de la reivindicación 2, en donde la función modelo se puede expresar como que comprende un valor de intensidad para cada una de una serie de posiciones de exploración locales, y en donde el ajuste comprende ajustar la función modelo a cada una de las señales de interferometría con la función modelo centrada en cada una de las posiciones de exploración globales correspondientes a la serie de desplazamientos en la posición de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración respectiva mediante la variación de los valores de los parámetros.
- 25 4. El método de la reivindicación 3, en donde, para cada una de las ubicaciones del objeto de prueba, el ajuste comprende la determinación de cuál de la serie de desplazamientos en las posiciones de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración respectiva produce un ajuste óptimo.
5. El método de la reivindicación 4, en donde la información determinante comprende determinar un perfil de la altura de la superficie para el objeto de prueba en función del desplazamiento en la posición de exploración correspondiente al primer ajuste óptimo para cada una de las ubicaciones.
- 35 6. El método de la reivindicación 4, en donde la información determinante comprende determinar un perfil de espesor para la película delgada en función del desplazamiento en la posición de exploración correspondiente al primer y segundo ajuste óptimo para cada una de las ubicaciones.
- 40 7. El método de la reivindicación 4, en donde la determinación de cuál de la serie de desplazamientos en las posiciones de exploración produce el ajuste óptimo, comprende la comparación de la función modelo y la señal de interferometría respectiva para determinar el grado de similitud entre la función modelo y la señal de interferometría respectiva.
8. El método de una de las reivindicaciones precedentes, en donde se calcula una métrica que se basa en la magnitud de la función modelo.
- 45 9. El método de una de las reivindicaciones precedentes, en donde el ajuste comprende, para cada una de las ubicaciones, determinar un primer desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde al primer ajuste óptimo y determinar un segundo desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde al segundo ajuste óptimo; y en donde la información determinante comprende la determinación de un perfil de espesor para la película delgada en función de los desplazamientos primero y segundo en la posición de exploración para cada una de las ubicaciones.
- 50 10. El método de una de las reivindicaciones precedentes, en donde las interfaces primera y segunda están separadas por 1000 nm o menos.
- 55 11. El método de la reivindicación 4, en donde, para cada una de las ubicaciones, el ajuste comprende además la determinación de una estimación para uno o más valores de los parámetros en función de los ajustes óptimos.

12. El método de la reivindicación 11, en donde la determinación de la información sobre el objeto de prueba es función del desplazamiento de la posición de exploración y al menos una de las estimaciones de los valores de los parámetros correspondientes al ajuste óptimo para cada una de las ubicaciones.
- 5 13. El método de la reivindicación 1, en donde el interferómetro de exploración de baja coherencia tiene una longitud de coherencia, y en donde la señal de interferometría para el objeto de prueba abarca un rango mayor que la longitud de coherencia del interferómetro de exploración de baja coherencia.
14. El método de la reivindicación 2, en donde, para cada una de las ubicaciones, el ajuste comprende la determinación de una estimación para uno o más de los valores de los parámetros en función de un ajuste óptimo de la función modelo a la señal de interferometría respectiva.
- 10 15. El método de la reivindicación 14, en donde el ajuste determina una estimación para un valor de parámetro de magnitud promedio para cada una de las ubicaciones, y la información determinante sobre el objeto de prueba comprende la determinación de una imagen sin franjas del objeto de prueba en función de las estimaciones para los valores de los parámetros de magnitud promedio.
- 15 16. El método de una de las reivindicaciones precedentes, que comprende la determinación de una propiedad espacial de la superficie externa en función del ajuste y modificar una posición relativa del objeto y un sistema de fotolitografía en función de la propiedad espacial.
17. El método de una de las reivindicaciones precedentes, en donde las interfaces primera y segunda son interfaces de una celda de cristal líquido.
- 20 18. El método de una de las reivindicaciones precedentes, que comprende: antes de proporcionar la señal del interferómetro de exploración, irradiar el objeto con un láser para formar una línea trazada; determinar una propiedad espacial de una parte del objeto que incluye la línea trazada en función del ajuste; y realizar trazados adicionales del mismo objeto o un objeto diferente en función de la propiedad espacial.
19. El método de la reivindicación 2, que comprende además el control del funcionamiento de una herramienta de proceso de semiconductores en función de la información determinada sobre el objeto de prueba en cada ubicación.
- 25 20. El método de la reivindicación 19, en donde la herramienta de proceso de semiconductores comprende uno de: una herramienta de difusión, una herramienta de recocido térmico rápido, una herramienta de deposición de vapor químico, una herramienta de grabado dieléctrico, una pulidora química mecánica, una herramienta de deposición de plasma, una herramienta de grabado de plasma, una herramienta de seguimiento de litografía, una herramienta de exposición de litografía.
- 30 21. Un aparato que comprende: un interferómetro de exploración de baja coherencia configurado para proporcionar una señal de interferometría de exploración para una primera ubicación de un objeto de prueba, en donde el objeto de prueba comprende una película delgada; y un procesador electrónico configurado para analizar las señales de interferometría, configurado el procesador electrónico para ajustar una función modelo de la señal de interferometría de exploración producida por el interferómetro de exploración de baja coherencia a la señal de interferometría de exploración correspondiente a la primera ubicación del objeto de prueba, para cada uno de una serie de desplazamientos en la posición de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración respectiva, variando uno o más valores de los parámetros que parametrizan la función modelo, y determinar información sobre el objeto de prueba en función del ajuste, en donde el ajuste de la función modelo comprende, para la primera ubicación, la determinación de un primer desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un primer ajuste óptimo y la determinación de un segundo desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un segundo ajuste óptimo, y en donde la información determinante comprende la determinación del espesor de la película delgada en función de los desplazamientos primero y segundo en la posición de exploración para la primera ubicación.
- 35 40 45 50 22. El aparato de la reivindicación 21, en donde el interferómetro de exploración de baja coherencia se configura para proporcionar una señal de interferometría de exploración para cada una de las ubicaciones adicionales del objeto de prueba, y el procesador electrónico se configura para ajustar la función modelo a cada una de las señales de interferometría de exploración correspondientes a las ubicaciones adicionales del objeto de prueba, para cada uno de una serie de desplazamientos en las posiciones de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración respectiva, mediante la variación de los valores de los parámetros, y para determinar la información acerca del objeto de exploración en las ubicaciones adicionales en función del ajuste adicional.
23. El aparato de la reivindicación 21, en donde el interferómetro de exploración de baja coherencia tiene una longitud de coherencia, y en donde la señal de interferometría para el objeto de prueba abarca un rango mayor que la longitud de coherencia del interferómetro de exploración de baja coherencia.
- 55 24. El aparato de la reivindicación 22, en donde la función modelo se puede expresar como que comprende un valor de intensidad para cada una de una serie de posiciones de exploración local, y en donde el ajuste comprende el ajuste de la función modelo a cada una de las señales de interferometría con la función modelo centrada en cada una de las posiciones de exploración globales correspondientes a la serie de desplazamientos en la posición de

exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración respectiva mediante la variación de los valores de los parámetros.

5 25. El aparato de la reivindicación 24, en donde, para cada una de las ubicaciones del objeto de prueba, el ajuste comprende la determinación de cuál de la serie de desplazamientos en las posiciones de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración respectiva produce un ajuste óptimo.

26. El aparato de la reivindicación 21, en donde la información determinante comprende determinar un perfil de la altura de la superficie para el objeto de prueba en función del desplazamiento en la posición de exploración correspondiente al ajuste óptimo para cada una de las ubicaciones.

10 27. El aparato de la reivindicación 25, en donde la información determinante comprende la determinación de un perfil de espesor para la película delgada en función de los desplazamientos en la posición de exploración correspondientes a los ajustes óptimos para cada una de las ubicaciones.

15 28. El aparato de la reivindicación 25, en donde la determinación de cuál de la serie de desplazamientos en las posiciones de exploración produce el ajuste óptimo, comprende la comparación de la función modelo y la señal de interferometría respectiva para determinar el grado de similitud entre la función modelo y la señal de interferometría respectiva.

29. El aparato de una de las reivindicaciones 21 a 28, en donde el procesador electrónico se configura adicionalmente para calcular una métrica la cual sea función adicionalmente de la magnitud de la función modelo.

20 30. El aparato de la reivindicación 24, en donde el ajuste comprende, para cada de ubicaciones múltiples, la determinación de un primer desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un primer ajuste óptimo y la determinación de un segundo desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un segundo ajuste óptimo; y en donde la información determinante comprende la determinación de un perfil de espesor para la película delgada en función de los desplazamientos primero y segundo en la posición de exploración para cada una de las ubicaciones.

25 31. Un aparato que comprende un medio legible por ordenador que almacena un programa configurado para hacer que un procesador ajuste una función modelo de una señal de interferometría de exploración producida por un interferómetro de exploración de baja coherencia a una señal de interferometría de exploración correspondiente a cada una de las una o más ubicaciones de un objeto de prueba medidas por el interferómetro de exploración, para cada uno de una serie de desplazamientos en la posición de exploración entre la función modelo y la señal de interferometría de exploración respectiva, variando uno o más valores de los parámetros que parametrizan la función modelo, y determinar la información sobre el objeto de prueba en función del ajuste, en donde el objeto de prueba
30 comprende una película delgada, en donde el ajuste la función modelo comprende, para cada una de las ubicaciones, la determinación de un primer desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un primer ajuste óptimo y la determinación de un segundo desplazamiento de la serie de desplazamientos de la posición de exploración que corresponde a un segundo ajuste óptimo, y en donde la
35 información determinante sobre el objeto de prueba comprende la determinación del espesor de la película delgada en función de los desplazamientos primero y segundo en la posición de exploración para cada una de las ubicaciones.

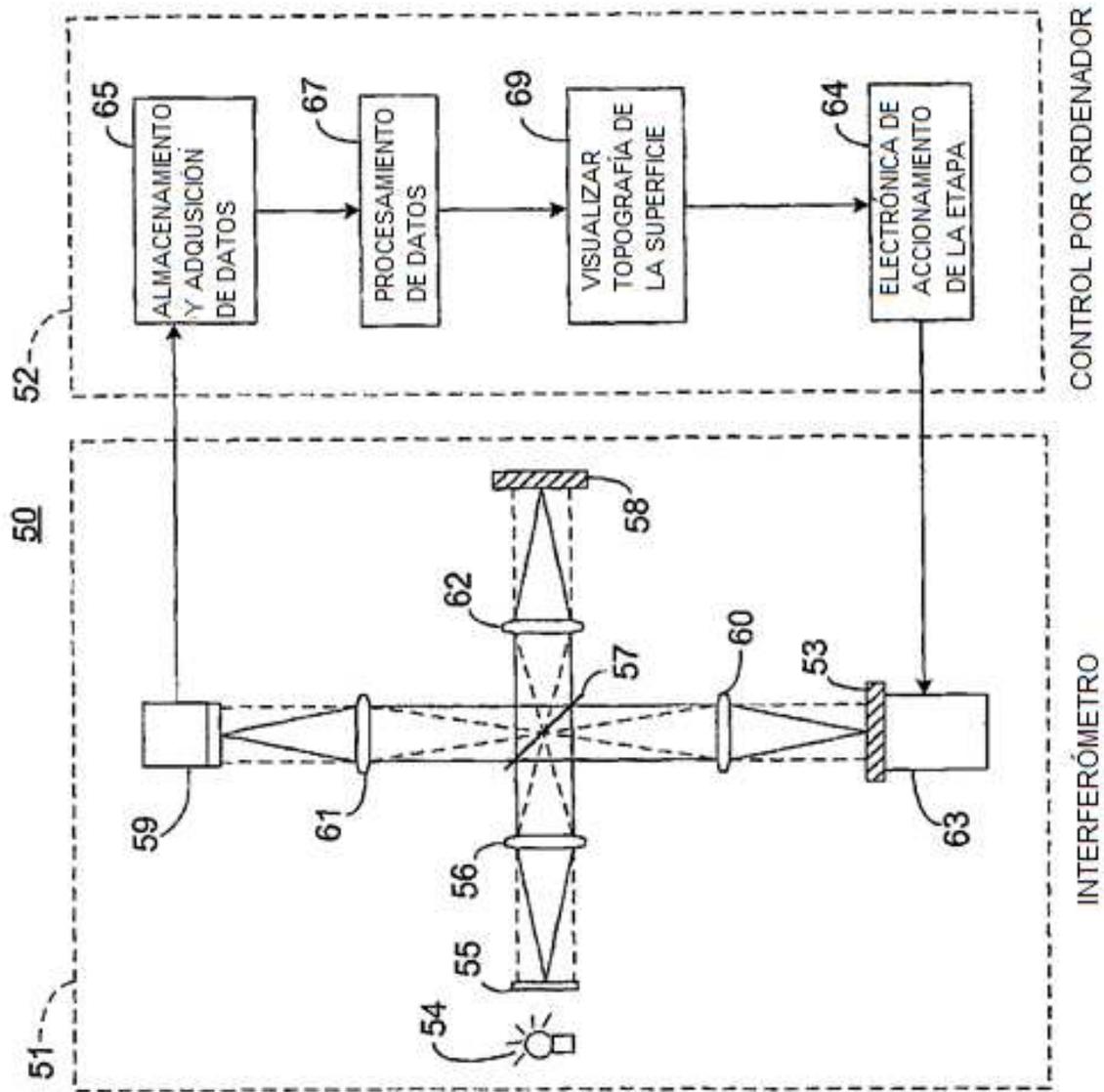


FIG. 1

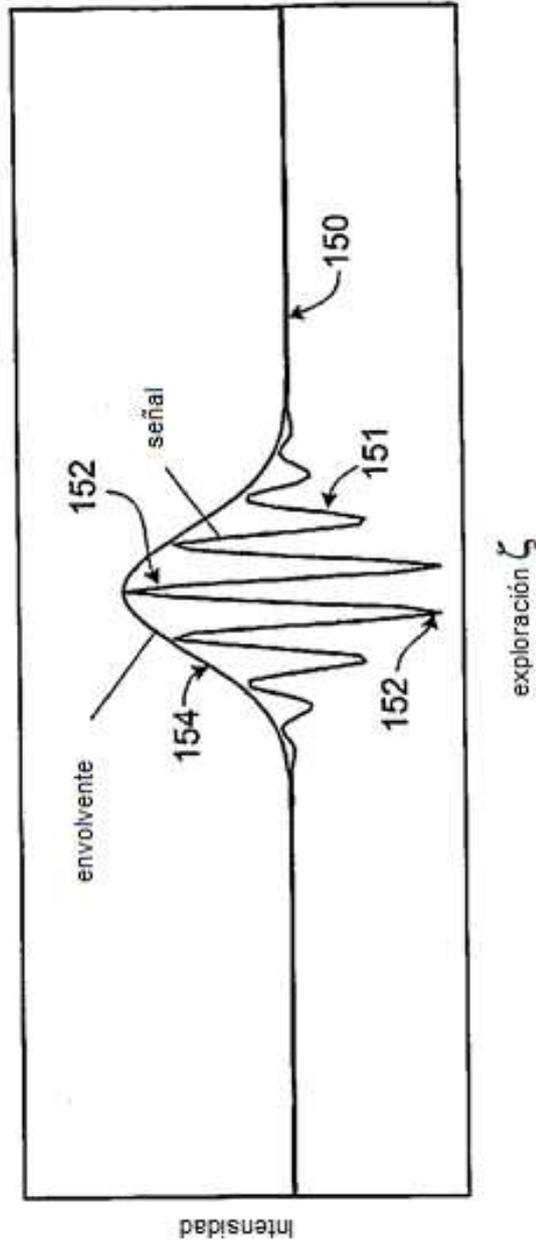


FIG. 2

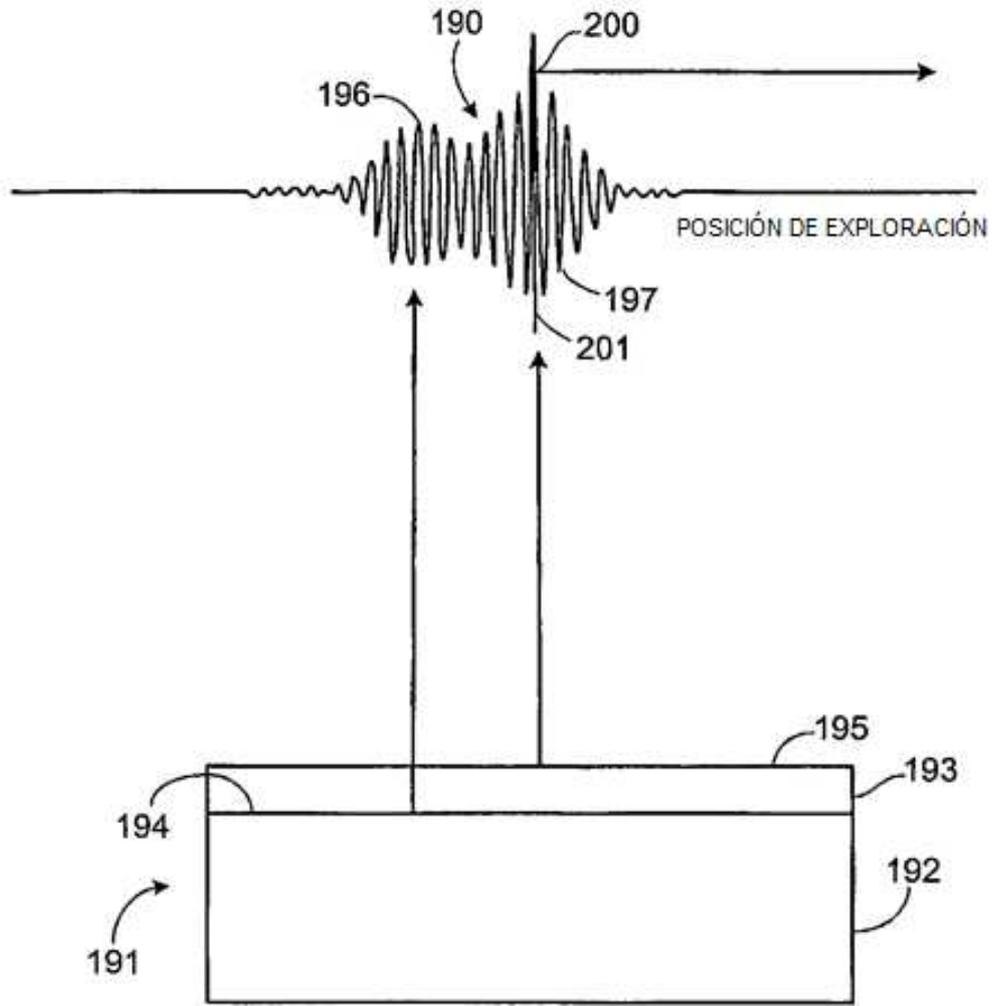


FIG. 3

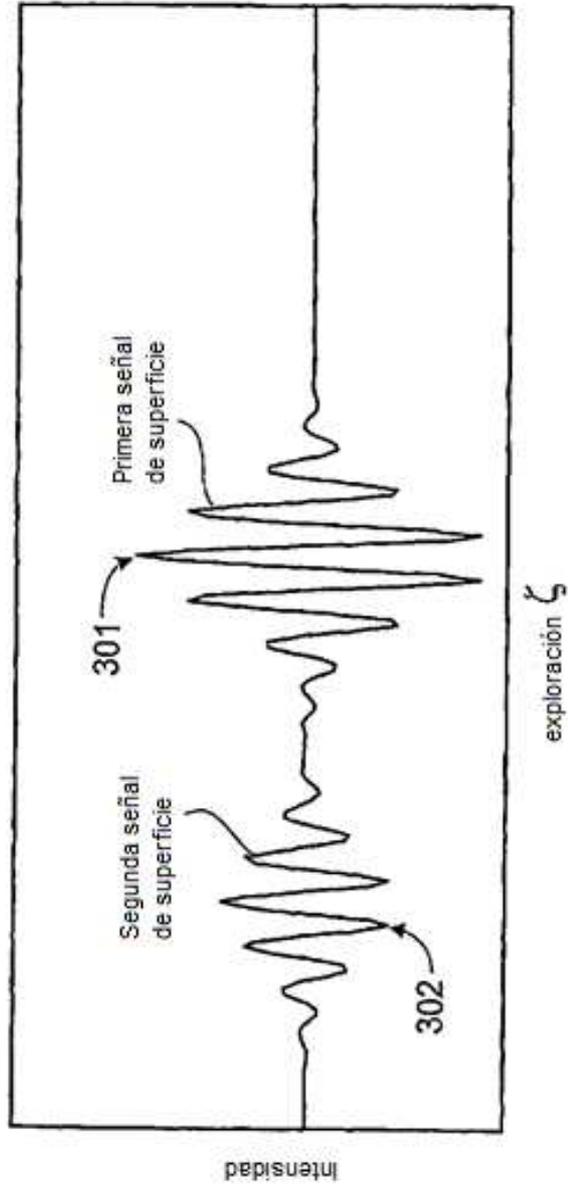


FIG. 4

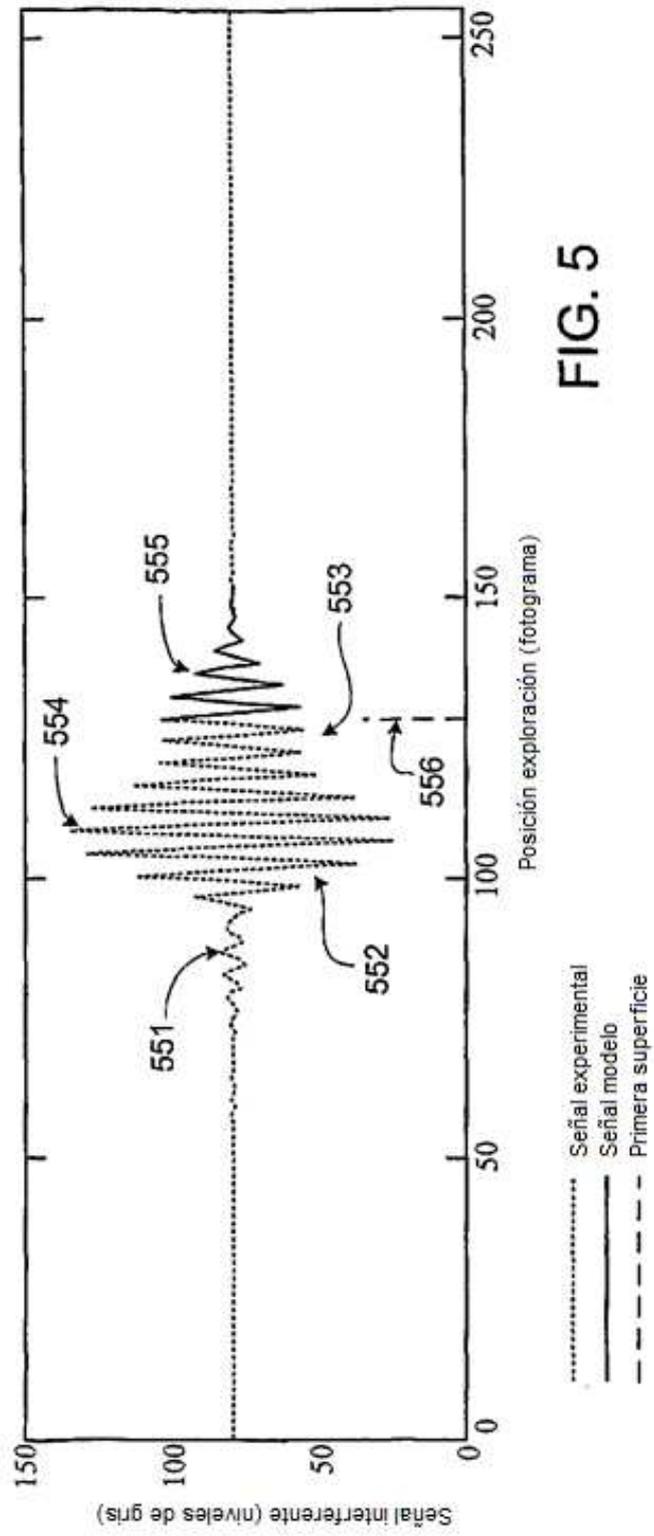


FIG. 5

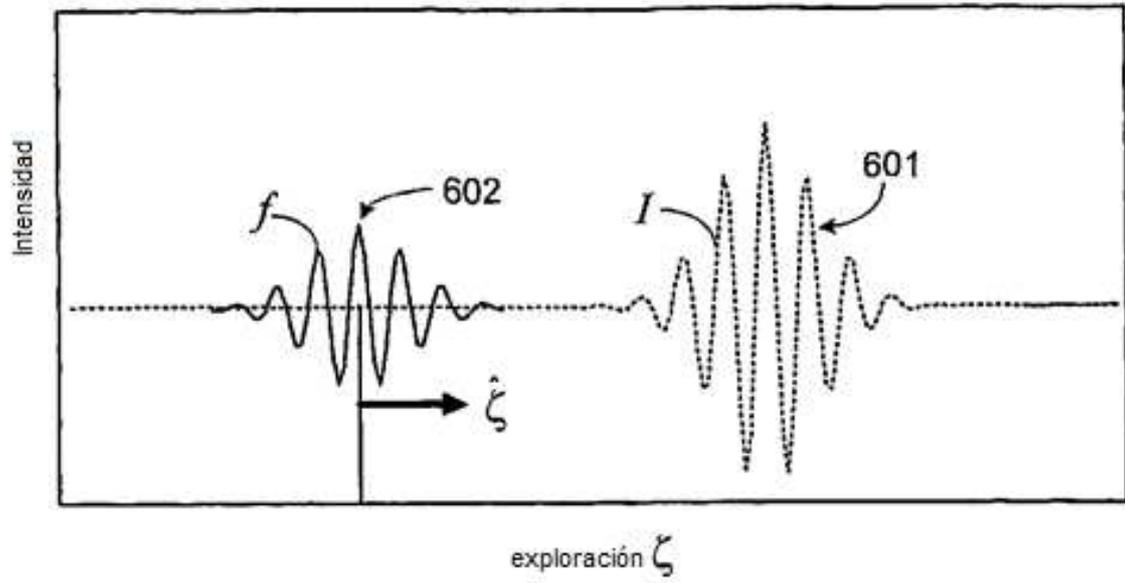


FIG. 6

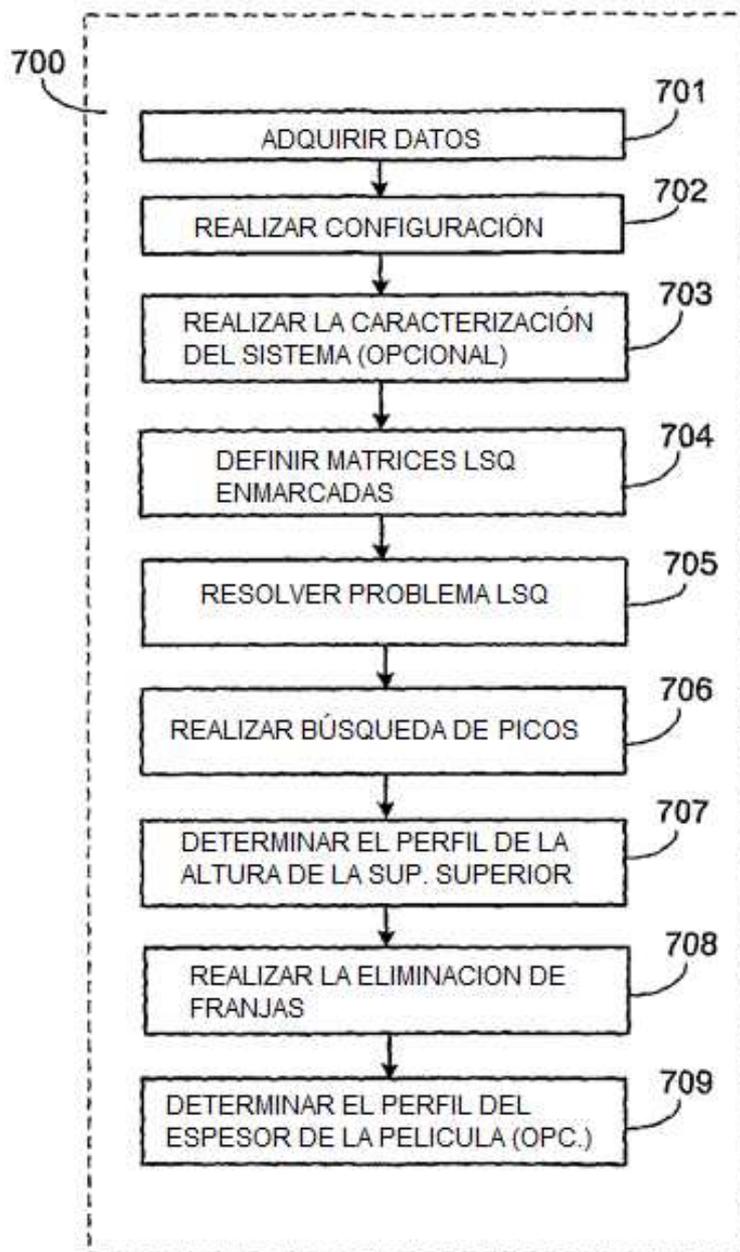


FIG. 7

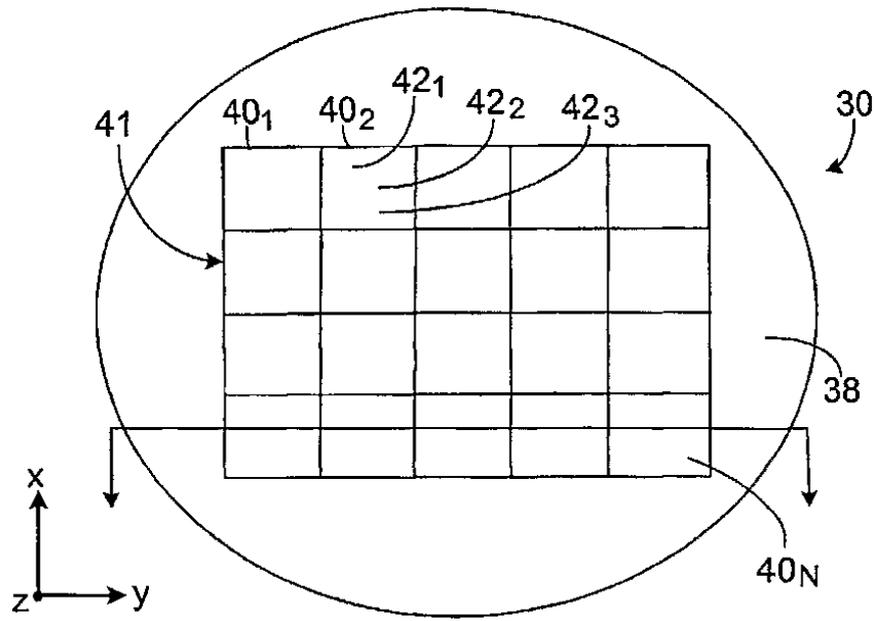


FIG. 8A

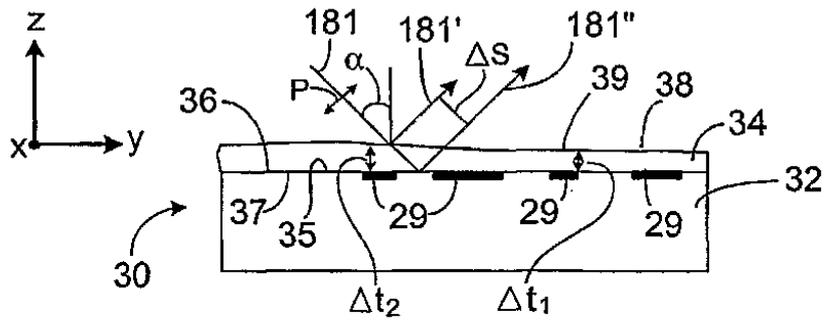


FIG. 8B

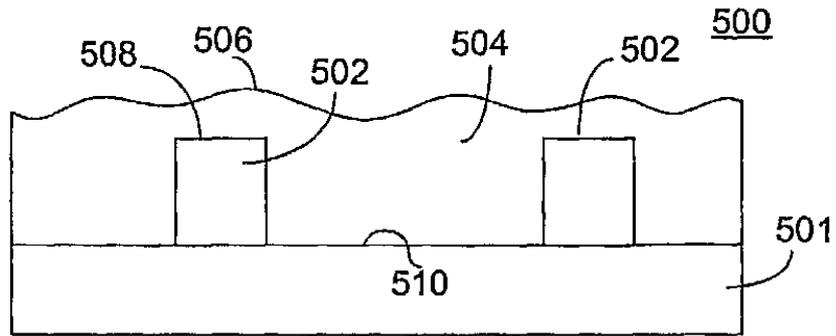


FIG. 9A

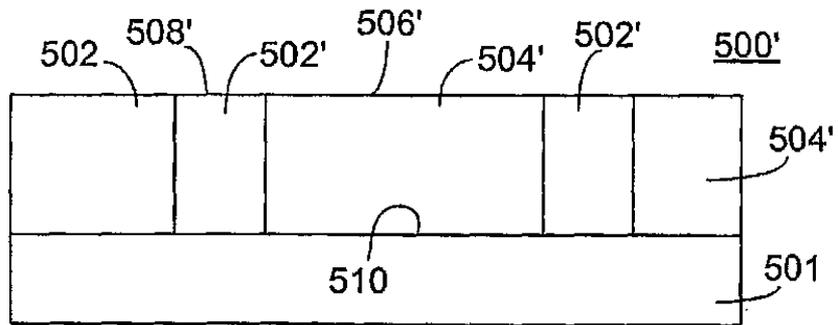


FIG. 9B

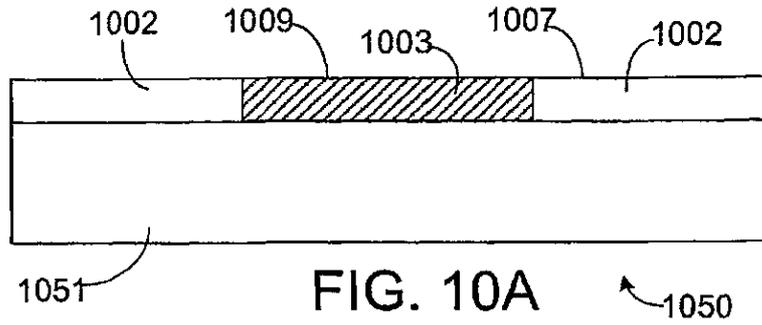


FIG. 10A

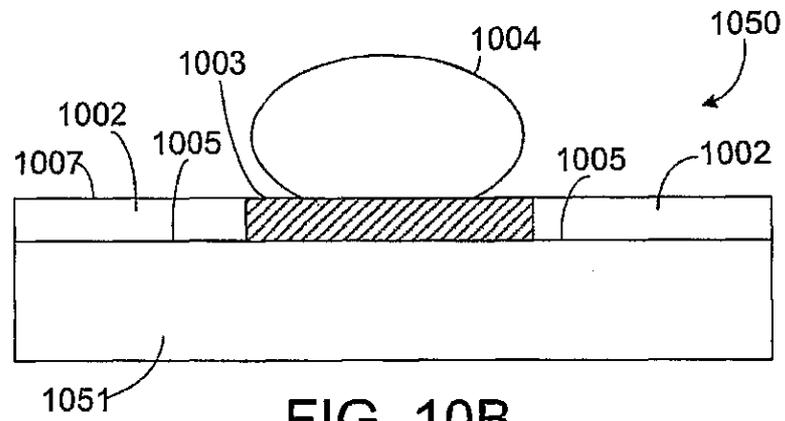


FIG. 10B

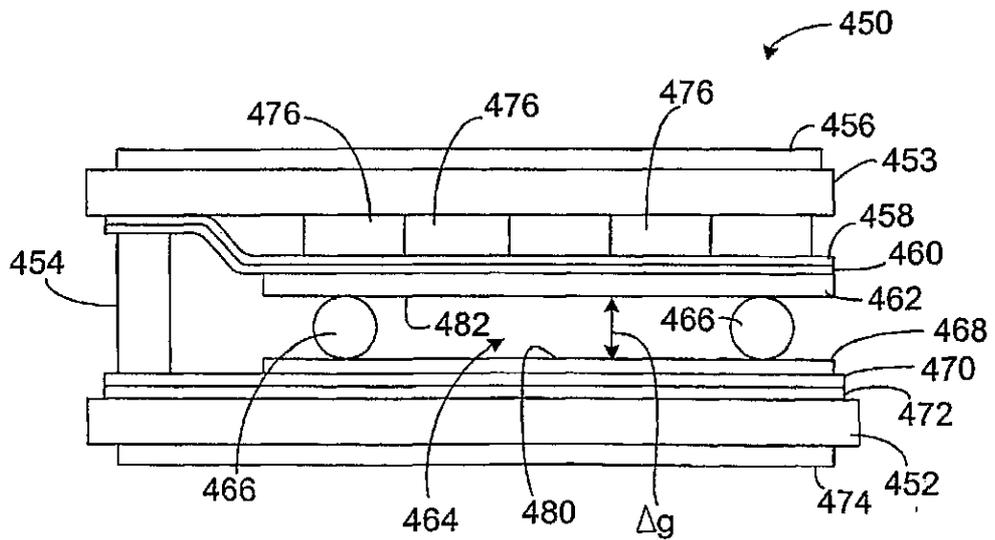


FIG. 11

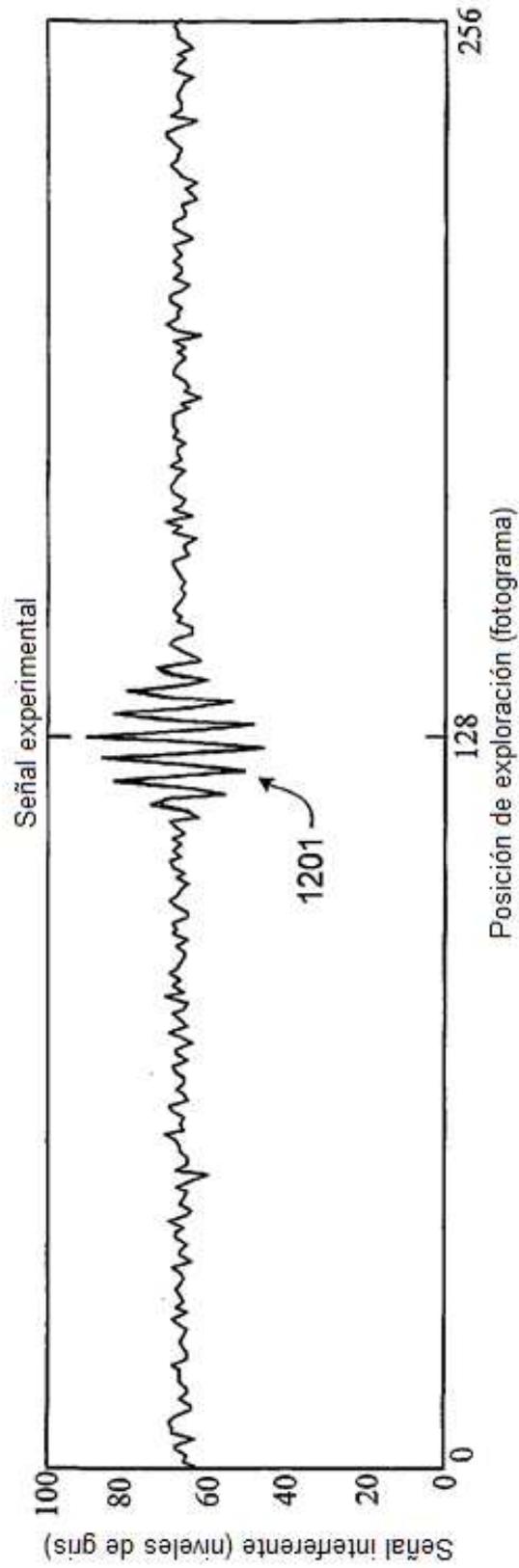


FIG. 12

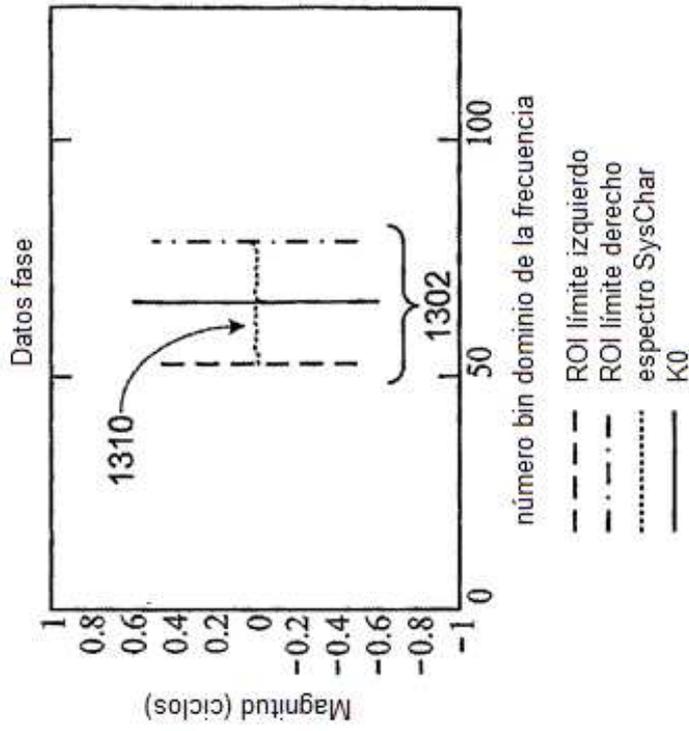


FIG. 13A

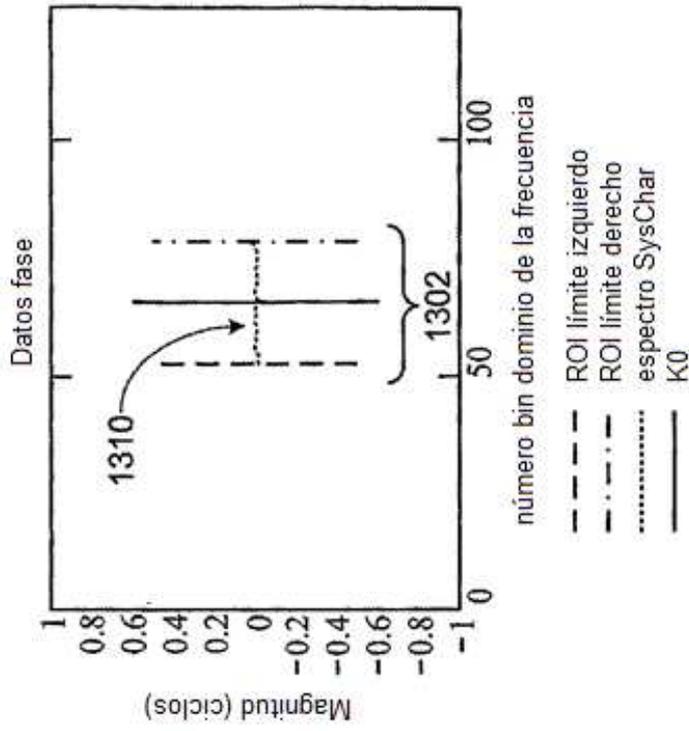


FIG. 13B

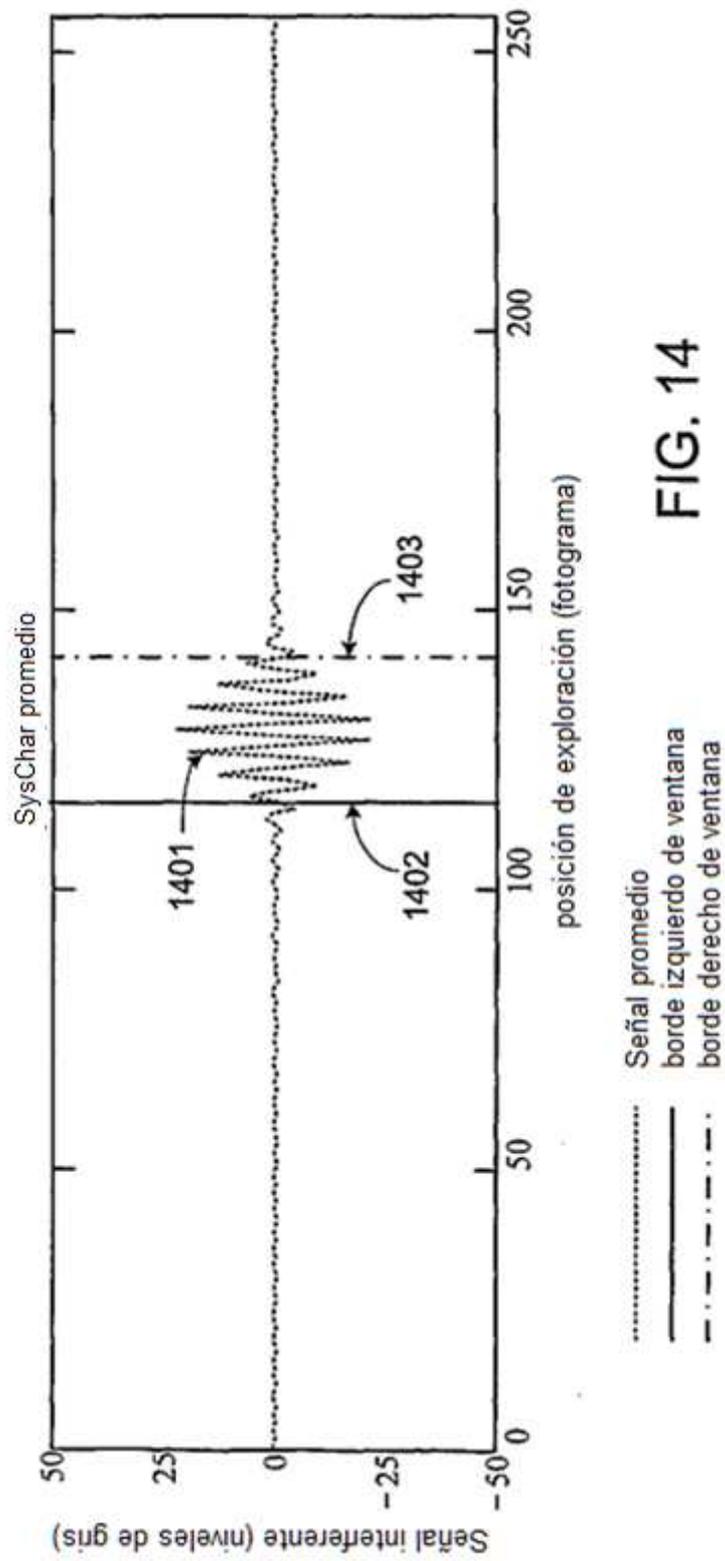


FIG. 14

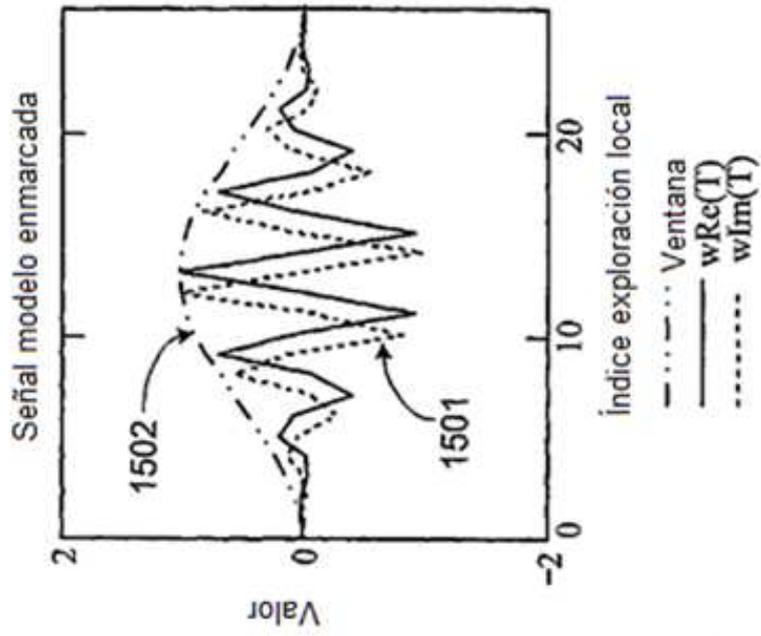


FIG. 15B

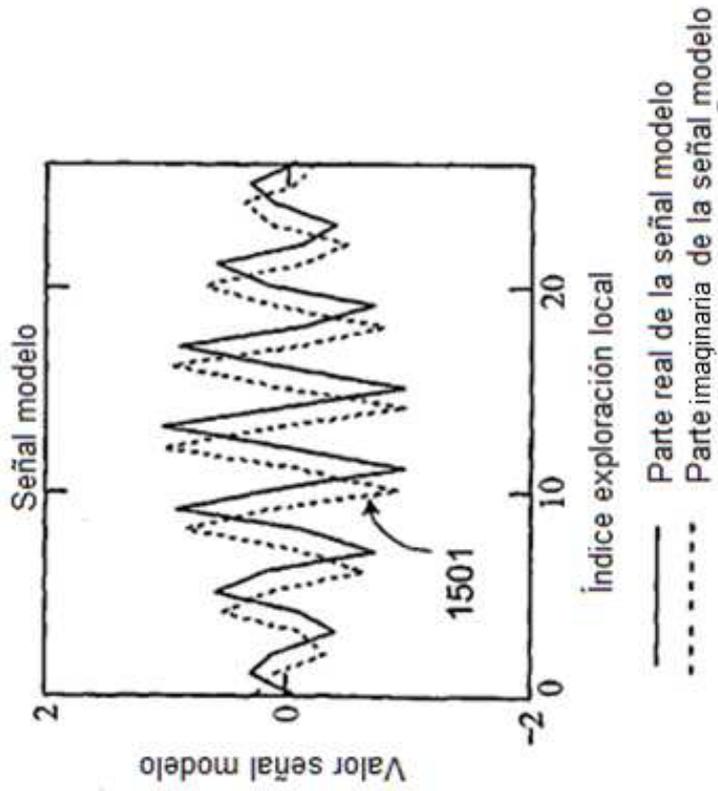


FIG. 15A

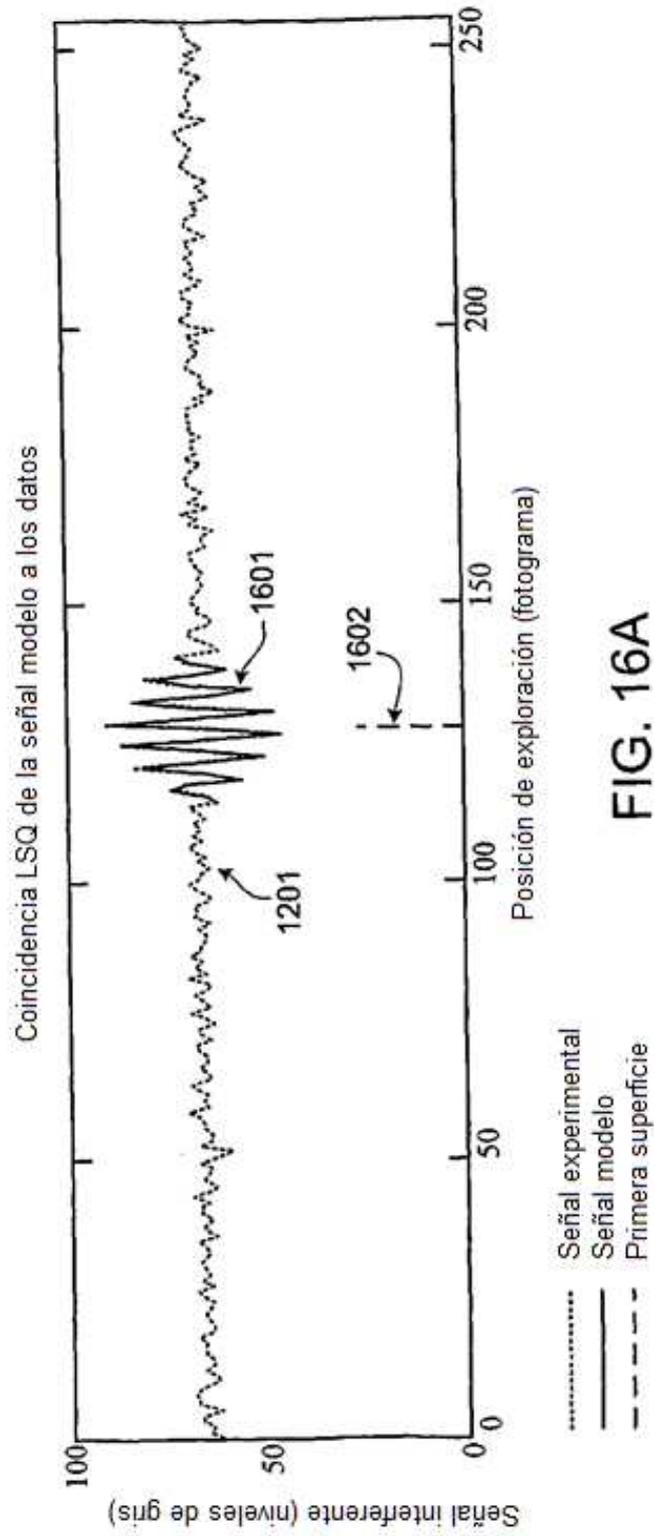


FIG. 16A

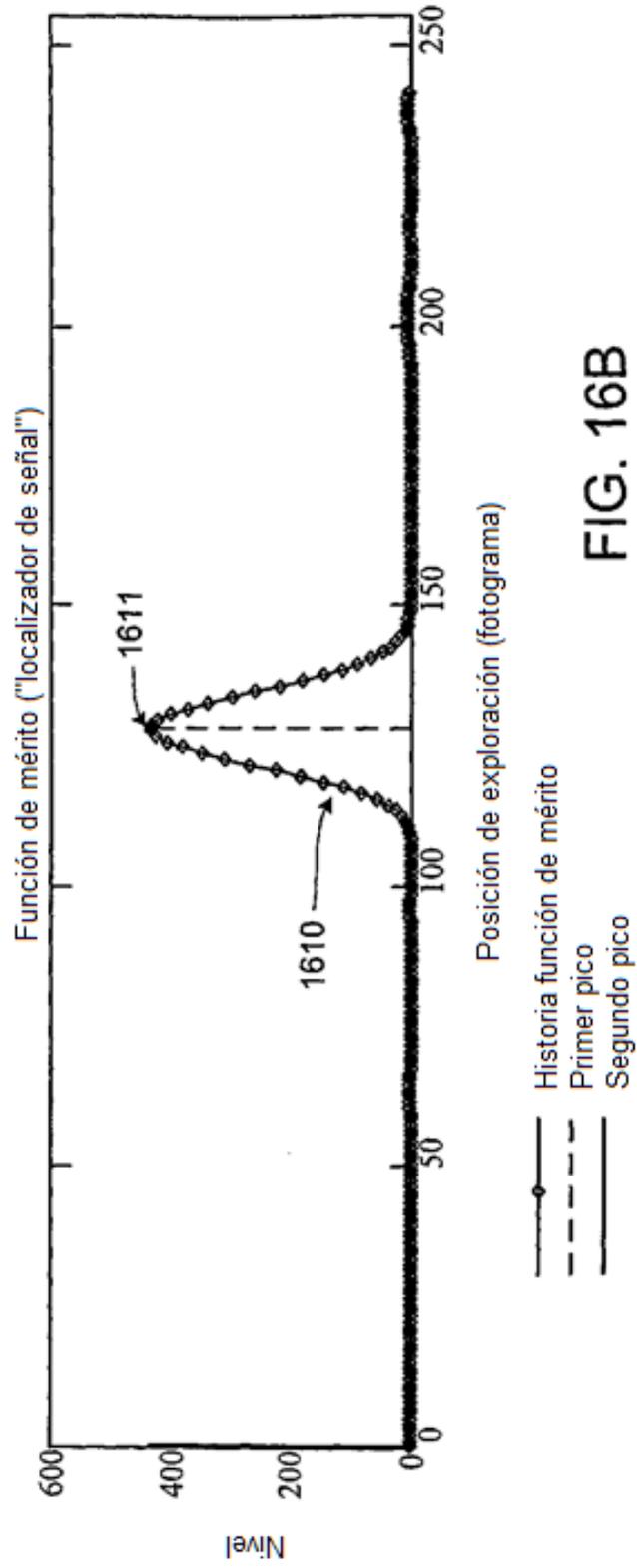


FIG. 16B

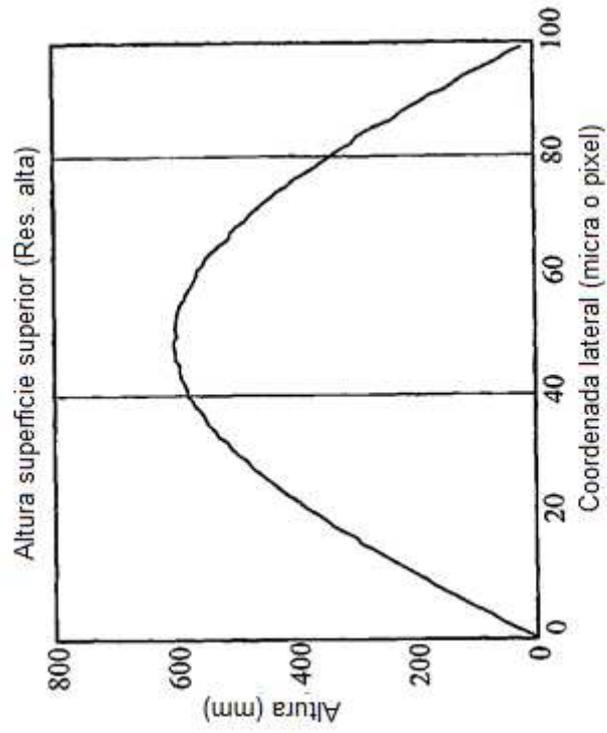


FIG. 17B

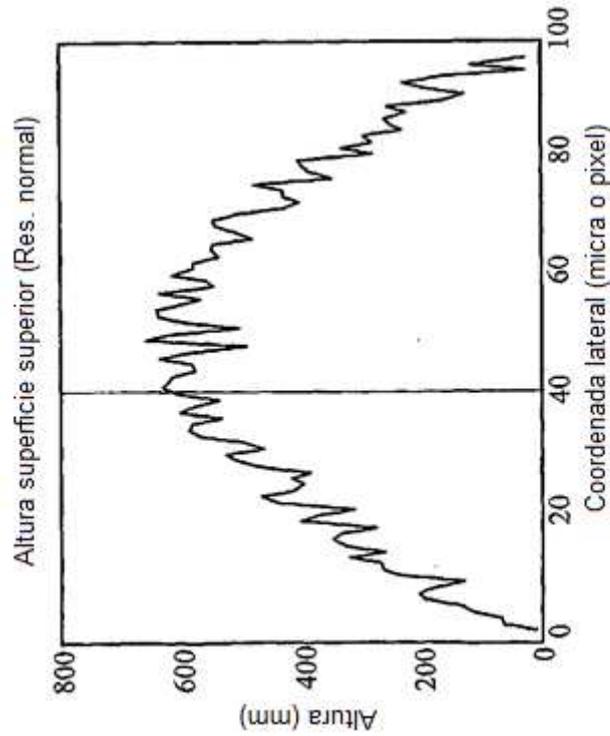


FIG. 17A

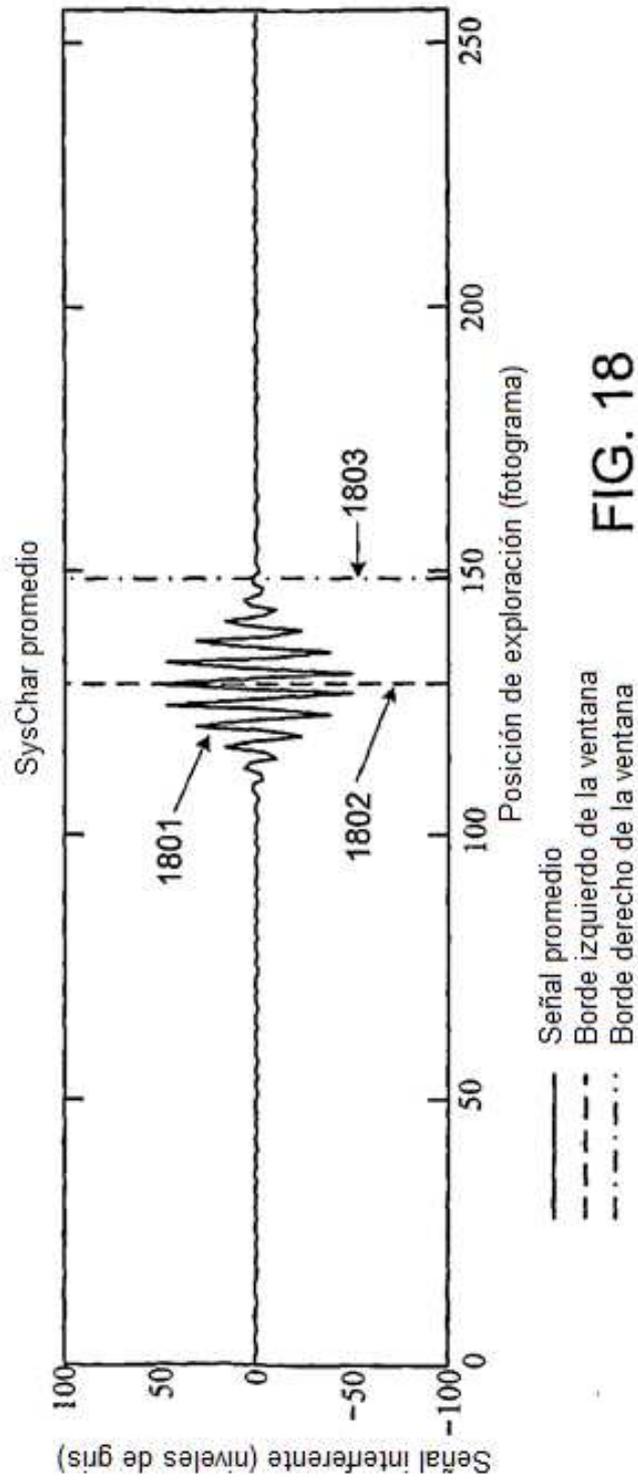


FIG. 18

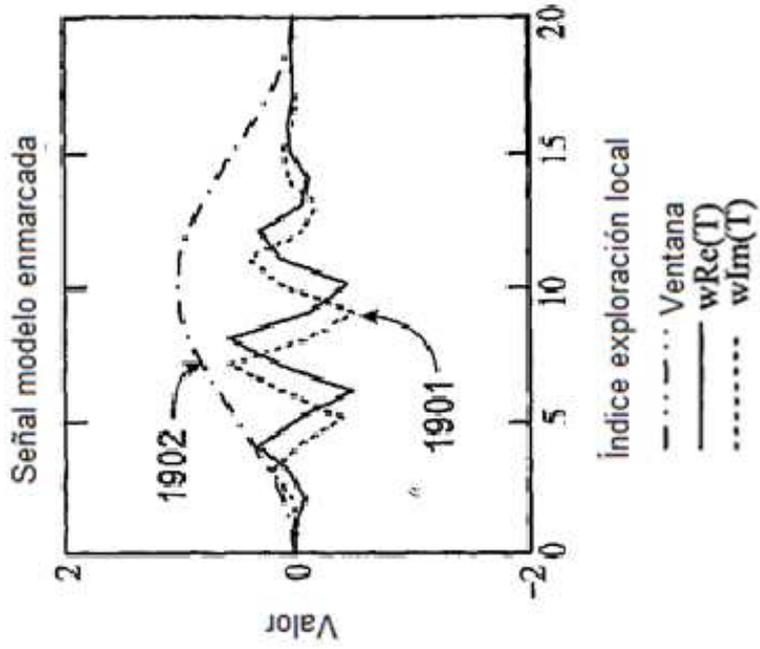


FIG. 19A

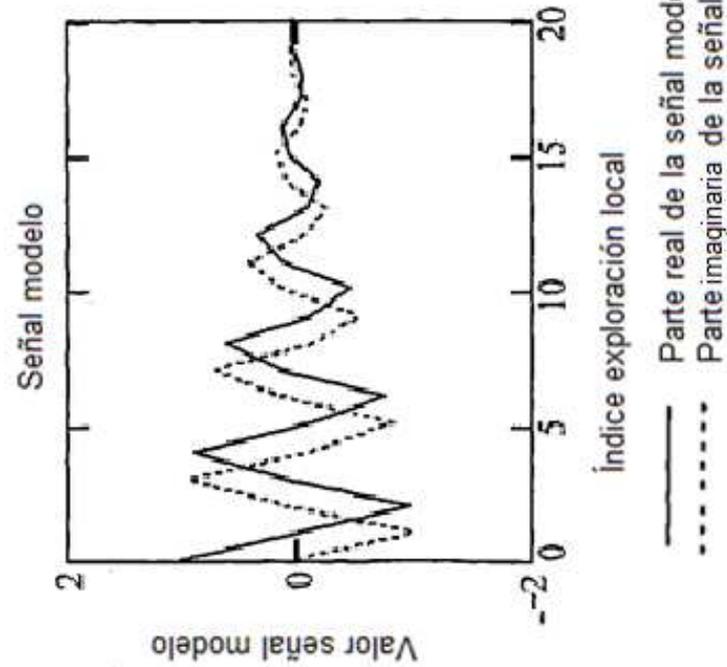


FIG. 19B

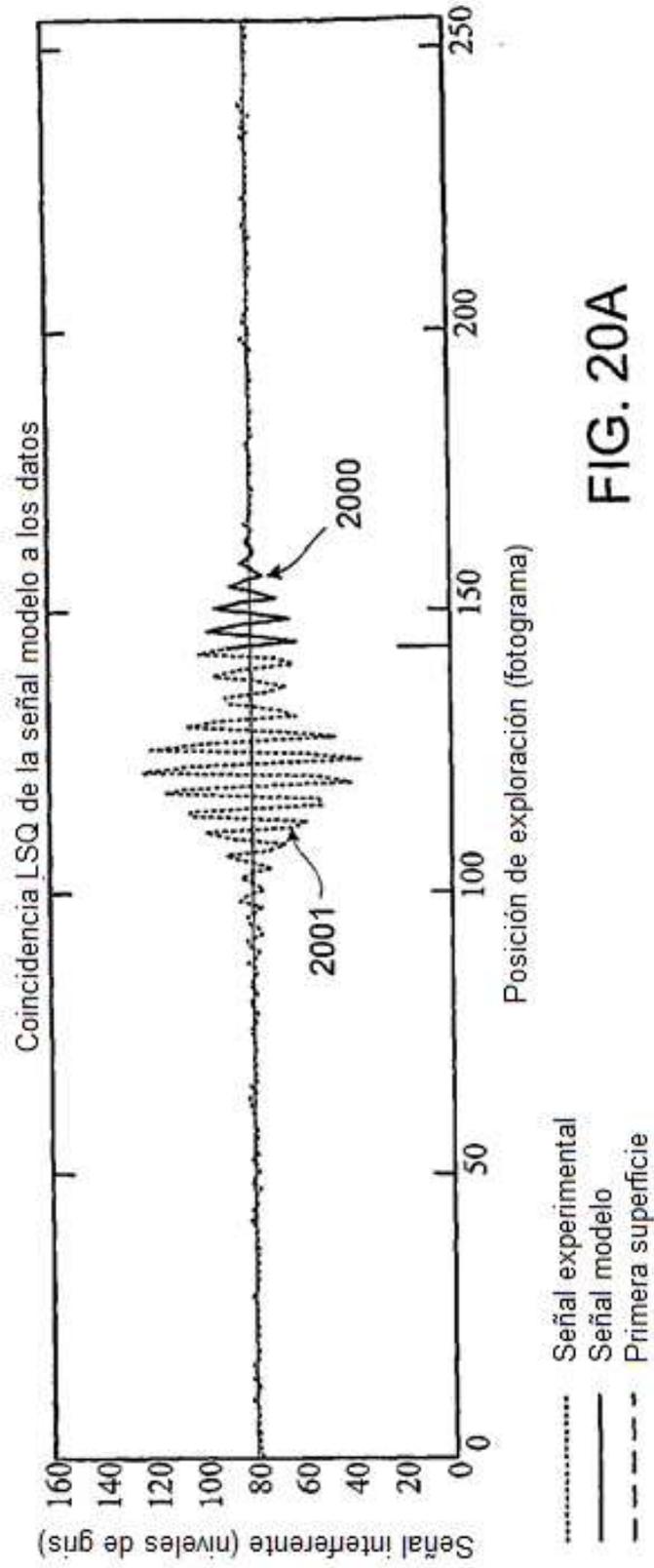


FIG. 20A

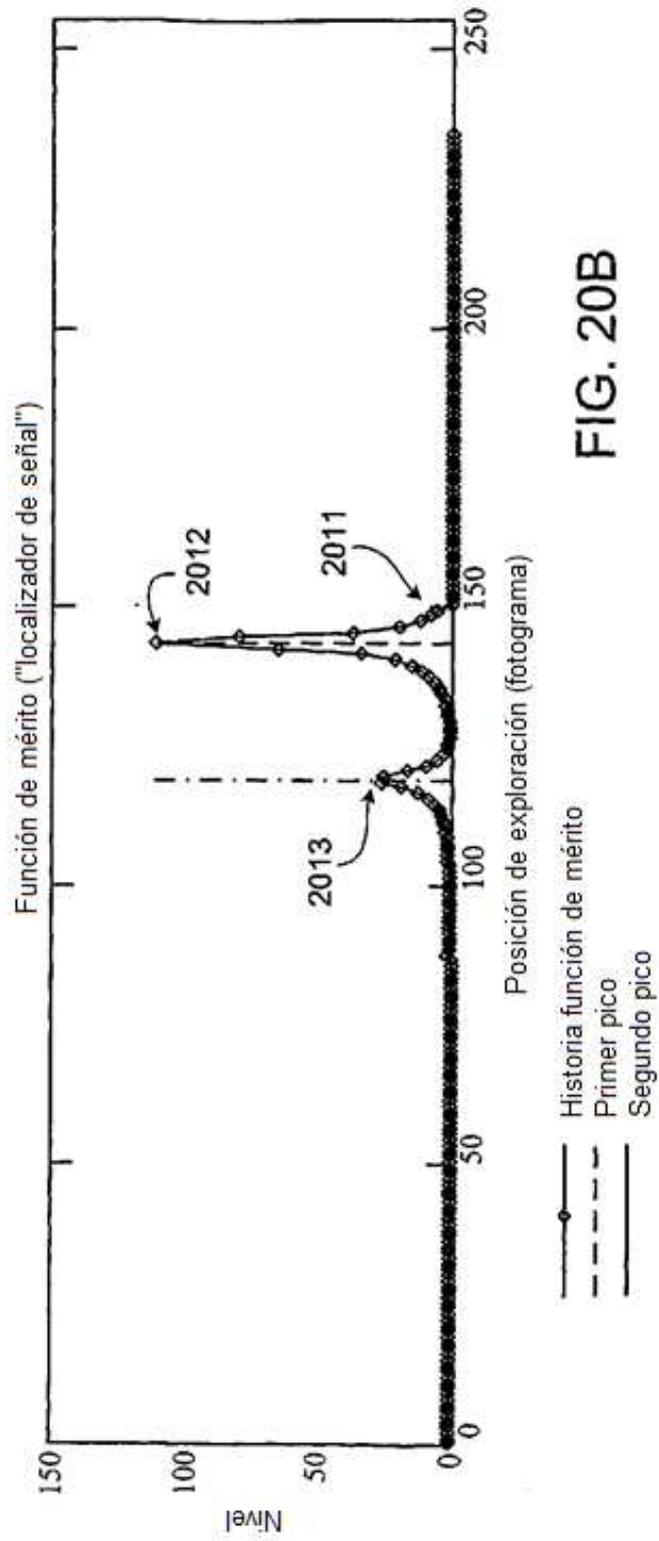


FIG. 20B

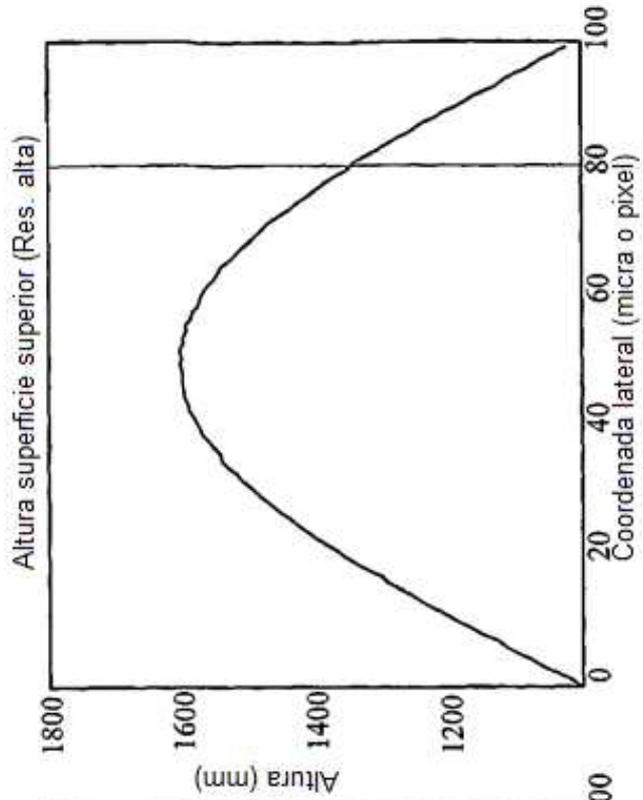


FIG. 21B

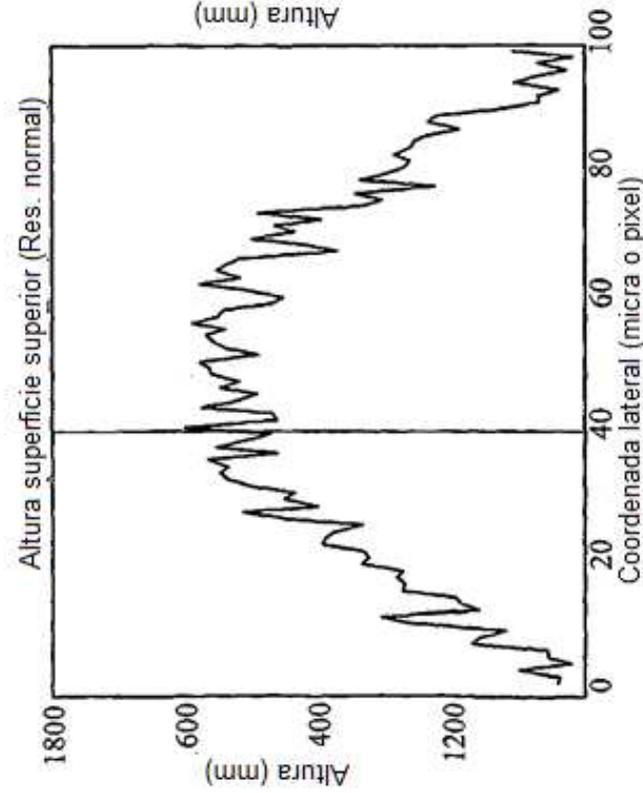


FIG. 21A

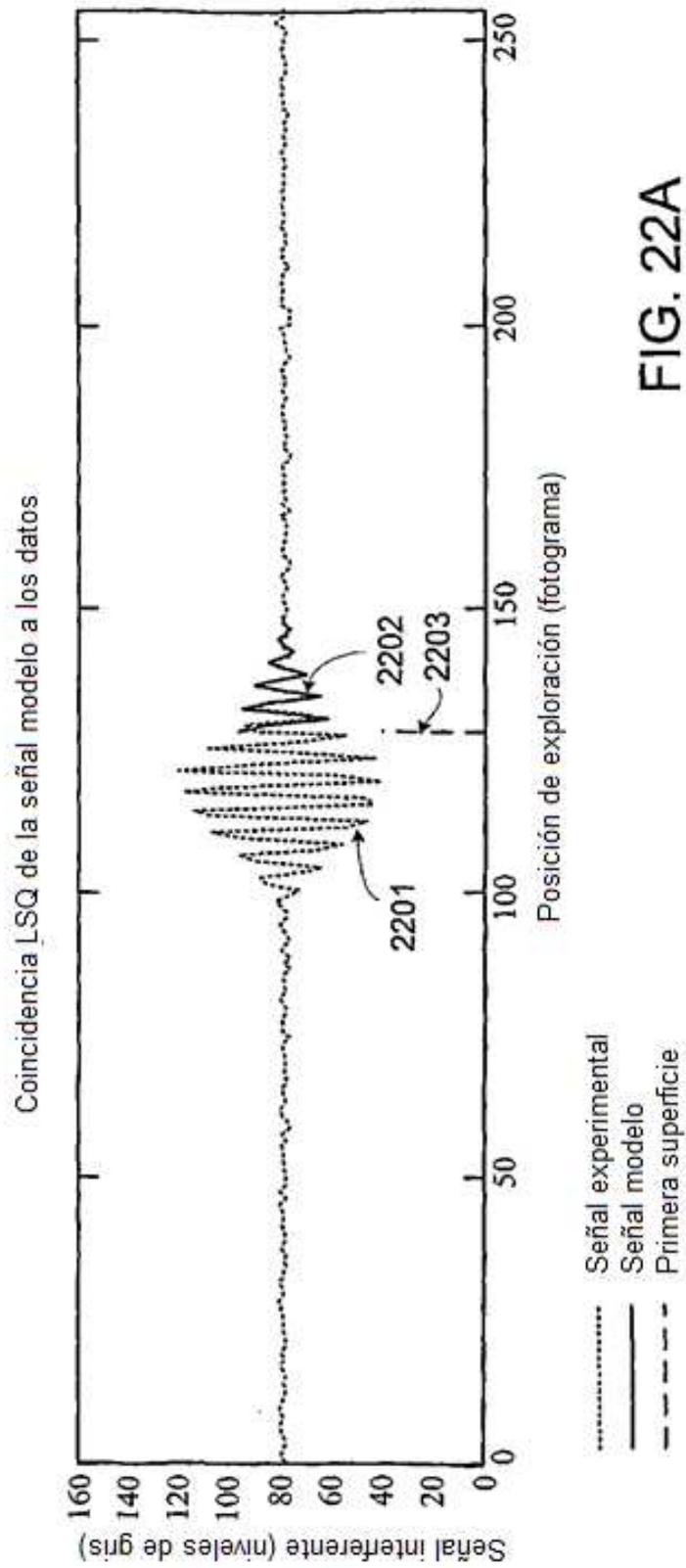


FIG. 22A

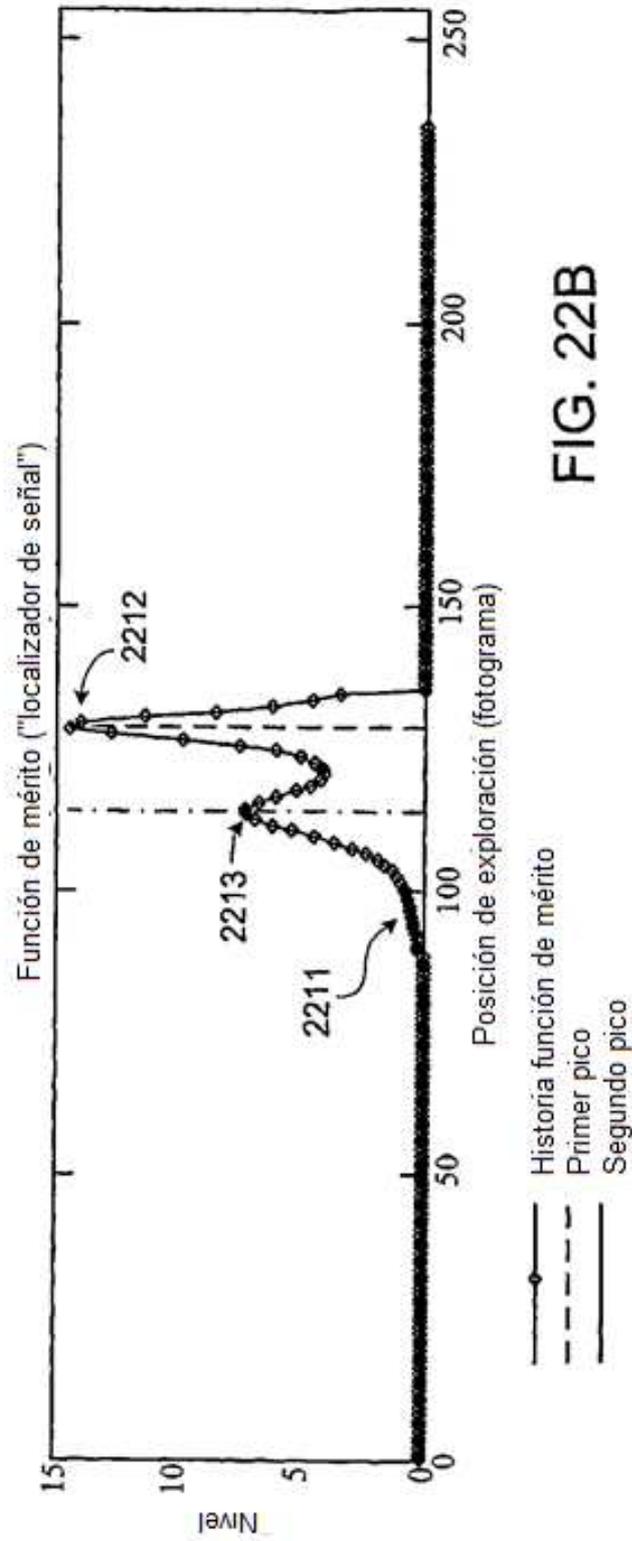


FIG. 22B

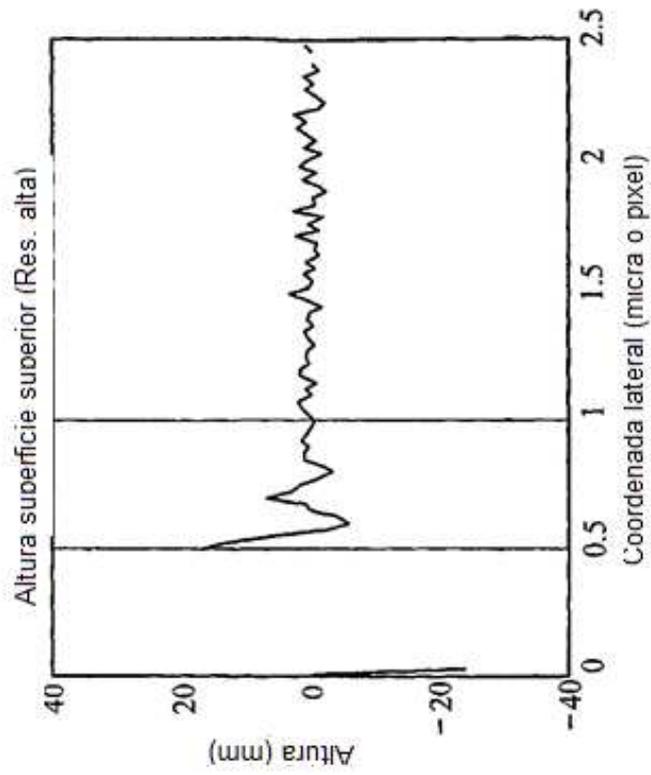


FIG. 23B

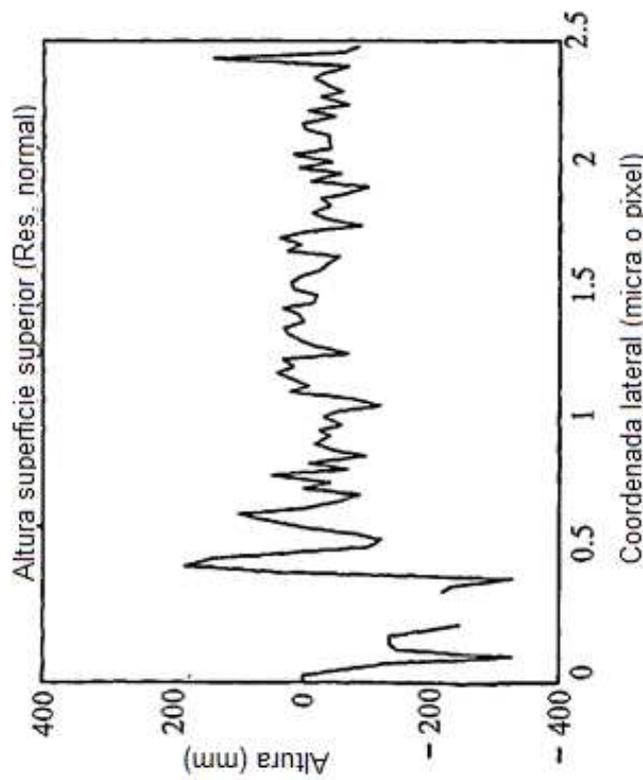


FIG. 23A

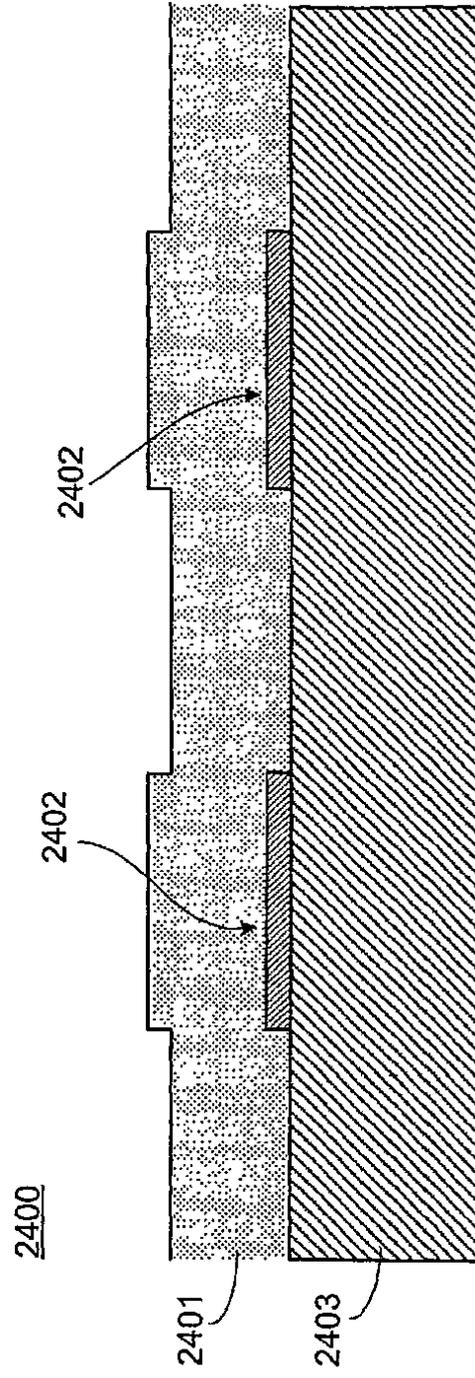


FIG. 24

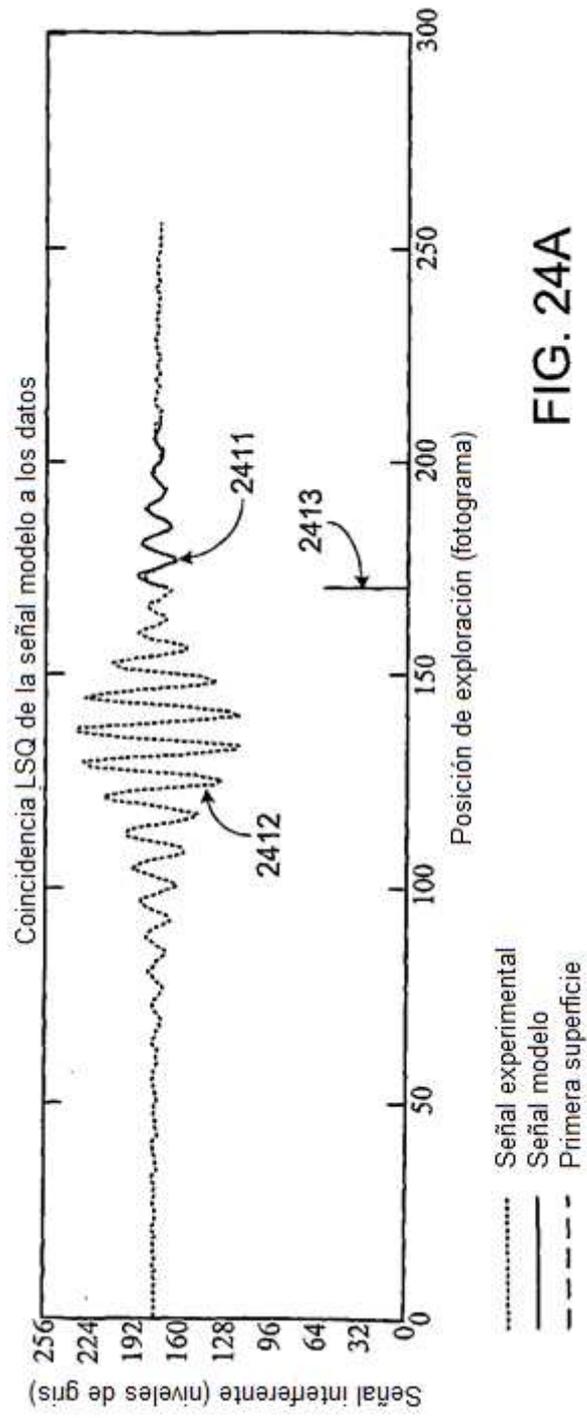


FIG. 24A

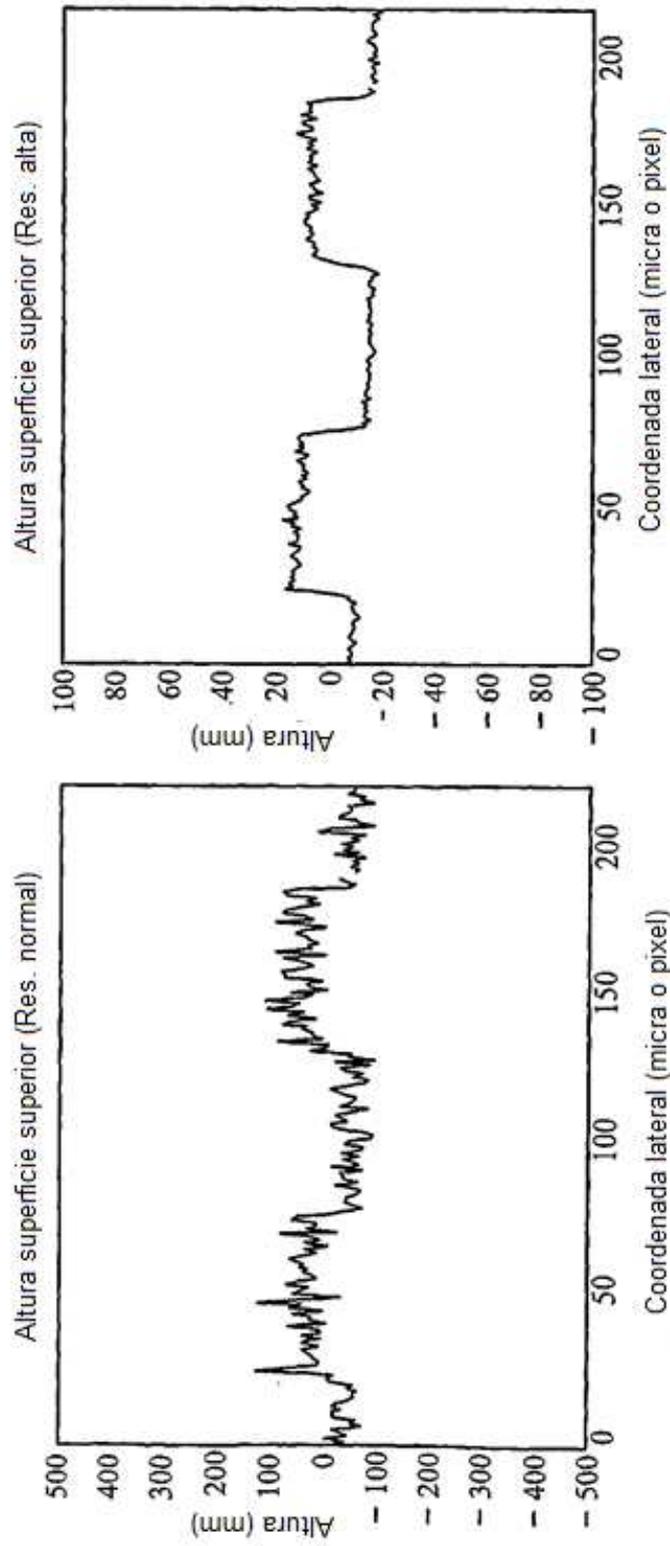


FIG. 25A

FIG. 25B

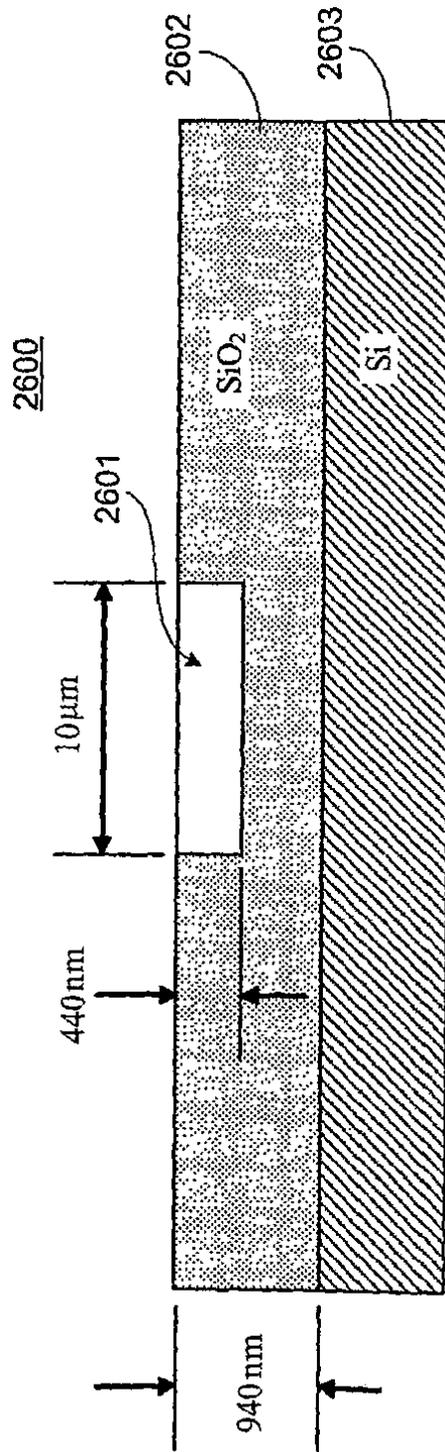


FIG. 26

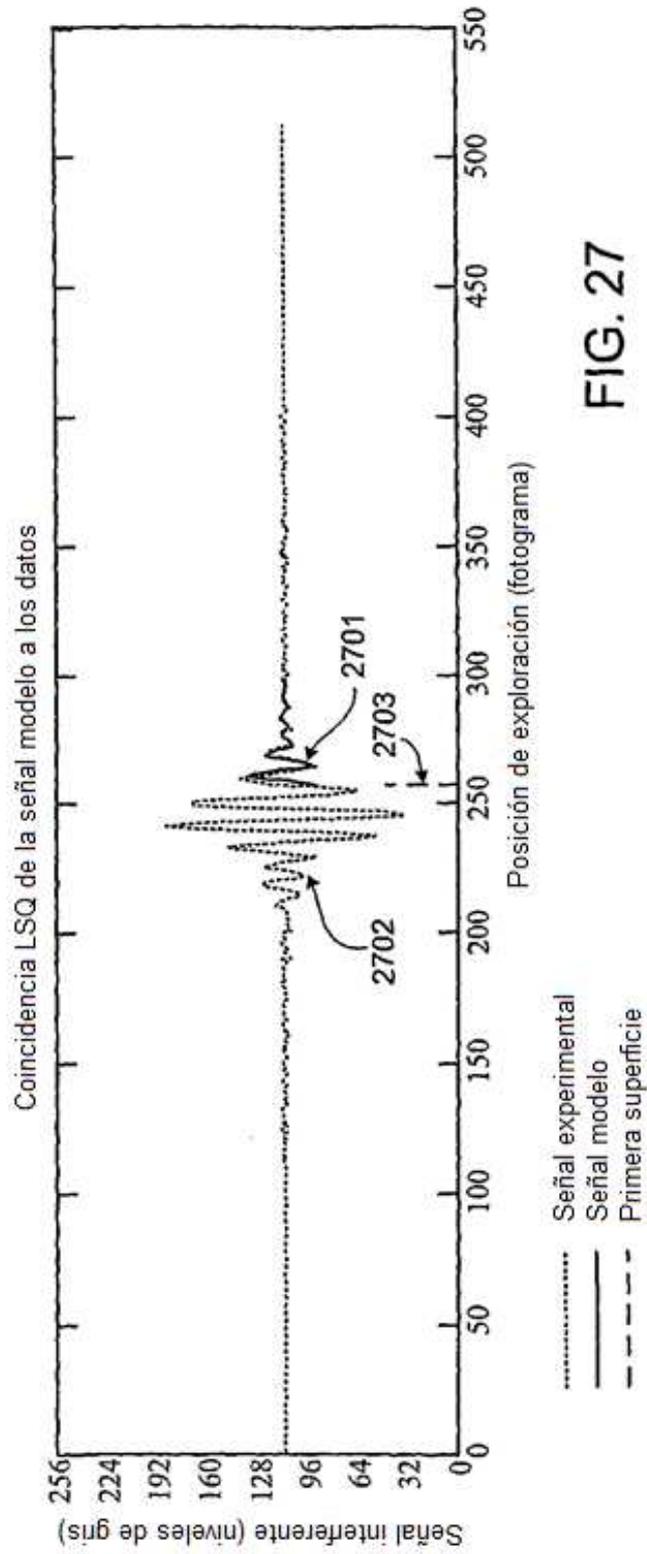


FIG. 27

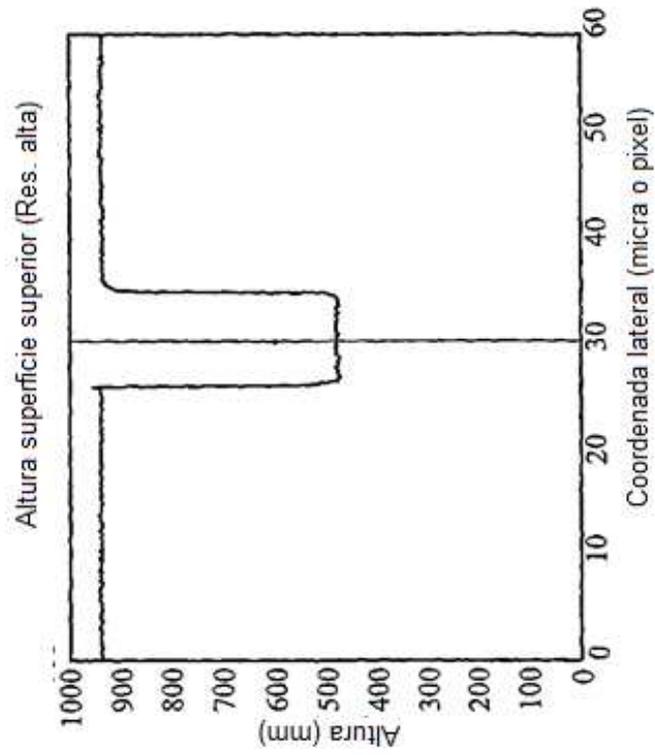


FIG. 28B

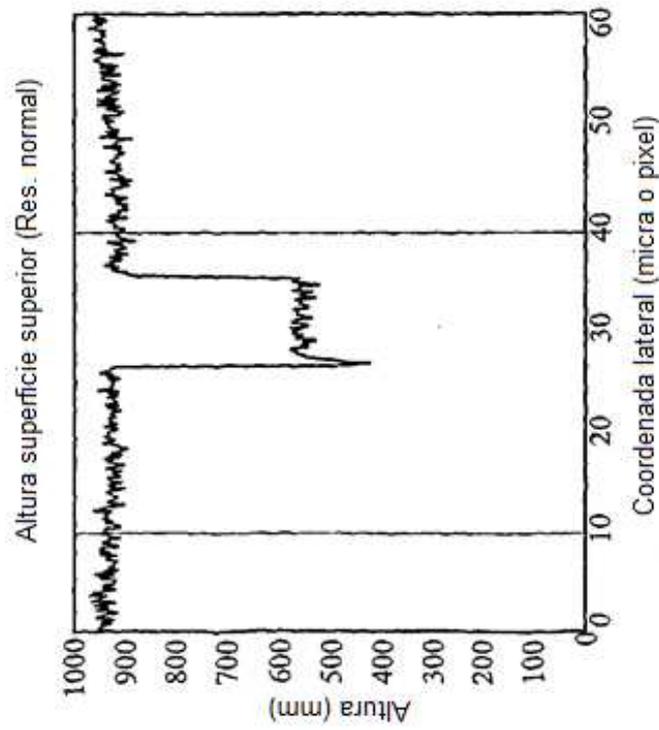


FIG. 28A