



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 031 822 B3 2007.12.06**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 031 822.6**

(22) Anmeldetag: **07.07.2006**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **06.12.2007**

(51) Int Cl.⁸: **G01B 9/02 (2006.01)**
G01B 11/24 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Universität zu Lübeck, 23562 Lübeck, DE

(74) Vertreter:
BOEHMERT & BOEHMERT, 24105 Kiel

(72) Erfinder:
**Hüttmann, Gereon, Dr., 23564 Lübeck, DE; Koch,
 Peter, 23558 Lübeck, DE**

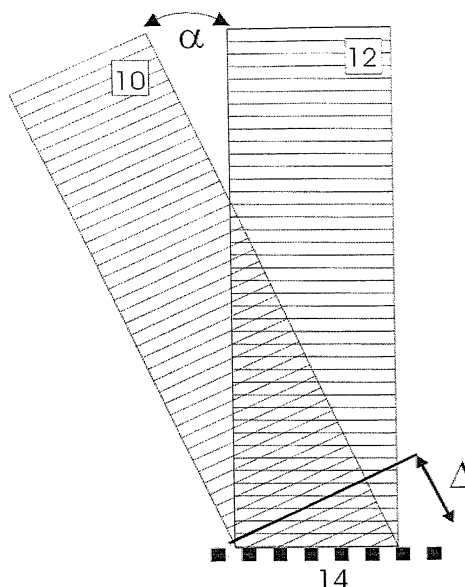
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
DE10 2004 033187 B3
DE 196 15 616 A1
US 59 43 133 A
WO 2002/0 84 263 A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Abtastung optischer Interferenzmuster mit Zeilensensoren**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur elektronischen Abtastung der Intensitätsverteilung eines optischen Interferenzmusters mit einem linearen Bildsensor (26), der eine feste Abtastfrequenz durch seine Pixelbreite vorgibt, wobei das Interferenzmuster durch Überlagerung zweier unter einem beliebigen vorgegebenen Winkel α zueinander einfallender, zeitlich teilkohärenter Strahlen (20, 22) entsteht und Interferenzstreifen mit einer Trägerfrequenz größer als die Abtastfrequenz sowie eine gegenüber der Pixelbreite langsam veränderliche Amplitudenmodulation aufweist, wobei entweder

ein optisches Gitter (24) im Strahlengang des ersten der beiden einfallenden Strahlen und der Bildsensor (26) im Beugungsbild des Gitters so angeordnet wird, dass am Ort des Bildsensors (26) wenigstens ein vom Gitter (24) in Richtung einer Nebenbeugungsordnung ausgehender Strahl und der zweite vom Gitter nicht beeinflusste Einfallstrahl (22; 20) interferieren, und die Strahlen (20, 22) einen Winkel β am Ort des Bildsensors (26) einschließen, der kleiner als α ist,

oder wenigstens ein optisches Gitter (24) im Strahlengang beider einfallender Strahlen angeordnet wird und der Bildsensor (26) im Beugungsbild des Gitters bzw. der Gitter so angeordnet wird, dass am Ort des Bildsensors (26) wenigstens zwei von dem wenigstens einen Gitter ausgehende Strahlen verschiedener Beugungsordnungen der einfallenden Strahlen interferieren, wobei die von dem wenigstens einen Gitter ausgehenden Strahlen einen Winkel β am Ort des ...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Abtastung optischer Interferenzmuster mit Zeilensensoren nach dem Oberbegriff des Hauptanspruches. Insbesondere wird ein Verfahren zur Abtastung optischer Interferenzmuster, die sich bei der Überlagerung zweier zeitlich teilkohärenter, nicht-paralleler Lichtstrahlen auf einem linearen Bildsensor ergeben, beschrieben.

[0002] Ein Beispiel für einen linearen Bildsensor ist ein Zeilensensor, der aus linear nebeneinander angeordneten, lichtsensitiven Pixeln besteht, die elektronisch ausgelesen werden können, um etwa ein Interferenzmuster mit einer Messeinrichtung, z.B. einem PC, zu erfassen. Ein linearer Bildsensor kann auch mehrere nebeneinander angeordnete Pixelzeilen umfassen. Im Folgenden wird exemplarisch von einfachen Zeilensensoren gesprochen.

[0003] Derartige Abtastvorgänge optischer Interferenzsignale sind gängig bei der optischen Kohärenztomographie (OCT), insbesondere bei ihrer Ausführung ohne bewegliche Komponenten, wie sie beispielsweise in der WO 2002/084263 A1 vorgestellt wird. Es ist ebenfalls bekannt, dass die Scantiefe einer solchen „NoMotion-OCT“ a priori sehr begrenzt ist im Vergleich zu anderen OCT Verfahren, bei denen Scantiefen von einigen Millimetern erreicht werden.

[0004] Zum Erzielen einer vergleichbaren Scantiefe kann beispielsweise anstelle eines Spiegels im Referenzarm eines Michelson-Interferometers auch ein so genannter Stufen-Spiegel verwendet werden, der Anteile des Referenzstrahls mit unterschiedlichen Weglängen reflektiert. Ein solcher Spiegel, der Stufenhöhen im Bereich von Mikrometern aufweisen muss, ist allerdings nicht einfach herzustellen.

[0005] Praktisch einfacher ist deshalb die Lösung der DE 196 15 616 A1, in der der Referenzarmspiegel durch ein verkipptes Reflexionsgitter ersetzt wird. Es entstehen Reflexe in die Richtungen der Beugungsordnungen des Gitters, und einer dieser reflektierten Strahlen wird auf den Detektor gelenkt. Mit einer im Beugungsbild des Gitters – im Raumwinkelbereich einer ausgewählten Beugungsordnung – angeordneten Strahloptik (Linse) werden die einzelnen Gitterstriche auf unterschiedliche Pixel des Detektors abgebildet, um eine nach Pixeln geordnete Laufzeitverteilung des Referenzlichtstrahls zu erzielen. Dadurch befindet sich der Detektor selbst nicht mehr im Beugungsbild; insbesondere macht die Abbildung das Auseinanderlaufen verschiedener spektraler Anteile durch Gitterbeugung auf dem Detektor rückgängig. In der Darstellung der DE 196 15 616 A1 liegt das Gitter nur teilweise in der Brennebene der Strahloptik, so dass die Abbildung nicht auf allen Pixeln gleich

gut gelingen wird, was zusätzliche Auswertungsprobleme schafft.

[0006] Beim Messaufbau der Druckschrift US 5 943 133 ist dieses Problem umgangen, da das Reflexionsgitter, die Brennebene und der Detektor exakt parallel liegen. Mess- und Referenzlichtstrahl werden über dasselbe Gitter derart gebeugt, dass Reflexe beider Strahlen zu unterschiedlichen Beugungsordnungen praktisch parallel auf dem Detektor eintreffen. Auch hier wird am Detektor nicht das Beugungsbild des Gitters, sondern sein Abbild erfasst. Die Abbildung des Gitters auf den Detektor dient wie oben der praktischen Realisierung eines Stufen-Spiegels, aus dem sich eine klar definierte Laufzeitverteilung auf den Detektorpixeln ergibt. Durch gleichzeitige Reflexion von Mess- und Referenzlicht hat dieser virtuelle Stufen-Spiegel im Vergleich zur DE 196 15 616 A1 nun die doppelte Stufenhöhe.

[0007] Die präzise Abbildung des fein strukturierten Gitters (Strukturgrößen von einigen Mikrometern sind aufzulösen) stellt allerdings hohe Anforderungen an die Strahloptik, wobei überdies Abberation als eine weitere Fehlerquelle in der Auswertung zu berücksichtigen ist.

[0008] In anderen Messaufbauten, wie z.B. dem der WO 2002/084263 A1, kann man ganz auf eine Abbildungsoptik verzichten. Tatsächlich wird man hier für gewöhnlich nur eine Strahlfokussierung senkrecht zur Sensorzeile einrichten, z.B. mit einer Zylinderlinse, um eine Intensitätssteigerung des Messlichts auf dem Detektor zu erzielen. Dies ist für die Auswertung unproblematisch.

[0009] Beim Aufbau der WO 2002/084263 A1 kann die Scantiefe besonders einfach vergrößert werden, indem man bei der Überlagerung auf dem Zeilensensor den Referenzstrahl gegen den Probenstrahl verschenkt. Aber dies hat zugleich eine feinere räumliche Struktur des Betrages des elektrischen Feldes – und damit der Lichtintensitätsverteilung – unmittelbar am Detektor zur Folge. Man erhält deshalb eine sehr viel höhere Anzahl von Interferenzstreifen auf derselben Detektorfläche. Insbesondere treten nun üblich mehrere Interferenzstreifen pro Pixel auf. Das Abtasttheorem verlangt aber zur Abtastung eines Sinuswellenzuges mindestens zwei Abtastungen pro Wellenlänge. Die Unterabtastung des Interferenzsignals ist mit Zeilensensoren sehr ungünstig, da diese nur integrierend über Pixelflächen messen können, so dass ein zu niedrig abgetastetes Signal nicht ohne weiteres rekonstruiert werden kann. Für eine zweckmäßige Auswertung ist die Unterabtastung zu vermeiden.

[0010] Bis heute ist es keine technisch gut praktikable Lösung des Abtastproblems, einen Sensor mit höherer Pixeldichte zu verwenden (Pixelanzahl ca. 10.000), da diese teuer in der Fertigung und überdies

schwer auszulesen sind. Gängige Zeilensensoren haben etwa 1.000 Pixel.

[0011] Die DE 10 2004 033 187 B3 zeigt einen einfachen Ausweg auf für den Fall, dass man nicht an der Erfassung des kompletten Interferenzmusters, sondern lediglich am mittleren Verlauf seiner Intensitätsamplitudenverteilung interessiert ist. Dies ist die wahre Messaufgabe der OCT. Das optische Interferenzsignal erscheint als eine amplitudenmodulierte, schnell oszillierende Intensitätsverteilung entlang der Sensorzeile, wobei nicht die Interferenzstreifen, sondern deren Einhüllende die Probeninformation trägt. Mit dem Begriff Oszillation ist hier eine zeitlich stationäre Trägerfrequenz gemessen als reziproke Länge auf dem Bildsensor gemeint.

[0012] Konkret bei der OCT, bei der kurzkohärentes Licht verwendet wird, ist die Einhüllende eine Faltung aus der Kohärenzfunktion mit einem Interferenzsignal, das durch die Laufzeitverteilung in der Probe entsteht. Die Kohärenzfunktion wird für eine Lichtquelle einmalig bestimmt, dann ist die Laufzeitverteilung aus der Einhüllenden berechenbar. Die DE 10 2004 033 187 B3 schlägt deshalb vor, die Unterabtastung des Interferenzmusters durch ein geeignetes Maskieren des Zeilensensors zu vermeiden. Die dabei zu verwendende periodische Maske multipliziert das Interferenzsignal derart, dass langsam oszillierende Anteile entstehen, die mit der gegebenen Pixelauflösung gut abtastbar sind. In der Sprache der Nachrichtentechnik wird auf ein niederfrequentes Zwischenband gemischt. Der Nachteil dieser Maßnahme ist allerdings, dass große Anteile des von der Probe zurück gestreuten, ohnehin schon schwachen Nutzlichts mit Probeninformation durch den Mischvorgang ausgeblendet werden.

[0013] Im Folgenden soll vorausgesetzt werden, dass sich auf einem Zeilensensor ein Interferenzmuster durch Überlagerung zweier zeitlich teilkohärenter, nicht-parallel einfallender Lichtstrahlen ergibt, das mit der gegebenen Pixeldichte des Sensors nicht vollständig gemäß Nyquist-Bedingung abgetastet werden kann. Das Interferenzmuster soll im Wesentlichen durch eine Trägerfrequenz (ausgedrückt als Zahl der Interferenzstreifen pro Pixel) und eine Amplitudenmodulation gekennzeichnet sein. Dabei soll die Amplitudenmodulation gegenüber der Trägerwelle als langsam veränderlich, insbesondere über eine einzelne Pixelbreite als näherungsweise konstant, vorausgesetzt werden. Letzteres stellt im Grunde keine Einschränkung dar, da dies bei jedem praktischen Messaufbau der Fall ist. Welche Bedeutung die Amplitudenmodulation im Einzelfall besitzt, soll dahingestellt bleiben.

[0014] Es ist die Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren anzugeben, mit dem sich die Amplitudenmodulation eines optischen Interferenzsignals unter den vor-

genannten Voraussetzungen mit dem Zeilensensor gut erfassen lässt, ohne dass es zur Unterabtastung (unterhalb der Nyquist-Frequenz) kommt.

[0015] Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1. Die Unteransprüche geben vorteilhafte Ausgestaltungen an.

[0016] Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst das Beugen mindestens eines der zwei ursprünglich zur Interferenz zu bringenden Lichtstrahlen an einem in den Strahlengang eingebrachten Gitter. Es kann sich dabei um ein Transmissions- oder Reflektionsgitter handeln. Sofern einer der Strahlen nicht an einem Gitter gebeugt wird, wird er im Folgenden als auf den Zeilensensor einfallender Lichtstrahl der nullten (0.) Beugungsordnung bezeichnet.

[0017] Die vom Gitter ausgehende, wenigstens eine Strahlenschar des wenigstens einen gebeugten Strahls ergibt sich durch konstruktive Interferenz am Gitter. Die Strahlen einer Schar treten entsprechend der verschiedenen Beugungsordnungen unter verschiedenen Winkeln aus dem Gitter aus.

[0018] Erfindungsgemäß sollen nun auf dem Zeilensensor wenigstens zwei Strahlen unterschiedlicher Beugungsordnung zur Interferenz gebracht werden, die einen kleineren Winkel einschließen als die beiden ursprünglichen Strahlen.

[0019] Bevorzugt wird eine wellenlängenabhängige Aufspaltung des wenigstens einen gebeugten Lichtstrahls zugelassen und nicht durch eine Abbildungsoptik kompensiert. Das Gitter wird nicht auf den Detektor abgebildet. Der Detektor ist in einem Abstand hinter dem Gitter anzuordnen, der das Interferieren von Elementarwellen ausgehend von allen beleuchteten Gitterstrichen auf dem Detektor gestattet, d.h. der Detektor soll sich im Beugungsbild des Gitters befinden.

[0020] Die Erfindung wird näher erläutert anhand der Figuren:

[0021] [Fig. 1](#) zeigt schematisch den Laufzeit- bzw. Weglängenunterschied, der durch das Verschwenken der Einstrahlrichtungen entsteht;

[0022] [Fig. 2](#) skizziert den Effekt der Erfindung, durch den die effektive Trägerfrequenz des Interferenzsignals offensichtlich herabgesetzt wird,

[0023] [Fig. 3](#) verdeutlicht den Unterschied zwischen der Lage der Wellenfront und der des Kohärenzortes nach Durchlaufen eines Prismas (links) und eines Gitters (rechts).

[0024] Aus [Fig. 1](#) ist ersichtlich, dass der Winkel α zwischen den Lichtstrahlen die Laufzeitverteilung

des Lichts auf der Sensorzeile unmittelbar beeinflusst. Der von links einfallende Lichtstrahl **10** erreicht das linke Ende des Detektors **14** deutlich früher als das rechte, so dass entlang des Zeilensensors **14** der Weglängenunterschied Δ für den Strahl **10** fest eingerichtet ist. Der senkrecht einfallende Strahl **12** hingegen weist keinerlei Laufzeitunterschied in der Sensorebene auf. Die Interferenzstreifen ergeben sich unmittelbar aus der räumlichen Struktur der Intensität des superponierten elektrischen Feldes vor dem Sensor **14**, welches offensichtlich durch den Winkel α zwischen den dargestellten Wellenfronten bestimmt wird.

[0025] Es ist sofort klar, dass eine Abnahme dieses Winkels (gegen Null) die Trägerfrequenz des Interferenzsignals verringern und das Abtastproblem lösen würde. Der durch das Verschwenken erzielte Weglängenunterschied Δ entlang der Sensorzeile **14** – der der Scantiefe in der OCT entspricht – würde sich jedoch entsprechend verringern.

[0026] **Fig. 2** zeigt eine Möglichkeit der erfindungsgemäßen Lösung. Hier werden zwei Strahlen **20** und **22** unter Einfallswinkeln β_S und β_R durch dasselbe Gitter **24** geführt und daran gebeugt. Auf dem Detektor **26** interferieren unterschiedliche Beugungsordnungen der beiden Strahlen **20** und **22**, wobei die hinter dem Gitter **24** auf den Detektor **26** treffenden Strahlen nun einen sehr viel kleineren Winkel einschließen. Der entscheidende Punkt der Erfindung ist die Richtungsänderung wenigstens eines der beiden Lichtstrahlen durch Gitterbeugung. Der andere kann am Gitter vorbei geführt bzw. es kann die 0. Beugungsordnung benutzt werden.

[0027] Bei der Gitterbeugung interferiert eine große Zahl von Elementarwellen, die an den einzelnen Gitterlinien entstehen. Unter der konstruktiven Interferenzbedingung, dass die Elementarwellen zueinander Laufzeitunterschiede von ganzzahligen Vielfachen der Wellenlängen aufweisen, geht deshalb vom Gitter eine Strahlenschar zu den unterschiedlichen Beugungsordnungen unter verschiedenen Winkeln aus. Dabei ist der Strahl zur 0. Beugungsordnung per Definition parallel zum auf das Gitter einfallenden Strahl und weist keinen Laufzeitunterschied der Elementarwellen auf. Die Wellenfronten der n . Beugungsordnung ($n \neq 0$, auch: Nebenbeugungsordnung) setzen sich aus diskreten $n \cdot \lambda$ verschobenen Laufzeiten zusammen, wobei die Gesamtlaufzeitdifferenz $\Delta = N \cdot n \cdot \lambda$ beträgt (N = Anzahl der beitragenden Gitterlinien).

[0028] Die erfindungsgemäß vorgesehene Lichtablenkung erfolgt durch Beugung am Gitter, nicht durch Reflexion an einem Spiegel oder Brechung an einem Prisma. Bei der Reflexion am Spiegel sind die Laufzeiten aller Strahlanteile identisch, und der beabsichtigte Effekt des Verschwenkens des Referenzstrahls

ist am Detektor schlicht aufgehoben. Beim Prisma rührt die Ablenkung von der verringerten Lichtgeschwindigkeit im Medium her und von der Bedingung, dass die Orte einer Wellenfront vor oder hinter dem Prisma stets durch dieselbe zurückgelegte optische Weglänge gekennzeichnet sind.

[0029] **Fig. 3** zeigt exemplarisch am Vergleich der Lichtablenkung durch Prisma **30** und Gitter **32**, wie sich die Lage der Wellenfront **34** jeweils zur Lage des Kohärenzortes **36** (im linken Bild identisch mit **34**) verhält. Insbesondere kurzkohärentes Licht (in der Zeichnung angedeutet) verliert also seine strahlinterne Kohärenz proportional zum Ablenkungswinkel bei Beugung am Gitter. In der OCT wird eben dies genutzt bei der Überlagerung mit dem Probenstrahl, der eine streutiefenabhängige Laufzeitverteilung aufweist, um die Laufzeiten auf die Detektorpixelkoordinaten abzubilden.

[0030] Kurzkohärentes Licht, das ein Wellenlängenspektrum umfasst, wird sowohl durch Prisma als auch durch Gitter wellenlängenabhängig abgelenkt. Beim Prisma tritt dabei typisch nichtlineare Dispersion auf, wodurch die Gesamtintensitätsverteilung gestört wird. Diese Störung ist nicht ohne weiteres – wenn überhaupt – bei der Auswertung der aufgezeichneten Interferenzsignale zu kompensieren.

[0031] Die Gitterbeugung erzeugt demgegenüber durch Interferenz eine achromatische Phasenverschiebung, wobei diese keinerlei Auswirkungen auf die Gestalt der zu messenden Amplitudenmodulation besitzt. Dies lässt sich durch eine analytische Berechnung des Interferenzsignals für breitbandiges Licht mit bekannter spektraler Verteilung nachweisen, die aber hier nicht wiedergegeben werden soll.

[0032] Formal gesprochen, sind die beiden zu überlagernden Strahlen durch Wellenzahlvektoren k charakterisiert, deren Beträge von der Wellenlänge der Strahlung abhängen und deren Richtungen den Einstrahlrichtungen (auf Gitter bzw. Detektor) entsprechen. Trifft einer der Strahlen auf ein Gitter, so sendet dieses eine Strahlenschar mit k -Vektoren aus, die sich zwischen den Einzelstrahlen gerade jeweils um einen reziproken Gittervektor unterscheiden, d.h. nur hinsichtlich der Parallelkomponente bezogen auf die Ausrichtung des Gitters.

[0033] Das erfindungsgemäße Vorgehen beinhaltet nun mit anderen Worten, dass im Beugungsbild des Gitters jene Anteile der beiden ursprünglichen Strahlen auf dem Detektor überlagert und gemessen werden sollen, deren Differenz der Parallelkomponenten ihrer k -Vektoren minimal ist. Dabei gestattet das Gitter, solche Differenzen zu finden, die kleiner sind als die der ursprünglichen, zueinander verschwenkt einfallenden Lichtstrahlen. Die Ablenkung der Strahlen am Gitter macht die durch das Verschwenken einge-

richtete Laufzeitverteilung auf dem Detektor nicht rückgängig, behebt aber das Abtastproblem durch die Überlagerung nahezu paralleler Phasenfronten auf dem Detektor. Das spektrale Auseinanderlaufen der gebeugten Strahlen hat überraschenderweise keinen Einfluss auf die Amplitudenmodulation des mit den gebeugten Strahlen erzeugten Interferenzmusters. Darin liegt das grundlegend Neue, das das erfindungsgemäße Vorgehen erlaubt. Dem Fachmann ist dieser Sachverhalt bisher nicht geläufig.

[0034] Es ist dem Fachmann ebenfalls nicht von vornherein klar, dass der Verzicht auf die übliche Abbildung des Gitters auf den Detektor (siehe DE 196 15 616 A1 und US 5 943 133) keinen Nachteil für die Messung bedeutet, sondern vielmehr eine teure Strahl-optik und den Ausgleich ihrer Fehler bei der Auswertung vermeidet.

[0035] Für gewöhnlich ist die verwendete Lichtquelle fest gewählt und in ihren Eigenschaften gut bekannt. Zur Durchführung des verwendeten Verfahrens wird man bevorzugt zwei Parameter geeignet einrichten: den Winkel zwischen den Strahlen und/oder die Gitterkonstante.

[0036] Vorzugsweise wird man für den Fall, dass einer der Lichtstrahlen von vornherein geringe Intensität aufweist (z.B. Probenstrahl in der OCT) gar nicht beugen, sondern diesen ersten Lichtstrahl direkt auf den Detektor richten (0. Beugungsordnung). Den zweiten Lichtstrahl wird man bevorzugt gerade unter einem solchen Winkel gegen den ersten auf das Gitter richten, dass eine der Nebenbeugungsordnungen (typisch die 1. Ordnung) der entstehende Strahlenschar unter einem kleinen Winkel (um Null) gegen den ersten Lichtstrahl auf den Detektor trifft (vgl. [Fig. 2](#)).

[0037] Alternativ oder auch zusätzlich kann man die Gitterkonstante derart passend wählen, dass der vorgegebene Winkel, unter dem die beiden Lichtstrahlen ursprünglich auf den Detektor treffen sollten, gerade dem Ausfallswinkel einer höheren Beugungsordnung für die zentrale Wellenlänge der Lichtquelle entspricht. Diese Gitterkonstante kann elementar nach den bekannten Regeln der Interferenz am Gitter berechnet werden. Vorzugsweise wird man Phasengitter verwenden, um keine Lichtintensität zu verlieren.

[0038] Im Unterschied zu dem Verfahren der DE 10 2004 033 187 B3 handelt es sich bei der hier beschriebenen Erfindung um eine Manipulation des Lichts fernab vom Ort der Interferenz auf dem Detektor. Insbesondere bietet sich nun die Möglichkeit, einen der beiden zur Interferenz gebrachten Strahlen – bevorzugt den Probenstrahl bei OCT – unverändert zu belassen, was bei einer Maskierung des Detektors nicht möglich ist.

[0039] Das Gitter soll einen ausreichenden Abstand zum Detektor aufweisen, damit die Elementarwellen ausgehend von allen beleuchteten Gitterstrichen auf dem Detektor miteinander interferieren können. Der Abstand sollte daher wenigstens in der Größenordnung $(\text{Strahldurchmesser} \times \text{Gitterlinienabstand}) / (2 \times \text{Zentralwellenlänge})$, also auf der Millimeter-Skala liegen. Die Größenordnung einiger Wellenlängen, d.h. Mikrometer, wäre als Gitter-Detektor-Abstand zu klein für den Zweck der Erfindung, weil dann noch nicht von einer Vielstrahl-Interferenz am Gitter ausgegangen werden dürfte und vielmehr auch Beugungseffekte am Einzelspalt einzubeziehen wären.

[0040] Die Wahl eines Gitter-Detektor-Abstandes von einigen Zentimetern ist ebenfalls geeignet, vor allem wenn alle anderen Beugungsordnungen als die zur Interferenz ausgewählte ausreichend weit abgelenkt und so am Detektor unterdrückt werden sollen. Würde man den Abstand hingegen auf die Meterskala auslegen, würde das Auseinanderlaufen der spektralen Anteile das OCT-Signal auflösen.

[0041] Als wichtige Bemerkung sei auf die in der DE 10 2004 033 187 B3 geführte Diskussion verwiesen, der zufolge die Trägerfrequenz ausdrücklich nicht auf die Differenzfrequenz Null gemischt werden sollte. Denn in diesem Fall hätte man zwar unmittelbar die gesuchte Amplitudenmodulation ohne Interferenzstreifen auf dem Zeilensensor, aber das messbare Signal wäre stark von der Phasenlage des Interferenzmusters abhängig. Im ungünstigsten Fall könnten sich Beiträge zum Interferenzsignal bei der integrierenden Messung über einzelne Pixel gerade aufleben. Die effektive Trägerfrequenz sollte vielmehr größer als Null und dabei ausreichend klein eingerichtet werden, so dass sie ohne Unterabtastung mit der gegebenen Pixelzahl gemäß Nyquist-Bedingung erfasst werden kann.

[0042] Für die hier beschriebene Erfindung heißt dies, dass die exakt parallele Einstrahlung der wenigstens zwei verschiedenen Beugungsordnungen auf den Detektor vorzugsweise zu vermeiden ist. Dies ist leicht durch geringfügige Variation des Einstrahlwinkels eines der Strahlen zu erreichen.

[0043] Im Folgenden soll beispielhaft die Auslegung eines OCT Detektors dargelegt werden, bei dem die hier beschriebene Erfindung zum Einsatz kommt. Als Lichtquelle wird eine Superlumineszenzdiode (SLD) mit einer Zentralwellenlänge λ_0 von 828,3 nm und einer Bandbreite $\lambda_{\text{SLDbreite}}$ von 19,7 nm verwendet. Die spektrale Dichteverteilung soll durch eine Gaußfunktion approximierbar sein. Daraus ergibt sich eine ebenfalls gaußförmige Kohärenzfunktion mit einer Mittenbreite l_c von 15 μm . Zur Abtastung des Interferenzsignals soll ein CMOS-Zeilensensor verwendet werden. In einer $b_{\text{Sensor}} = 8$ mm breiten Zeile sind 1024 Photodioden angeordnet. Damit ergibt sich ein Pixel-

bzw. Abtastabstand p_{abstand} von $7,8 \mu\text{m}$. Ziel der Auslegung ist es, aus dem gemessenen Interferenzsignal auf dem Zeilensensor eine eindeutige Tiefeninformation zu erhalten.

[0044] Die Interferenzstreifen müssen rekonstruierbar sein, d.h. nach dem Nyquist-Kriterium muss der Abstand benachbarter Interferenzstreifen mindestens doppelt so groß sein, wie der Abtastabstand (= Sensorpixelabstand) p_{abstand} . Der Winkel β , den Proben- und Referenzstrahl einschließen müssen, damit Unterabtastung vermieden wird, beträgt $\beta = \arcsin(\lambda_0/p_{\text{abstand}}) = 3,0^\circ$.

[0045] Die abzutastende Amplitudenmodulation (die Einhüllende des Streifenmusters) setzt sich aus Gaußfunktionen zusammen. Die Gaußfunktion mit gegebener Halbwertsbreite muss nach der Abtastung rekonstruierbar sein. Dazu müssen mindestens zwei Kosinusperioden in die Halbwertsbreite einer Gaußkurve passen. Zusammen mit dem ersten Kriterium folgt, dass die Gaußfunktion von mindestens vier Pixeln abgetastet werden muss. Bei einem Sensor mit 1024 Pixeln ist daher eine maximale Weglängendifferenz von $\Delta = 256 \cdot l_c = 3,8 \text{ mm}$ erreichbar. Um diese zu erreichen muss der Einfallswinkel auf das Gitter zu $\alpha = \arctan(\Delta/b_{\text{Sensor}}) = 25,4^\circ$ gewählt werden.

[0046] Entsprechend der nun bekannten Ein- und Ausfallwinkel aus dem Gitter kann jetzt unter Verwendung der Gittergleichung auch die Gitterkonstante bestimmt werden. Diese folgt dann zu $g = (\sin(\alpha) + \sin(\beta))/(m \cdot \lambda) = 579 \text{ Linien pro Millimeter}$.

Patentansprüche

1. Verfahren zur elektronischen Abtastung der Intensitätsverteilung eines optischen Interferenzmusters mit einem linearen Bildsensor (26), der eine feste Abtastfrequenz durch seine Pixelbreite vorgibt, wobei das Interferenzmuster durch Überlagerung zweier unter einem beliebigen vorgegebenen Winkel α zueinander einfallender, zeitlich teilkohärenter Strahlen (20, 22) entsteht und Interferenzstreifen mit einer Trägerfrequenz größer als die Abtastfrequenz sowie eine gegenüber der Pixelbreite langsam veränderliche Amplitudenmodulation aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein optisches Gitter (24) im Strahlengang des ersten der beiden einfallenden Strahlen und der Bildsensor (26) im Beugungsbild des Gitters so angeordnet wird, dass am Ort des Bildsensors (26) wenigstens ein vom Gitter (24) in Richtung einer Nebenbeugungsordnung ausgehender Strahl und der zweite vom Gitter nicht beeinflusste Einfallstrahl (22; 20) interferieren, und die Strahlen (20, 22) einen Winkel β am Ort des Bildsensors (26) einschließen, der kleiner als α ist.

2. Verfahren zur elektronischen Abtastung der Intensitätsverteilung eines optischen Interferenzmus-

ters mit einem linearen Bildsensor (26), der eine feste Abtastfrequenz durch seine Pixelbreite vorgibt, wobei das Interferenzmuster durch Überlagerung zweier unter einem beliebigen vorgegebenen Winkel α zueinander einfallender, zeitlich teilkohärenter Strahlen (20, 22) entsteht und Interferenzstreifen mit einer Trägerfrequenz größer als die Abtastfrequenz sowie eine gegenüber der Pixelbreite langsam veränderliche Amplitudenmodulation aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein optisches Gitter (24) im Strahlengang beider einfallender Strahlen angeordnet wird und der Bildsensor (26) im Beugungsbild des Gitters bzw. der Gitter so angeordnet wird, dass am Ort des Bildsensors (26) wenigstens zwei von dem wenigstens einen Gitter ausgehende Strahlen verschiedener Beugungsordnungen der einfallenden Strahlen interferieren, wobei die von dem wenigstens einen Gitter ausgehenden Strahlen einen Winkel β am Ort des Bildsensors (26) einschließen, der kleiner als α ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Referenzstrahl einer OCT durch das Gitter gelenkt wird.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein optisches Phasengitter verwendet wird.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Gitterbeugung durch Reflexion an einem Gitter erfolgt.

6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass breitbandiges Licht mit kurzer Kohärenzlänge verwendet wird.

7. Verfahren einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Bildsensor in einem Abstand von wenigstens 1 mm zum Gitter angeordnet wird.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die auf dem Zeilensensor überlagerten Strahlen einen von Null verschiedenen Winkel einschließen.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

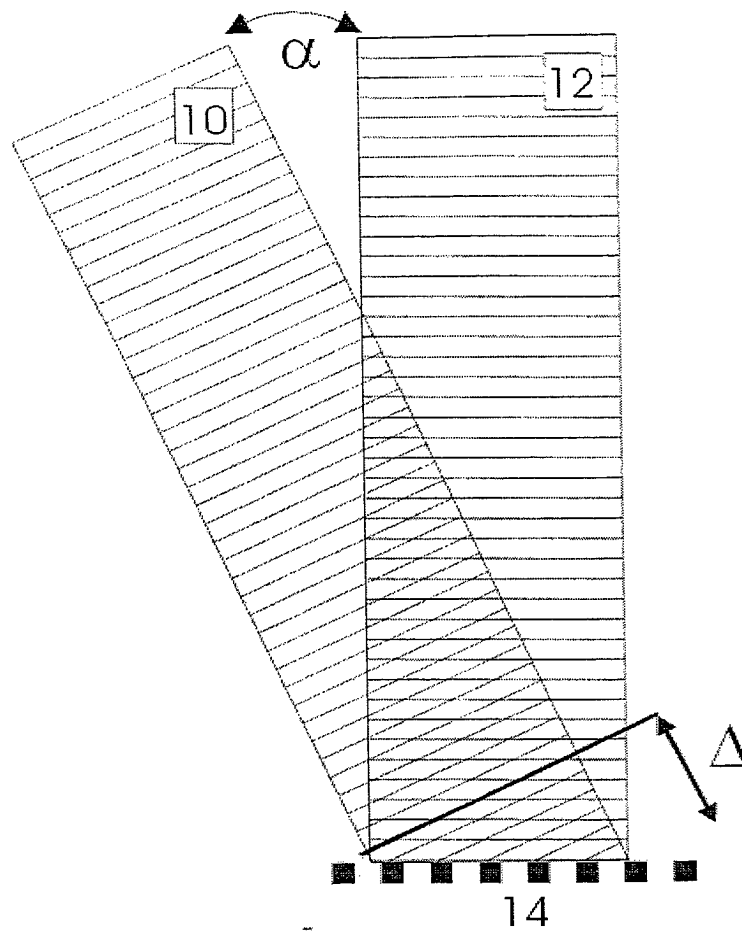


Fig. 1

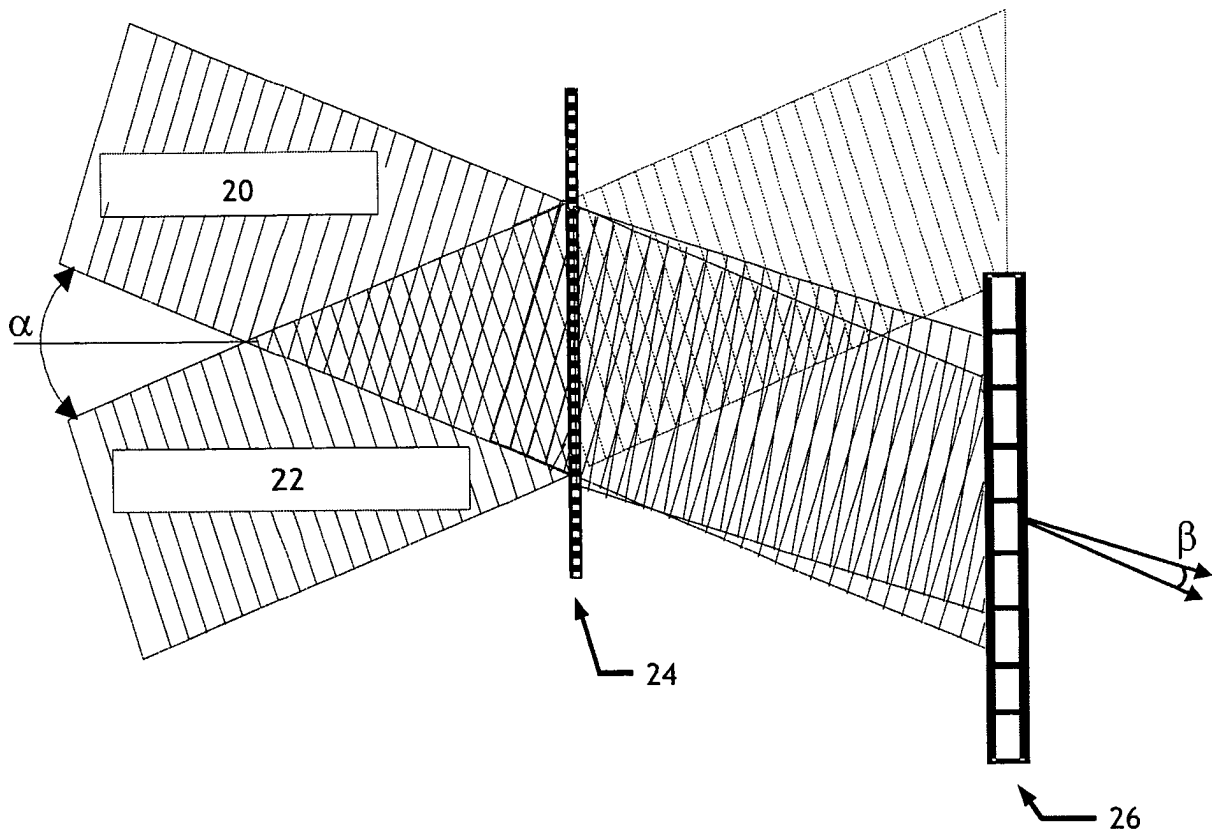


FIG. 2

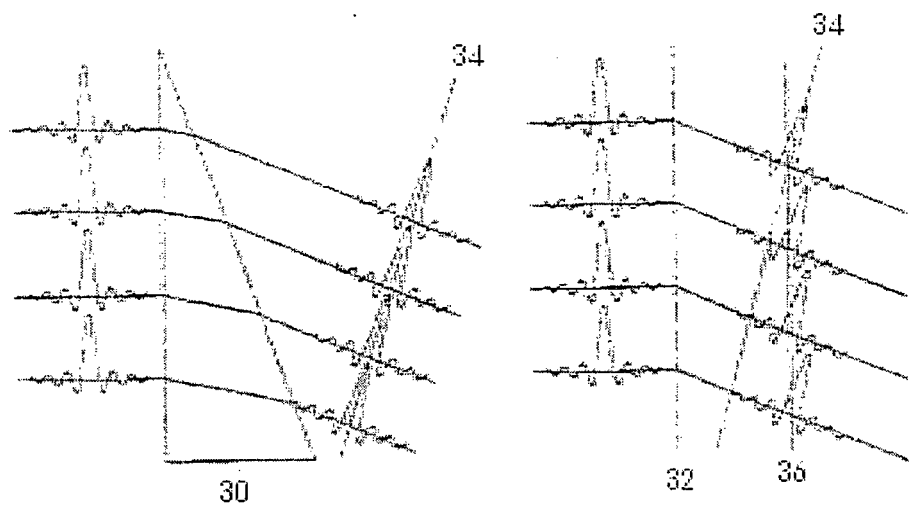


Fig. 3