



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 213 729.0**
(22) Anmeldetag: **08.08.2017**
(43) Offenlegungstag: **14.02.2019**

(51) Int Cl.: **G01S 17/02 (2006.01)**
G02F 1/35 (2006.01)

(71) Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:
US 7 280 186 B1
US 2007 / 0 002 307 A1

(72) Erfinder:
Utermohlen, Fabian, 71229 Leonberg, DE;
Degenfeld-Schonburg, Peter, 71272 Renningen,
DE; Leidich, Stefan, 71277 Rutesheim, DE

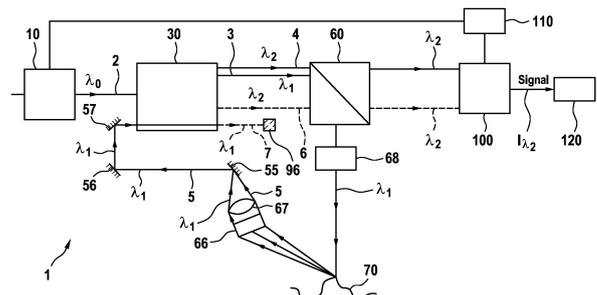
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Bereitstellung eines Detektionssignals für zu detektierende Objekte**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bereitstellung eines Detektionssignals für zu detektierende Objekte (70), wobei

- mittels eines ersten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses (30, 30a) aus einem Lichtstrahl einer Lichtquelle (10) mit einer Ausgangsfrequenz (f_{laser}) zumindest ein erster und ein zweiter Lichtstrahl erzeugt werden, die unterschiedliche Frequenz (f_{obj} , f_{ref}) aufweisen und wobei
- der erste Lichtstrahl mit einer Referenzfrequenz (f_{ref}) detektiert wird und wobei
- der zweite Lichtstrahl mit einer Objektfrequenz (f_{obj}) ausgesendet und nach Reflexion an einem Objekt (70) empfangen wird und wobei
- der Lichtstrahl mit der Ausgangsfrequenz (f_{laser}) und der zweite Lichtstrahl mit der Objektfrequenz (f_{obj}) überlagert werden, und wobei
- mittels eines zweiten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses (30, 30b) aus den beiden überlagerten Lichtstrahlen mit der Ausgangsfrequenz (f_{laser}) und mit der Objektfrequenz (f_{obj}) ein Referenzstrahl mit Referenzfrequenz (f_{ref}) erzeugt wird, und wobei
- ein Detektionssignal erzeugt wird, derart, dass anhand der Zeitdifferenz zwischen der Detektion des ersten Lichtstrahls mit der Referenzfrequenz (f_{ref}) und einer Detektion einer Änderung des Referenzstrahls mit Referenzfrequenz (f_{ref}) auf Grund besagter Überlagerung die Entfernung (d) des Objekts (70) bestimmbar ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bereitstellung eines Detektionssignals für zu detektierende Objekte.

[0002] Die Erfindung betrifft ebenfalls eine Sensorvorrichtung zur Bereitstellung eines Detektionssignals für zu detektierende Objekte.

[0003] Die Erfindung betrifft darüber hinaus einen LiDAR-Scanner, insbesondere Mikrosscanner.

[0004] Obwohl auf beliebige Sensorvorrichtungen anwendbar, wird die vorliegende Erfindung in Bezug auf LiDAR-Makrosscanner erläutert.

[0005] Bekannte LiDAR Makrosscanner weisen beispielsweise einen Rotor auf, auf dem optische Elemente wie Lichtquelle und Detektor angeordnet sind. Weitere bekannte Scanner weisen nur einen Spiegel zur Strahlablenkung als rotierendes Element auf. In bekannter Weise wird mit einer gepulsten Lichtquelle, z. B. in Form eines Lasers ein Lichtstrahl ausgesandt und dessen Reflexion an einem Objekt detektiert, um den Abstand des Objekts anhand des reflektierten Lichts zu bestimmen. Hierzu kann der Makrosscanner eine so genannte koaxiale Anordnung von Sendepfad und Empfangspfad aufweisen, bei der das reflektierte Licht über den Lichtpfad der aussendenden Optik geleitet wird. Um dann ausreichend Licht im Empfänger detektieren zu können, sind die optischen Komponenten, insbesondere der Spiegel des Empfangspfades entsprechend groß gewählt. Bei einer Verwendung von biaxialen Anordnungen wird aufgrund der Linsengröße und des Abbildungsmaßstabs ein großes Detektorarray eingesetzt, um die optische Rauschleistung, bspw. durch Sonnenlicht oder anderen Fremdlichtquellen, zu reduzieren. Biaxiale Anordnungen mit statischen Empfangskanälen werden üblicherweise aus einem großen Winkelbereich beleuchtet und weisen ein niedriges Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit Reichweite auf.

[0006] Bei der Auslegung einer LiDAR-Sensorvorrichtung für Consumer- und Automotive-Produkte kann auch die Augensicherheit relevant sein.

[0007] Aus der DE 20 2009 015 194 U1 ist ein Sicherheitsscanner zur Überwachung einer Scanebene auf Eintritt von Objekten in die Scanebene bekannt geworden mit einem Lichtsender, einer Lichtablenkeinheit zur Ablenkung des Lichtes in die Scanebene, einem Empfänger zur Bereitstellung von Empfangssignalen in Abhängigkeit von an im Sichtbereich des Scanners vorhandenen Objekten remittiertem Licht, und einer Auswerteeinheit zur Auswertung der Empfangssignale und zur Bereitstellung eines Sicherheitssignals, wobei der Lichtsender Licht mit ei-

ner Wellenlänge zwischen 1200 nm und 1700 nm aussendet.

[0008] Aus der DE 10 2007 032 997 A1 ist ein Laser-scanner zur Bestimmung von Fahrbahneigenschaften bekannt geworden, der zwei Wellenlängen - 900 nm und 1550 nm - verwendet, um unterschiedliche Reflexionen erkennen zu können.

[0009] Aus der US 2015/0177128 A1 ist darüber hinaus eine Methode zur Bildgebung mithilfe von Photonen in quantenmechanischen Zuständen mit zwei verschiedenen Wellenlängen bekannt geworden. Dabei werden Photonen einer ersten Wellenlänge zur Beleuchtung von Probenmaterial verwendet und Photonen einer zweiten Wellenlänge einem Detektor zugeführt, wobei die Photonen nicht ausgesendet werden und somit vom Lichtpfad getrennt werden.

[0010] In einer Ausführungsform stellt die Erfindung ein Verfahren zur Bereitstellung eines Detektionssignals für zu detektierende Objekte bereit, wobei

- mittels eines ersten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses aus einem Lichtstrahl einer Lichtquelle mit einer Ausgangsfrequenz zumindest ein erster und ein zweiter Lichtstrahl erzeugt werden, die unterschiedliche Frequenz aufweisen und wobei

- der erste Lichtstrahl mit einer Referenzfrequenz detektiert wird und wobei

- der zweite Lichtstrahl mit einer Objektfrequenz ausgesendet und nach Reflexion an einem Objekt empfangen wird und wobei

- der Lichtstrahl mit der Ausgangsfrequenz und der zweite Lichtstrahl mit der Objektfrequenz überlagert werden, und wobei

- mittels eines zweiten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses aus den beiden überlagerten Lichtstrahlen mit der Ausgangsfrequenz und mit der Objektfrequenz ein Referenzstrahl mit Referenzfrequenz erzeugt wird, und wobei

- ein Detektionssignal erzeugt wird, derart, dass anhand der Zeitdifferenz zwischen der Detektion des ersten Lichtstrahls mit der Referenzfrequenz und einer Detektion einer Änderung des Referenzstrahls mit Referenzfrequenz auf Grund besagter Überlagerung die Entfernung des Objekts bestimmbar ist.

[0011] In einer weiteren Ausführungsform stellt die Erfindung eine Sensorvorrichtung zur Bereitstellung eines Detektionssignals für zu detektierende Objekte, umfassend eine Lichtquelle zur Erzeugung eines Ausgangsstrahls mit zumindest einer Ausgangsfrequenz, eine erste Strahlerzeugungseinrichtung zur Erzeugung zumindest eines ersten und eines zweiten Licht-

strahls unterschiedlicher Frequenz mittels eines ersten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses aus dem Ausgangsstrahl, eine zweite Strahlerzeugungseinrichtung zur Erzeugung eines Referenzstrahls mit Referenzfrequenz mittels eines zweiten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses aus einer Überlagerung aus dem ausgesendeten und nach Reflexion an einem Objekt empfangenen zweiten Lichtstrahl und dem Lichtstrahl mit der Ausgangsfrequenz, und eine Detektionseinrichtung zur Detektion von Licht, wobei diese ausgebildet ist, ein Detektionssignal zu erzeugen, derart, dass anhand der Zeitdifferenz zwischen der Detektion des ersten Lichtstrahls mit der Referenzfrequenz und einer Detektion einer Änderung des Referenzstrahls mit Referenzfrequenz auf Grund besagter Überlagerung die Entfernung des Objekts bestimmbar ist.

[0012] In einer weiteren Ausführungsform stellt die Erfindung einen LiDAR-Scanner, insbesondere Mikroskanner, mit zumindest einer Sensorvorrichtung gemäß einem der Ansprüche 3-10 bereit, wobei der LiDAR-Scanner einen mikromechanischen Spiegel zur Umlenkung eines Strahls der ersten Strahlerzeugungseinrichtung aufweist.

[0013] Mit anderen Worten stellt zumindest eine der Ausführungsformen der Erfindung eine Sensorvorrichtung bereit, bei der mit dem Licht einer Lichtquelle durch einen ersten optischen nichtlinearen 3-Wellenprozess zwei weitere Lichtstrahlen, Objektstrahl und Referenzstrahl, mit unterschiedlichen Frequenzen erzeugt werden. Der Referenzstrahl wird direkt gemessen, während der Objektstrahl auf das zu scannende Objekt oder in die entsprechende Region/Bereich gesendet wird. Trifft der Objektstrahl auf ein Objekt wird dieser zumindest teilweise reflektiert und das so reflektierte Licht des Objektstrahls detektiert. Das reflektierte Licht des Objektstrahls wird zusammen mit dem Lichtstrahl der Lichtquelle überlagert. Durch einen zweiten optischen nichtlinearen 3-Wellenprozess kann dann eine Änderung in dem zu detektierenden Lichtstrahl erzeugt werden. Dabei ist dann die Zeit zwischen dem erstmaligen Messen des Referenzstrahls und der Detektion einer Änderung des Anteils des Referenzstrahls mit Referenzfrequenz auf Grund der Überlagerung von dem aufgenommenen Objektstrahl und dem Referenzstrahl zur Bestimmung des Objektabstandes nutzbar.

[0014] Einer der erzielten Vorteile ist, dass die Augensicherheit verbessert werden kann, insbesondere in dem die Sendeleistung unabhängig von der Auslegung des Detektors erhöht werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Sensitivität, da ein völlig anderer Rausch-Leistungspfad genutzt wird. Ein weiterer Vorteil ist eine erhöhte Flexibilität, da auch ein bspw. flächiger Detektor bei einer biaxialen Anordnung verwendet werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass der

Bauraum verkleinert werden kann, da kleinere Detektoren bzw. Detektionseinrichtungen bei gleichem Signal-zu-Rausch-Verhältnis verwendet werden können. Ebenso können einfachere Wellenlängenfilter verwendet werden, da schmalbandige winkelunabhängige Wellenlängenfilter, die aufwendig zu fertigen sind, entfallen können.

[0015] Unter dem Begriff „Black Silicon“ ist schwarzes Silizium zu verstehen.

[0016] Der Begriff „nicht linearer 3-Wellenprozess“ ist im weitesten Sinne zu verstehen und bezieht sich, insbesondere in der Beschreibung, vorzugsweise in den Ansprüchen, auf einen Prozess, bei dem ein nichtlinearer optischer Effekt genutzt wird, um aus einer elektromagnetischen Welle mit einer Eingangsfrequenz zwei elektromagnetischen Wellen mit unterschiedlichen Ausgangsfrequenzen oder aus zwei elektromagnetischen Wellen mit unterschiedlichen Eingangsfrequenzen eine elektromagnetische Welle mit einer Ausgangsfrequenz zu erzeugen. Beispiele für einen nicht linearen optischen Effekt sind Frequenzverdoppelung oder der Kerr-Effekt.

[0017] Weitere Merkmale, Vorteile und weitere Ausführungsformen der Erfindung sind im Folgenden beschrieben oder werden dadurch offenbar.

[0018] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung ändert sich auf Grund besagter Überlagerung die Intensität des Referenzstrahls mit Referenzfrequenz, insbesondere erhöht sich diese. Dies ermöglicht eine einfache und zuverlässige Detektion des Zeitpunkts der Überlagerung.

[0019] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung umfasst die erste und/oder zweite Strahlerzeugungseinrichtung einen nicht-linearen optischen Kristall. Einer der damit erzielten Vorteile ist, dass auf einfache und gleichzeitig zuverlässige Weise ein parametrischer optischer Prozess und/oder ein nicht-linearer optischer Effekt bereitgestellt werden kann.

[0020] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist der nicht-lineare optische Kristall aus insbesondere periodisch gepoltem Kaliumtitanylphosphat, Lithiumniobat und/oder stöchiometrischem Lithiumtantalat und/oder Bariumborat, Lithiumtriborat, Bismutborat und/oder Kaliumdihydrogenphosphat hergestellt. Auf diese Weise lässt sich in flexibler Weise ein nicht-linearer optischer Kristall herstellen.

[0021] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist die erste Strahlerzeugungseinrichtung ausgebildet, den ersten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozess mittels spontaner parametrischer Fluoreszenz bereitzustellen. Einer der damit erzielten Vorteile ist, dass auf einfache und gleichzeitig zuverlässige Weise mittels parametrischer Fluoreszenz,

auch bekannt unter dem Begriff „parametric down-conversion“, zwei Lichtstrahlen erzeugt werden können.

[0022] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist die zweite Strahlerzeugungseinrichtung ausgebildet, den zweiten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozess mittels Differenzfrequenzerzeugung bereitzustellen. Einer der damit erzielten Vorteile ist, dass auf einfache und gleichzeitig zuverlässige Weise mittels Differenzfrequenzerzeugung, auch bekannt unter dem Begriff „difference frequency generation“, zwei Lichtstrahlen erzeugt werden können.

[0023] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist die Lichtquelle zur Erzeugung von gepulstem Licht ausgebildet. Mittels Lichtpulsen sind einfachere, zeitaufgelöste Messungen möglich.

[0024] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist die Lichtquelle mittels einer pulsformig modulierten Stromquelle steuerbar. Damit kann die Lichtquelle auf einfache Weise gesteuert werden.

[0025] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung weist die Detektionseinrichtung eine Photodiode, insbesondere eine Lawinenphotodiode und/oder eine SPAD-Diode auf. Damit kann eine einfache und gleichzeitig zuverlässige Detektionseinrichtung zur Verfügung gestellt werden. Wird eine SPAD-Diode verwendet, können einzelne Photonen detektiert werden. Dies ermöglicht eine zuverlässige Detektion auch bei geringer Lichtstärke.

[0026] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist ein Absorber zumindest für Lichtstrahlen aus der zweiten Strahlerzeugungseinrichtung angeordnet. Einer der erzielten Vorteile ist, dass damit auf einfache und zuverlässige Weise der Lichtstrahlen aus der zweiten Strahlerzeugungseinrichtung ausgeblendet werden kann. Ebenso kann auch ein Absorber für nicht benötigtes Licht des Lasers angeordnet werden.

[0027] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist der Absorber aus Black Silicon hergestellt. Damit kann Licht effektiv absorbiert werden.

[0028] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist eine Empfangseinrichtung zum Empfangen von von Objekten reflektierten Lichtstrahlen angeordnet, welche einen Frequenzfilter, insbesondere einen Bandpassfilter, aufweist, der zur Unterdrückung des ersten Lichtstrahls und zur Transmission des zweiten Lichtstrahls ausgebildet ist. Ein möglicher Vorteil ist, dass Fremdlicht zuverlässig ausgeblendet werden kann. Dabei kann der Bandpassfilter zur Transmission von Licht der Wellenlänge des zweiten Lichtstrahls $\lambda_1 \pm 10\text{nm}$, insbesondere $\lambda_1 \pm 5\text{nm}$, vorzugsweise $\lambda_1 \pm 2,5\text{nm}$, insbesondere $\lambda_1 \pm$

1,5nm und/oder vorzugsweise $\lambda_1 \pm 5\%$, insbesondere $\lambda_1 \pm 2\%$, vorzugsweise $\lambda_1 \pm 1\%$ ausgebildet sein.

[0029] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist eine Zeitdifferenzmesseinrichtung angeordnet, die einen digitalen Zähler aufweist, insbesondere gesteuert durch Taktquellen mit hoher Frequenz, und/oder eine Serienschaltung mehrerer digitaler Gatter, derart, dass der Zeitpunkt einer Erzeugung eines Lichtpulses und der Zeitpunkt der Detektion des reflektierten Lichts die Zeitdifferenz bildet. Damit ist eine besonders zuverlässige Messung der Zeitspanne zwischen dem Aussenden eines Pulses und dem Eintreffen des vom Objekt reflektierten Lichtpulses möglich. Unter hohen Frequenzen sind hier Frequenzen im GHz-Bereich, vorzugsweise zwischen 1-300 GHz, insbesondere zwischen 5-100 GHz zu verstehen.

[0030] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung weist die Detektionseinrichtung eine nichtlineare Detektionscharakteristik auf. Damit kann eine Übersteuerung der Detektionseinrichtung vermieden werden.

[0031] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist eine Entfernungsbestimmungseinrichtung zur Bestimmung der Entfernung des Objekts anhand der durch die Zeitdifferenzmesseinrichtung ermittelten Zeitdifferenz angeordnet. Damit kann direkt in das Detektionssignal der ermittelte Abstand codiert werden.

[0032] Weitere wichtige Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen, aus den Zeichnungen, und aus dazugehöriger Figurenbeschreibung anhand der Zeichnungen.

[0033] Es versteht sich, dass die vorstehend genannten und die nachstehend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung verwendbar sind, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

[0034] Bevorzugte Ausführungen und Ausführungsformen der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert, wobei sich gleiche Bezugszeichen auf gleiche oder ähnliche oder funktional gleiche Bauteile oder Elemente beziehen.

[0035] Dabei zeigen in schematischer Form

Fig. 1 eine Sensorvorrichtung gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

Fig. 2 ein Messsignal einer Detektoreinrichtung gemäß einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

Fig. 3 eine Sensorvorrichtung gemäß einer dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung; und

Fig. 4 ein Referenzsignal einer Detektoreinrichtung gemäß einer vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung; und

Fig. 5 Schritte eines Verfahrens gemäß einer fünften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0036] **Fig. 1** zeigt eine Sensorvorrichtung gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0037] In **Fig. 1** ist eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Systems gezeigt.

[0038] Zunächst wird ein Laserstrahl **2** mit der Frequenz f_{laser} bzw. der Wellenlänge λ_0 , bspw. 531 nm, mittels eines Lasers **10** erzeugt. Die Leistung des Lasers **10** wird durch eine pulsformig modulierte Stromquelle mit dem Dauerpegel I_1 und dem Pulspegel I_2 gesteuert. Der Laser **10** emittiert entsprechend eine Dauerleistung P_1 , bspw. 1 mW und eine Pulsleistung P_2 , bspw. 50 W. Die Pulslänge beträgt beispielsweise zwischen 1 ns bis 10 ns, vorzugsweise zwischen 2 ns und 8 ns, insbesondere zwischen 4 ns und 6 ns.

[0039] Der Laserstrahl **2** wird einem nicht-linearen Kristall **30** zugeführt. Dieser kann aus (periodisch gepoltem) Kaliumtitanylphosphat, (periodisch gepoltem) Lithiumniobat, (periodisch gepoltem) stöchiometrischem Lithiumtantalat, Bariumborat, Lithiumtriborat, Bismuthborat und/oder Kaliumdihydrogenphosphat hergestellt sein. Dort entsteht in einem ersten Schritt mittels parametrischer Fluoreszenz, auch parametric down-conversion genannt, ein Objektstrahl **3** mit Frequenz f_{obj} bzw. Wellenlänge λ_1 zur Detektion eines Objekts und ein Referenzstrahl **4** mit Frequenz f_{ref} bzw. Wellenlänge λ_2 , bspw. $\lambda_1=1550$ nm und $\lambda_2=810$ nm, oder auch jede beliebige Wellenlänge zwischen 700 nm und 1600 nm, wobei die Resonanzbedingung $f_{\text{obj}} + f_{\text{ref}} = f_{\text{laser}}$ erfüllt ist. Objekt- und Referenzstrahl **3, 4** sind in diesem ersten Schritt mit der durchgezogenen Linie in **Fig. 1** bezeichnet.

[0040] In einem zweiten Schritt werden Objekt- und Referenzstrahl **3, 4** mittels eines wellenlängenselektiven Strahlteilers **60**, bspw. in Form eines dichroitischen Spiegels, räumlich getrennt.

[0041] Der Referenzstrahl **4** wird einem Detektor **100** zugeführt und in ein elektrisches Signal gewandelt. Der Detektor **100** kann eine Photodiode, die die Intensität des Photonenstroms detektiert und/oder eine SPAD-Diode aufweisen, welche auf einzelne Photonen reagiert. Alternativ oder zusätzlich kann auch eine Lawinenphotodiode verwendet werden.

[0042] Der Objektstrahl **3** wird mittels einer Sendevorrichtung **68** und/oder mittels einer Ablenkvorrichtung dem Messobjekt **70** zugeführt. Das Licht des Objektstrahls **3** wird vom Messobjekt **70** - hier diffus - reflektiert und anteilig von der Empfangsoptik **67** aufgenommen. Die Empfangsoptik **67** weist einen Wellenlängenfilter **66** auf. Der Wellenlängen- oder Frequenzfilter ist vorzugsweise ein Bandpassfilter mit hoher Transmission bei $\lambda_1-1,5$ nm bis $\lambda_1+1,5$ nm und geringer Transmission bei λ_2 . Dabei kann der Bandpassfilter zur Transmission von Licht der Wellenlänge des Objektstrahls **3** $\lambda_1\pm 10$ nm, insbesondere $\lambda_1\pm 5$ nm, vorzugsweise $\lambda_1\pm 2,5$ nm, insbesondere $\lambda_1\pm 1,5$ nm und/oder vorzugsweise $\lambda_1\pm 5\%$, insbesondere $\lambda_1\pm 2\%$, vorzugsweise $\lambda_1\pm 1\%$ und geringer Transmission bei λ_2 , vorzugsweise in einem Bereich $\lambda_2\pm 10$ nm, insbesondere $\lambda_2\pm 5$ nm, vorzugsweise $\lambda_2\pm 2,5$ nm oder $\lambda_2\pm 1,5$ nm und/oder vorzugsweise $\lambda_2\pm 5\%$, insbesondere $\lambda_2\pm 2\%$ ausgebildet sein.

[0043] Im dritten Schritt wird das Licht **5**, welches von der Empfangsoptik **67** aufgenommen wurde, über die Umlenkspiegel **55, 56** und **57** wiederum dem nicht-linearen Kristall **30** zugeführt. Dort entsteht, neben der im ersten Schritt erzeugten parametrischen Fluoreszenz, durch die zusätzliche Zufuhr eines Lichtstrahls **5** der Wellenlänge λ_1 wiederum ein Lichtstrahl **6** der Wellenlänge λ_2 durch den Effekt der Differenzfrequenzerzeugung. Dieser Lichtstrahl **6** trifft dann im weiteren Verlauf auf den Strahlteiler **60**. Der Anteil des Strahls **6** der Wellenlänge λ_2 wird dem Detektor **100** zugeführt, wodurch ein Messsignal erzeugt wird.

[0044] In **Fig. 1** sind die erzeugten Lichtstrahlen **6, 7** nach der Differenzfrequenzerzeugung durch gestrichelte Linien dargestellt. Die Lichtstrahlen **3, 4, 6, 7**, welche durch parametrische Fluoreszenz einerseits oder durch Differenzfrequenzerzeugung andererseits erzeugt wurden, lassen sich nicht in ihrer Frequenz bzw. Wellenlänge unterscheiden. Je nach gewählter Technik zur Phasenanpassung der Lichtstrahlen, auch „phase matching“ genannt, lassen sich die Lichtstrahlen **3, 4, 6, 7** bspw. in ihrer Polarisation unterscheiden. Dies ermöglicht eine Trennung der Lichtstrahlen **3, 4, 6, 7** und der nicht benötigte Lichtstrahl **7** aus der Differenzfrequenzerzeugung mit Wellenlänge λ_1 kann einem Absorber **96** zugeführt werden. Ebenso können die übrigen Photonen des Lasers **11** dem Absorber zugeführt werden.

[0045] Die in **Fig. 1** beschriebene Vorrichtung **1** ist eine Ausführungsform eines LiDAR-Systems, welches ein Detektionssignal, das in **Fig. 2** dargestellt ist, bereitstellt. Der Grundpegel des Lasers P_1 führt zu einem Detektionssignalpegel S_1 . Zum Zeitpunkt der Pulserzeugung t_0 wird das Detektionssignal auf den Pegel S_2 stark ansteigen. Es ist möglich, durch eine nicht-lineare Detektorcharakteristik eine Übersteuerung zu verhindern. In der Zeitspanne zwischen dem

Aussenden eines Lichtpulses t_0 und dem Eintreffen des vom Objekt reflektierten Lichts t_{TOF} ist am Detektor **100** nur die Intensität des Referenzstrahls **4** zu sehen. Zum Zeitpunkt $t_1 \approx T_{\text{TOF}}$ der Erzeugung des Lichtstrahls **4** der Wellenlänge λ_2 durch die Differenzfrequenzerzeugung im nicht-linearen Kristall **30** ist eine Veränderung des Detektionssignals λ_2 zu erwarten, wie in **Fig. 2** gezeigt.

[0046] Die Zeitspanne zwischen der Erzeugung des Lichtpulses **3** und der Detektion des Objektes **70** kann mittels einer Zeitdifferenzmeseinrichtung **110** gemessen und mittels einer Auswerteeinrichtung **120** in den gesuchten Objektabstand d umgerechnet werden:

$$d = \frac{1}{2} t_{\text{TOF}} \cdot c_0$$

mit c_0 = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

[0047] Die Zeitspanne t_{TOF} kann mit bekannten Methoden der elektrischen Zeitmessung bestimmt werden. Besonders geeignet sind digitale Zähler, welche von hochfrequenten Taktquellen inkrementiert werden oder die Hintereinanderschaltung von digitalen Gattern, wobei das Signal t_0 die Messung auslöst und die Detektion bei t_1 die Messung beendet.

[0048] **Fig. 3** zeigt eine zweite Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, die im Folgenden beschrieben wird.

[0049] Zunächst wird ein Laserstrahl **2** mit der Frequenz f_{laser} bzw. der Wellenlänge λ_0 , bspw. 531 nm, mittels eines Lasers **10** erzeugt. Die Leistung des Lasers **10** wird durch eine pulsförmig modulierte Stromquelle mit dem Dauerpegel I_1 und dem Pulspegel I_2 gesteuert. Der Laser **10** emittiert entsprechend eine Dauerleistung P_1 , bspw. 1 mW und eine Pulsleistung P_2 , bspw. 50 W. Die Pulslänge beträgt typischerweise 1 ns bis 10 ns, vorzugsweise zwischen 2 ns und 8 ns, insbesondere zwischen 4 ns und 6 ns.

[0050] In einem zweiten Schritt wird der Laserstrahl **2** im Strahlteiler **20** geteilt.

[0051] Der Laserstrahl **2** auf dem optischen Pfad **A** wird einem nicht-linearen Kristall **30a** zugeführt. Dieser kann aus (periodisch gepoltem) Kaliumtitanylphosphat, (periodisch gepoltem) Lithiumniobat, (periodisch gepoltem) stöchiometrischem Lithiumtantalat, Bariumborat, Lithiumtriborat, Bismuthborat und Kaliumdihydrogenphosphat hergestellt sein. Dort entsteht in einem ersten Schritt mittels parametrischer Fluoreszenz der Objektstrahl **3** mit Frequenz f_{obj} bzw. Wellenlänge λ_1 und der Referenzstrahl **4** mit Frequenz f_{ref} bzw. Wellenlänge λ_2 mit bspw. $\lambda_1 = 1550$ nm und $\lambda_2 = 810$ nm, oder auch jede beliebige Wellenlänge zwischen 700 nm und 1600 nm, wobei die Resonanzbedingung $f_{\text{obj}} + f_{\text{ref}} = f_{\text{laser}}$ erfüllt ist.

[0052] In einem dritten Schritt auf dem ersten optischen Pfad **A** werden Objekt- und Referenzstrahl **3**, **4** mittels eines wellenlängenselektiven Strahlteilers **60**, bspw. ein dichroitischer Spiegel oder dergleichen, räumlich getrennt.

[0053] Der Referenzstrahl **4** kann einem Detektor **101** zugeführt und dann in ein elektrisches Referenzsignal gewandelt werden. Der Detektor **101** kann eine Photodiode, die die Intensität des Photonenstroms detektiert oder eine SPAD-Diode, welche auf einzelne Photonen reagiert, aufweisen. Letztere ermöglicht eine zuverlässige Detektion auch bei geringer Lichtstärke. Alternativ oder zusätzlich kann auch eine Lawinenphotodiode verwendet werden. Das im Detektor **101** gemessene Referenzsignal ist in **Fig. 4** dargestellt.

[0054] Der Objektstrahl **3** wird dem Messobjekt **70** zugeführt. Das Licht des Objektstrahls **3** wird vom Messobjekt **70** diffus reflektiert und anteilig von der Empfangsoptik **67** aufgenommen. Die Empfangsoptik **67** weist ein Wellenlängenfilter **66** auf. Das Wellenlängen- oder Frequenzfilter **66** ist vorzugsweise ein Bandpassfilter mit hoher Transmission bei $\lambda_1 - 1,5$ nm bis $\lambda_1 + 1,5$ nm und geringer Transmission bei λ_2 . Dabei kann der Bandpassfilter zur Transmission von Licht der Wellenlänge des Objektstrahls **3** $\lambda_1 \pm 10$ nm, insbesondere $\lambda_1 \pm 5$ nm, vorzugsweise $\lambda_1 \pm 2,5$ nm, insbesondere $\lambda_1 \pm 1,5$ nm und/oder vorzugsweise $\lambda_1 \pm 5\%$, insbesondere $\lambda_1 \pm 2\%$, vorzugsweise $\lambda_1 \pm 1\%$ und geringer Transmission bei λ_2 , vorzugsweise in einem Bereich $\lambda_2 \pm 10$ nm, insbesondere $\lambda_2 \pm 5$ nm, vorzugsweise $\lambda_2 \pm 2,5$ nm oder $\lambda_2 \pm 1,5$ nm und/oder vorzugsweise $\lambda_2 \pm 5\%$, insbesondere $\lambda_2 \pm 2\%$ ausgebildet sein.

[0055] Im vierten Schritt wird das Licht, welches von der Empfangsoptik **67** aufgenommen wurde, über einen Strahlvereiniger **80** mit dem über den optischen Pfad **B** gelaufenen Laserstrahl **8** vereinigt und wiederum einem nicht-linearen Kristall **30b** zugeführt. Dort entsteht, neben der durch den auf dem optischen Pfad **A** laufenden Laserstrahl **5** erzeugten parametrischen Fluoreszenz, durch die zusätzliche Zufuhr eines Strahls der Wellenlänge λ_1 eine Intensitätserhöhung des Laserstrahls **6** der Wellenlänge λ_2 basierend auf der Differenzfrequenzerzeugung. Der Anteil des Laserstrahls **6** der Wellenlänge λ_2 wird dem Detektor **100** zugeführt, wodurch ein Messsignal, wie in **Abb. 2** dargestellt, entsteht. Der Anteil des Laserstrahls **7** der Wellenlänge λ_1 wird nicht mehr benötigt und kann einem Absorber **96** zugeführt werden.

[0056] **Fig. 5** zeigt Schritte eines Verfahrens gemäß einer fünften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0057] In einem ersten Schritt **S1** wird Licht einer Laserquelle **10** in einen nicht-linearen optischen Kristall gesendet.

[0058] Dort entsteht in einem zweiten Schritt **S2** mittels parametrischer Fluoreszenz, auch parametric down-conversion genannt, ein Objektstrahl mit Frequenz f_{obj} und ein Referenzstrahl mit f_{ref} , wobei die Resonanzbedingung $f_{\text{obj}} + f_{\text{ref}} = f_{\text{laser}}$ erfüllt ist. Bevorzugt liegen die Wellenlängen des Objektstrahls im Bereich 1550 nm und die Wellenlängen des Referenzstrahls im Bereich 810 nm.

[0059] Die Intensität des Referenzstrahls wird in einem dritten Schritt **S3** mit einem Detektor **100**, z. B. mit einer Photodiode, kontinuierlich gemessen.

[0060] In einem vierten Schritt **S4** wird das detektierte optische Signal in ein elektrisches Signal gewandelt.

[0061] Der Objektstrahl hingegen wird mittels einer geeigneten Sendevorrichtung, bspw. einer Linsen- oder Spiegeloptik und optional mit einer Ablenkvorrichtung, z. B. einem Mikrospiegel oder einem Drehspegel oder dergleichen, in einem fünften Schritt **S5** dem Messobjekt **70** zugeführt.

[0062] Das Licht des Objektstrahls wird vom Messobjekt **70** in einem sechsten Schritt **S6** diffus reflektiert und anteilig von einer Empfangsoptik **67** aufgenommen.

[0063] In einem siebten Schritt **S7** wird der empfangene Objektstrahl der Frequenz f_{obj} zusammen mit dem Laserstrahl bei Frequenz f_{laser} wiederum dem nicht-linearen Kristall **30** zugeführt.

[0064] Dort entsteht in einem achten Schritt **S8** durch den Effekt der Differenzfrequenzerzeugung, auch difference frequency generation genannt, ein Strahl mit der Frequenz f_{ref} .

[0065] Dieser Strahl wird in einem neunten Schritt **S9** mit dem Referenzstrahl überlagert und mit dem im dritten Schritt **S3** beschriebenen Detektor **100** gemessen. Dies führt zu einer Überhöhung der Intensität des Messsignals. Die Zeitdifferenz zwischen dem erstmaligen Messen des Referenzstrahls und dem Messen der Intensitätserhöhung dient als Messsignal zur Bestimmung des Objektabstandes.

[0066] Zusammenfassend wird durch die Erfindung und insbesondere durch zumindest eine der beschriebenen Ausführungsformen ein kompaktes, kostengünstiges und zuverlässiges LiDAR-Sensorsystem mit hoher Sensitivität und hoher Augensicherheit bereitgestellt. Im Detail ist dabei durch Trennung der Wellenlänge für die Beleuchtung des Objekts und die Detektion, beispielweise eine Optimierung auf Au-

gensicherheit und/oder Maximierung der zulässigen Sendeleistung unabhängig von der Realisierung eines geeigneten Detektors möglich. Weiterhin ist eine Bandbreite eines im Detektionspfad angeordneten spektralen Filters nicht mehr rauschleistungsbestimmend und insbesondere damit unabhängig vom Sonnenlicht. Damit kann bspw. in einem biaxialen Detektionspfad ein flächiger Detektor verwendet werden bzw. mittels einer geeigneten Struktur in der integrierten Photonik das gesamte von der Empfangsoptik eingesammelte Licht einem Einzeldetektor zugeführt werden und somit ein Empfangsarray vermieden werden. Gleichzeitig kann auf einen schmalbandigen und winkelunabhängigen jedoch komplizierten Wellenlängenfilter verzichtet werden.

[0067] Darüber hinaus wird eine hohe Sensitivität ermöglicht, da ein vollständig anderer Rauschleistungspfad verwendet wird, was ein kompaktes LiDAR-System mit kleineren Linsen und ggf. mit Mikrospiegelablenkung ermöglicht. Ebenso kann das LiDAR-System auch mit optischen Phasearrays kombiniert werden.

[0068] Obwohl die vorliegende Erfindung anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele beschrieben wurde, ist sie nicht darauf beschränkt, sondern auf vielfältige Weise modifizierbar.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 202009015194 U1 [0007]
- DE 102007032997 A1 [0008]
- US 2015/0177128 A1 [0009]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bereitstellung eines Detektionssignals für zu detektierende Objekte (70), wobei

- mittels eines ersten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses (30, 30a) aus einem Lichtstrahl einer Lichtquelle (10) mit einer Ausgangsfrequenz (f_{laser}) zumindest ein erster und ein zweiter Lichtstrahl erzeugt werden, die unterschiedliche Frequenz (f_{obj} , f_{ref}) aufweisen und wobei
- der erste Lichtstrahl mit einer Referenzfrequenz (f_{ref}) detektiert wird und wobei
- der zweite Lichtstrahl mit einer Objektfrequenz (f_{obj}) ausgesendet und nach Reflexion an einem Objekt (70) empfangen wird und wobei
- der Lichtstrahl mit der Ausgangsfrequenz (f_{laser}) und der zweite Lichtstrahl mit der Objektfrequenz (f_{obj}) überlagert werden, und wobei
- mittels eines zweiten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses (30, 30b) aus den beiden überlagerten Lichtstrahlen mit der Ausgangsfrequenz (f_{laser}) und mit der Objektfrequenz (f_{obj}) ein Referenzstrahl mit Referenzfrequenz (f_{ref}) erzeugt wird, und wobei
- ein Detektionssignal erzeugt wird, derart, dass anhand der Zeitdifferenz zwischen der Detektion des ersten Lichtstrahls mit der Referenzfrequenz (f_{ref}) und einer Detektion einer Änderung des Referenzstrahls mit Referenzfrequenz (f_{ref}) auf Grund besagter Überlagerung die Entfernung (d) des Objekts (70) bestimmbar ist.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei sich auf Grund besagter Überlagerung die Intensität des Referenzstrahls mit Referenzfrequenz (f_{ref}) ändert, insbesondere erhöht.

3. Sensorvorrichtung (1) zur Bereitstellung eines Detektionssignals für zu detektierende Objekte (70), umfassend

- eine Lichtquelle (10) zur Erzeugung eines Ausgangsstrahls mit zumindest einer Ausgangsfrequenz (f_{laser}),
- eine erste Strahlerzeugungseinrichtung (30, 30a) zur Erzeugung zumindest eines ersten und eines zweiten Lichtstrahls unterschiedlicher Frequenz (f_{obj} , f_{ref}) mittels eines ersten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses aus dem Ausgangsstrahl (f_{laser}),
- eine zweite Strahlerzeugungseinrichtung (30, 30b) zur Erzeugung eines Referenzstrahls mit Referenzfrequenz (f_{ref}) mittels eines zweiten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozesses aus einer Überlagerung aus dem ausgesendeten und nach Reflexion an einem Objekt (70) empfangenen zweiten Lichtstrahl (f_{obj}) und dem Lichtstrahl mit der Ausgangsfrequenz (f_{laser}), und
- eine Detektionseinrichtung (100) zur Detektion von Licht, wobei diese ausgebildet ist, ein Detektionssignal zu erzeugen, derart, dass anhand der Zeitdifferenz zwischen der Detektion des ersten Lichtstrahls mit der Referenzfrequenz (f_{ref}) und einer Detektion einer Änderung des Referenzstrahls mit Referenzfre-

quenz (f_{ref}) auf Grund besagter Überlagerung die Entfernung (d) des Objekts (70) bestimmbar ist.

4. Sensorvorrichtung gemäß Anspruch 3, wobei die erste und/oder zweite Strahlerzeugungseinrichtung (30a, 30b) einen nicht-linearen optischen Kristall umfasst, wobei der nicht-lineare optische Kristall (30) aus insbesondere periodisch gepoltem Kaliumtitanylphosphat, Lithiumniobat, und/oder stöchiometrischem Lithiumtantalat und/oder Bariumborat, Lithiumtriborat, Bismuthborat und/oder Kaliumdihydrogenphosphat hergestellt sein kann.

5. Sensorvorrichtung gemäß einem der Ansprüche 3-4, wobei die erste Strahlerzeugungseinrichtung (30, 30a) ausgebildet ist, den ersten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozess mittels spontaner parametrischer Fluoreszenz bereitzustellen.

6. Sensorvorrichtung gemäß einem der Ansprüche 3-5, wobei die zweite Strahlerzeugungseinrichtung (30, 30b) ausgebildet ist, den zweiten optischen nicht-linearen 3-Wellenprozess mittels Differenzfrequenz-erzeugung bereitzustellen.

7. Sensorvorrichtung gemäß einem der Ansprüche 3-6, wobei ein Absorber (96) zumindest für Lichtstrahlen aus der zweiten Strahlerzeugungseinrichtung (30b) angeordnet ist, der aus Black Silicon hergestellt sein kann.

8. Sensorvorrichtung gemäß einem der Ansprüche 3-7, wobei eine Empfangseinrichtung (67) zum Empfangen von von Objekten reflektierten Lichtstrahlen angeordnet ist, welche einen Frequenzfilter (66), insbesondere einen Bandpassfilter, aufweist, der zur Unterdrückung des ersten Lichtstrahls (f_{ref}) und zur Transmission des zweiten Lichtstrahls (f_{obj}) ausgebildet ist.

9. Sensorvorrichtung gemäß einem der Ansprüche 3-8, wobei eine Zeitdifferenzmesseinrichtung (110) angeordnet ist, die einen digitalen Zähler, insbesondere gesteuert durch Taktquellen mit hoher Frequenz, aufweist und/oder eine Serienschaltung mehrerer digitaler Gatter, derart, dass der Zeitpunkt (t_0) einer Erzeugung eines Lichtpulses und der Zeitpunkt (t_1) der Detektion des reflektierten Lichts die Zeitdifferenz bildet.

10. Sensorvorrichtung gemäß einem der Ansprüche 3-9, wobei die Detektionseinrichtung (100) eine nicht-lineare Detektionscharakteristik aufweist.

11. LiDAR-Scanner, insbesondere Mikroscanner, mit zumindest einer Sensorvorrichtung gemäß einem der Ansprüche 3-10, wobei der LiDAR-Scanner einen mikromechanischen Spiegel zur Umlenkung ei-

nes Strahls der ersten Strahlerzeugungseinrichtung
(30, 30a) aufweist.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Fig. 2

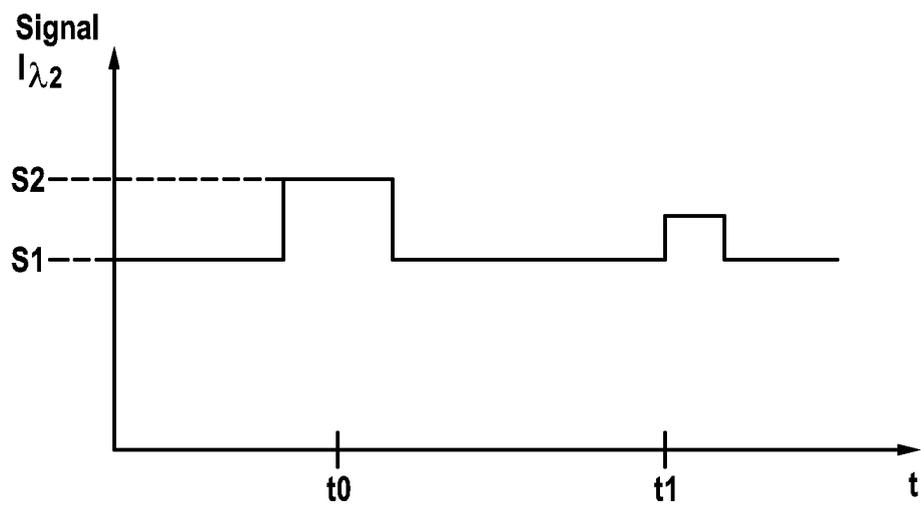


Fig. 3

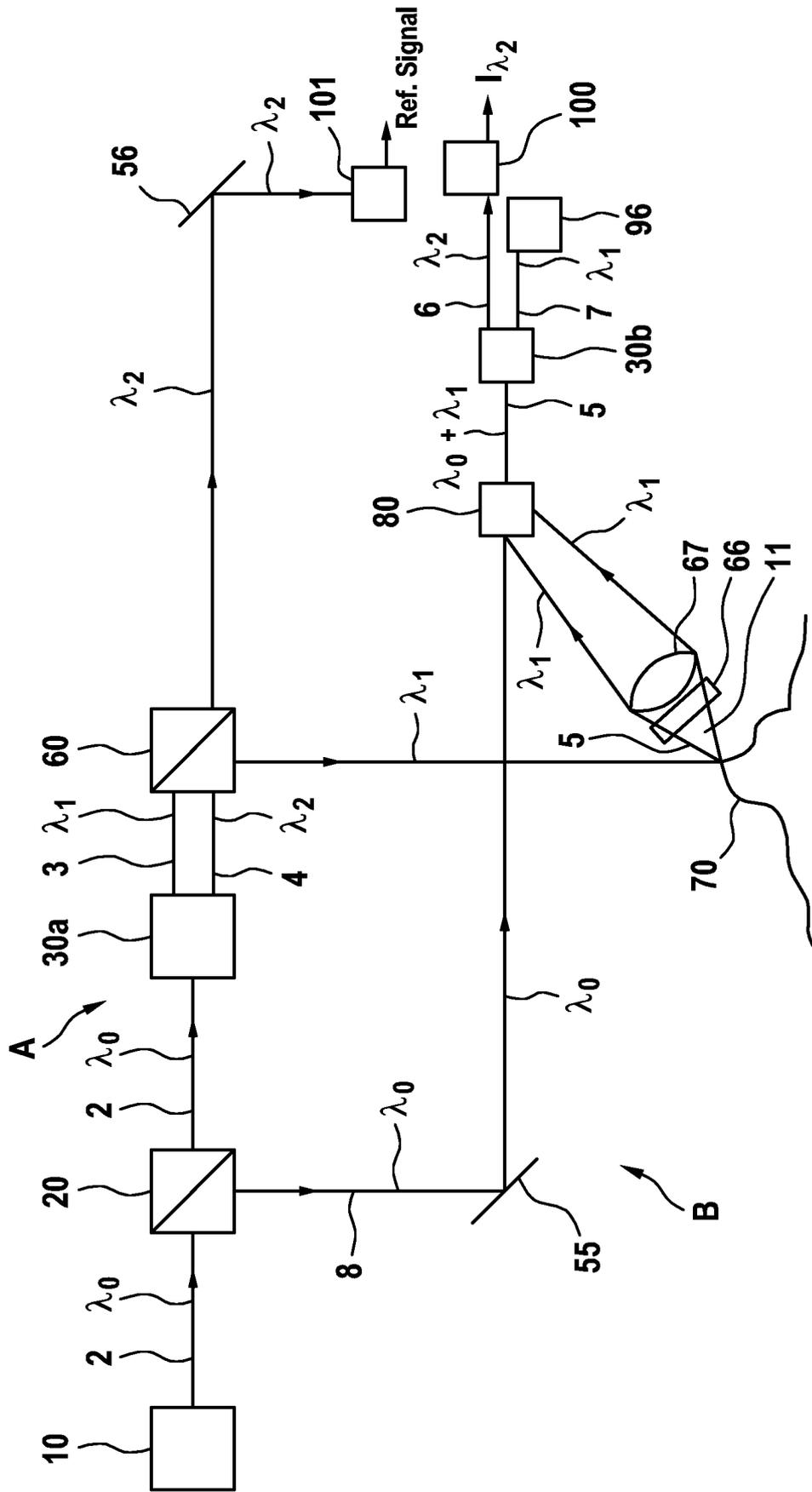


Fig. 4

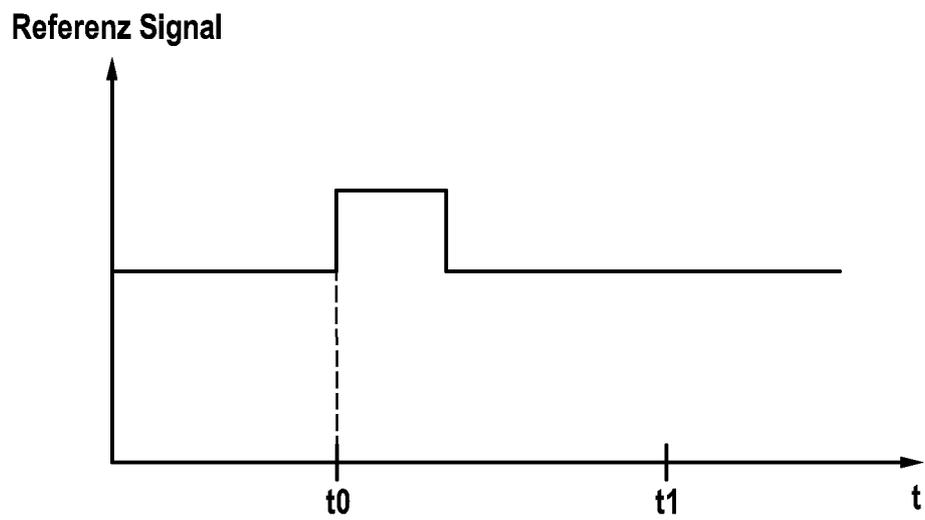


Fig. 5

