



(10) **DE 21 2017 000 247 U1** 2019.08.08

(12) **Gebrauchsmusterschrift**

(21) Aktenzeichen: **21 2017 000 247.6**
(22) Anmeldetag: **13.12.2017**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/EP2017/082564**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **21.06.2018**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2018/108981**
(47) Eintragungstag: **28.06.2019**
(45) Bekanntmachungstag im Patentblatt: **08.08.2019**

(51) Int Cl.: **G01S 7/486 (2006.01)**
G01S 17/10 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
15/377,289 13.12.2016 US
15/383,328 19.12.2016 US

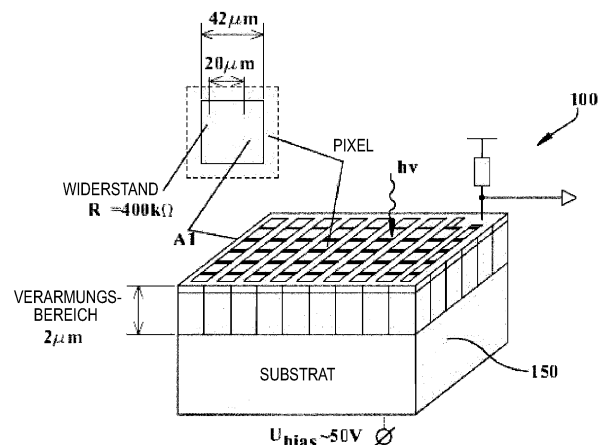
(74) Name und Wohnsitz des Vertreters:
**Manitz Finsterwald Patent- und
Rechtsanwaltspartnerschaft mbB, 80336
München, DE**

(73) Name und Wohnsitz des Inhabers:
SENSL TECHNOLOGIES LTD., Cork, IE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **LiDAR-Vorrichtung**

(57) Hauptanspruch: LiDAR-Vorrichtung, umfassend:
eine augensichere Laserquelle zum Emittieren von Laser-
pulsen;
einen Geiger-Modus-Detektor für detektierte reflektierte
Photonen;
eine Optik;
wobei die augensichere Laserquelle derart ausgestaltet ist,
dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die
selektiv an die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit
angepasst ist.



Beschreibung**GEBIET DER ERFINDUNG**

[0001] Die Erfindung betrifft eine LiDAR-Vorrichtung. Insbesondere, aber nicht ausschließlich, betrifft die vorliegende Offenbarung eine LiDAR-Vorrichtung, die eine augensichere Laserquelle umfasst, die derart ausgestaltet ist, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die an die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit angepasst ist.

HINTERGRUND

[0002] Ein Silizium-Fotovervielfacher (SiPM von Silicon Photomultiplier) ist ein auf einzelne Photonen empfindlicher Festkörpersensor mit hohem Leistungsvermögen. Er ist aus einem zusammengefassten Array von eng gepackten Einzel-Photonen-Lawinen-Fotodioden-(SPAD-)Sensoren (SPAD von Single Photon Avalanche Photodiode) mit integrierten Löschwiderständen (quench resistors) gebildet, was zu einem kompakten Sensor führt, der eine hohe Verstärkung ($\sim 1 \times 10^6$), eine hohe Detektionseffizienz ($> 50\%$) und schnelle Zeiten (Anstiegszeiten unterhalb von ns) aufweist, was alles mit einer Vorspannung von $\sim 30\text{ V}$ erreicht wird.

[0003] Typische ToF-LiDAR-Systeme aus dem Stand der Technik verwenden gepulste oder kontinuierliche Beleuchtung. Die Letztere verwendet ein kontinuierlich zeitlich variierendes Signal, das als ein Sinussignal dargestellt werden kann. Um die Entfernung des Ziels zu detektieren, ist es erforderlich, das Signal zu beschaffen und jede Phasenwinkelverschiebung zwischen dem ausgehenden und dem eingehenden Signal zu ermitteln. Diese Verschiebung wird dann dazu verwendet, die Distanz von der Quelle zu dem Ziel zu berechnen. Durch die Natur der Arbeitsweise ist es erforderlich, den Peak und den Tiefpunkt des Sinussignals zu detektieren. Dieses Erfordernis, sowohl den Peak als auch den Tiefpunkt des Signals zu detektieren, vergeudet Photonen, da nicht alle detektierten Photonen bei der Ermittlung der Zieldistanz verwendet werden. Dies erfordert es, möglicherweise nicht augensichere Signalquellen mit hohen optischen Leistungen für eine Detektion mit langer Distanz von Zielen mit geringem Reflexionsvermögen zu verwenden.

[0004] Es gibt daher einen Bedarf, ein LiDAR-System, welches einen Geiger-Modus-Detektor benutzt, zur Verfügung zu stellen, das zumindest einige der Nachteile des Standes der Technik anspricht.

ZUSAMMENFASSUNG

[0005] Dementsprechend betrifft die vorliegende Offenbarung eine LiDAR-Vorrichtung, umfassend:

- eine augensichere Laserquelle zum Emittieren von Laserpulsen;
- einen Geiger-Modus-Detektor für detektierte reflektierte Photonen;
- eine Optik;

wobei die augensichere Laserquelle derart ausgestaltet ist, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die selektiv an die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit angepasst ist.

[0006] Gemäß einem Aspekt ist die durchschnittliche Leistung der Laserpulse so festgelegt, dass sie Augensicherheitsbeschränkungen erfüllt.

[0007] Gemäß einem anderen Aspekt ist die augensichere Laserquelle derart ausgestaltet, dass sie die Pulsweite variiert, um eine vorbestimmte Durchschnittsleistung zu erreichen.

[0008] Gemäß einem weiteren Aspekt ist die augensichere Laserquelle derart ausgestaltet, dass sie eine höhere Laserspitzenleistung mit der gleichen vorbestimmten Durchschnittsleistung anwendet, indem die Pulsweite der Laserpulse verringert wird.

[0009] Gemäß einem anderen Aspekt ist die augensichere Laserquelle derart ausgestaltet, dass sie eine niedrigere Laserspitzenleistung mit der gleichen vorbestimmten Durchschnittsleistung anwendet, indem die Pulsweite der Laserpulse erhöht wird.

[0010] Gemäß einem beispielhaften Aspekt wird die Laserspitzenleistung unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet:

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{T_{pw} \times PRR}$$

wobei:

P_{avg} die Durchschnittsleistung eines Laserpulses ist;

T_{pw} die Pulsweite ist; und

PRR die Wiederholungsrate ist.

[0011] Gemäß einem weiteren Aspekt ist die augensichere Laserquelle derart ausgestaltet, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die an die gewünschte Detektionsauflösung angepasst ist, so dass jedes emittierte Photon, das detektiert wird, zur Entfernungsmessgenauigkeit beiträgt.

[0012] Gemäß einem anderen Aspekt wird die erforderliche Pulsweite aus der gewünschten Entfernungsmessgenauigkeit unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet:

$$t = \frac{\Delta d * 2}{c},$$

wobei

Δd die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit ist;

c die Lichtgeschwindigkeit ist; und

t die erforderliche Laserpulsweite ist.

[0013] Gemäß einem weiteren Aspekt ist für eine gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit von 10 cm die Laserpulsweite auf 667 Pikosekunden festgelegt.

[0014] Gemäß einem Aspekt ist der Geiger-Modus-Detektor ein Einzel-Photonen-Sensor.

[0015] Gemäß einem weiteren Aspekt ist der Geiger-Modus-Detektor aus einem zusammengefassten Array von Einzel-Photonen-Lawinen-Fotodioden-(SPAD-)Sensoren (SPAD von Single Photon Avalanche Photodiode) gebildet.

[0016] Gemäß einer beispielhaften Anordnung ist ein Controller vorgesehen, der zusammen mit dem augensicheren Laser zum Steuern des augensicheren Lasers derart betreibbar ist, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die an die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit angepasst ist.

[0017] Gemäß einem anderen Aspekt ist der Controller zum Einstellen der gewünschten Entfernungsmessgenauigkeit programmierbar.

[0018] Gemäß einem Aspekt ist die Weite der Laserpulse kleiner als 1 Nanosekunden.

[0019] Gemäß einem weiteren Aspekt umfasst die Optik eine Empfangslinse.

[0020] Gemäß einem anderen Aspekt umfasst die Optik eine Sendelinse.

[0021] In einer beispielhaften Anordnung umfasst die Optik einen Strahlteiler, so dass eine einzelne Linse als eine Sendelinse und eine Empfangslinse genutzt wird. Gemäß einem Aspekt umfasst der Strahlteiler einen Polarisationspiegel, der zwischen der einzelnen Linse und dem SiPM-Detektor gelegen ist.

[0022] Gemäß einem weiteren Aspekt ist eine Aperturblende zwischen dem Geiger-Modus-Detektor und der Optik gelegen.

[0023] Gemäß einem Aspekt ist die Aperturblende an dem Brennpunkt der Optik gelegen.

[0024] Gemäß einem anderen Aspekt weist die Aperturblende Abmessungen auf, um einen erforderlichen Blickwinkel anzupassen, der auf der Größe der aktiven Fläche des Geiger-Modus-Detektors beruht.

[0025] Gemäß einem weiteren Aspekt ist der Blickwinkel kleiner als 1 Grad.

[0026] Gemäß einem beispielhaften Aspekt streut die Aperturblende Licht, das von der Optik gesammelt wird, über die gesamte aktive Fläche des Geiger-Modus-Detektors.

[0027] Gemäß einem Aspekt ist für eine gegebene Brennweite f der Blickwinkel θ des Geiger-Modus-Detektors, der an dem Brennpunkt platziert ist, und mit einer Länge L gegeben durch:

$$\theta_{x,y} = 2 \times \arctan\left(\frac{L_{x,y}/2}{f}\right)$$

wobei:

Brennweite der Empfängerlinse: f

horizontale und vertikale Sensorlänge: L_x, L_y ;

Sensorblickwinkel: $\theta_{x,y}$

[0028] Gemäß einem anderen Aspekt weist die Aperturblende Abmessungen zum Anpassen des erforderlichen Blickwinkels gemäß:

$$P_{x,y} = 2 \times f \times \tan\left(\frac{\theta_{x,y}}{2}\right)$$

wobei:

Brennweite der Empfängerlinse: f

Sensorblickwinkel: $\theta_{x,y}$

Aperturblendengröße: $P_{x,y}$

[0029] Gemäß einem Aspekt ist der Controller zusammen mit der augensicheren Laserquelle zum Steuern der augensicheren Laserquelle derart betreibbar, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die an die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit angepasst ist.

[0030] Diese und weitere Merkmale werden unter Bezugnahme auf die folgenden Figuren besser verstanden werden, die vorgesehen sind, um beim Verständnis der vorliegenden Lehre zu helfen.

Figurenliste

[0031] Die vorliegende Lehre wird nun unter Bezugnahme auf die begleitenden Zeichnungen beschrieben:

Fig. 1 veranschaulicht eine beispielhafte Struktur eines Silizium-Fotovervielfachers.

Fig. 2 ist ein schematisches Schaltkreisdigramm eines beispielhaften Silizium-Fotovervielfachers.

Fig. 3 veranschaulicht eine beispielhafte Technik für eine direkte ToF-Entfernungsmessung.

Fig. 4 veranschaulicht ein beispielhaftes ToF-Entfernungsmesssystem.

Fig. 5 veranschaulicht ein Histogramm, das unter Verwendung des ToF-Entfernungsmesssystems von **Fig. 4** erzeugt worden ist.

Fig. 6 veranschaulicht eine beispielhafte LiDAR-Vorrichtung, die einen SiPM-Detektor enthält.

Fig. 6A veranschaulicht Details der LiDAR-Vorrichtung von **Fig. 6**.

Fig. 7 veranschaulicht Details einer LiDAR-Vorrichtung gemäß der vorliegenden Lehre.

Fig. 8 veranschaulicht Details einer LiDAR-Vorrichtung gemäß der vorliegenden Lehre.

Fig. 9 veranschaulicht eine andere LiDAR-Vorrichtung, die auch gemäß der vorliegenden Lehre ist.

Fig. 10 veranschaulicht ein Laserpulsweitendiagramm eines LiDAR-Systems aus dem Stand der Technik.

Fig. 11 veranschaulicht ein Laserpulsweitendiagramm einer LiDAR-Vorrichtung gemäß der vorliegenden Lehre.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0032] Die vorliegende Offenbarung wird nun unter Bezugnahme auf eine beispielhafte LiDAR-Vorrichtung beschrieben, die die Geiger-Modus-Detektortechnologie benutzt. Es ist zu verstehen, dass das beispielhafte LiDAR-System vorgesehen ist, um beim Verständnis der Lehre zu helfen, und nicht als in irgendeiner Weise beschränkend aufgefasst werden soll. Darüber hinaus können Schaltelemente oder Komponenten, die unter Bezugnahme auf irgendeine der Figuren beschrieben sind, mit jenen von anderen Figuren oder anderen äquivalenten Schaltelementen ausgetauscht werden, ohne vom Gedanken der vorliegenden Lehre abzuweichen. Es ist festzustellen, dass der Einfachheit und Klarheit der Veranschaulichung wegen, wenn es als geeignet angesehen wird, sich Bezugszeichen in den Figuren wiederholen, um entsprechende oder analoge Bestandteile anzugeben.

[0033] Zu Beginn unter Bezugnahme auf **Fig. 1** ist ein Silizium-Fotovervielfacher **100** gezeigt, der ein Array von Geiger-Modus-Fotodioden umfasst. Wie es veranschaulicht ist, ist ein Löschwiderstand (quench resistor) benachbart zu jeder Fotodiode vorgesehen, der verwendet werden kann, um den Lawinenstrom zu begrenzen. Die Fotodioden sind elektrisch mit gemeinsamen Vorspannungs- und Masseelektroden durch Aluminium- oder ähnliche leitende Bahnen verbunden. Ein schematischer Schaltkreis ist in **Fig. 2** für einen herkömmlichen Silizium-Fotovervielfacher **200** gezeigt, in welchem die Anoden eines Arrays von Fotodioden mit einer gemeinsamen Masseelektrode verbunden sind und die Kathoden des Arrays über Strombegrenzungswiderstände mit einer gemeinsamen Vorspannungselektrode verbunden sind, um über die Dioden hinweg eine Vorspannung anzulegen. Der Silizium-Fotovervielfacher **100** kann gemäß der vorliegenden Lehre als ein Geiger-Modus-Detektor verwendet werden. Es ist nicht beabsichtigt, die vorliegende Lehre auf den beispielhaften Geiger-Modus-Detektor zu begrenzen, der in der beispielhaften Ausführungsform beschrieben ist, da andere Geiger-Modus-Detektoren benutzt werden können, wie etwa Einzel-Photonen-Lawinen-Dioden (SPADs) oder dergleichen.

[0034] Der Silizium-Fotovervielfacher **100** integriert ein dichtes Array von kleinen, elektrisch und optisch isolierten Geiger-Modus-Fotodioden **215**. Jede Fotodiode **215** ist in Reihe mit einem Löschwiderstand **220** geschaltet. Jede Fotodiode **215** wird als eine Mikrozeile bezeichnet. Die Zahl von Mikrozeilen beträgt in der Regel zwischen 100 und 3000 pro mm². Die Signale aller Mikrozeilen werden dann summiert, um den Ausgang des SiPM **200** zu bilden. Ein vereinfachter elektrischer Schaltkreis ist vorgesehen, um das Konzept in **Fig. 2** zu veranschaulichen. Jede Mikrozeile detektiert Photonen identisch und unabhängig. Die Summe der Entladeströme von jedem dieser einzelnen binären Detektoren wird kombiniert, um einen quasi analogen Ausgang zu bilden, und ist somit in der Lage, Informationen über den Betrag eines einfallenden Photonenflusses zu liefern.

[0035] Jede Mikrozeile erzeugt eine hoch gleichmäßige und quantisierte Menge an Ladung jedes Mal dann, wenn die Mikrozeile einen Geiger-Durchbruch erfährt. Die Verstärkung einer Mikrozeile (und somit des Detektors) ist als das Verhältnis der Ausgangsladung zu der Ladung an einem Elektron definiert. Die Ausgangsladung kann aus der Überspannung und der Mikrozeilenkapazität berechnet werden.

$$G = \frac{C \cdot \Delta V}{q}$$

wobei

G die Verstärkung der Mikrozeile ist;

C die Kapazität der Mikrozeile ist;

ΔV die Überspannung ist; und

q die Ladung eines Elektrons ist.

[0036] LiDAR ist eine Entfernungsmesstechnik, die zunehmend bei Anwendungen, wie etwa mobile Entfernungsmessung, Kraftfahrzeug-ADAS (Advanced Driver Assistance Systems, fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme), Gestenerkennung und 3D-Kartierung angewandt wird. Das Anwenden eines Geiger-Modus-Detektors, wie etwa eines SiPM-Sensors, hat eine Anzahl von Vorteilen gegenüber alternativen Sensortechnologien, wie etwa Lawinenfotodiode (APD), PIN-Dioden und Fotovervielfacherröhren (PMT), insbesondere für mobile und Hochvolumenprodukte. Die Grundkomponenten, die typischerweise für ein direktes ToF-Entfernungsmesssystem verwendet werden, sind in **Fig. 3** veranschaulicht. Bei der direkten ToF-Technik wird ein peri-

odischer Laserpuls **305** auf das Ziel **307** gerichtet. Das Ziel **307** streut und reflektiert die Laserphotonen und einige der Photonen werden zurück in Richtung des Detektors **315** reflektiert. Der Detektor **315** wandelt die detektierten Laserphotonen (und einige detektierte Photonen aufgrund von Rauschen) in elektrische Signale um, die dann durch eine Zeitgebungselektronik von 325 zeitgestempelt werden.

[0037] Die Flugzeit t kann verwendet werden, um die Distanz D zu dem Ziel aus der folgenden Gleichung zu berechnen

$$D = c\Delta t/2, \quad \text{Gleichung 1}$$

wobei

c = Lichtgeschwindigkeit; und

Δt = Flugzeit.

[0038] Der Detektor **315** muss zurückgekehrte Laserphotonen von dem Rauschen (Umgebungslicht) unterscheiden. Es wird zumindest ein Zeitstempel pro Laserpuls erfasst. Dies ist als eine Einzelschussmessung bekannt. Das Signal/Rausch-Verhältnis kann signifikant verbessert werden, wenn die Daten von vielen Einzelschussmessungen kombiniert werden, um einen Entfernungsmesswert zu erzeugen, aus welchem die Zeiten der detektierten Laserpulse mit hoher Präzision und Genauigkeit extrahiert werden können.

[0039] Nun unter Bezugnahme auf **Fig. 4** zeigt diese einen beispielhaften SiPM-Sensor **400**, der ein Array von Einzel-Photonen-Lawinen-Fotodioden (SPAD von Single Photon Avalanche Photodiodes) umfasst, die eine Messfläche **405** definieren. Es ist eine Linse **410** zur Bereitstellung einer Korrekturoptik vorgesehen. Für eine gegebene Brennweite f eines Linsensystems ist der Blickwinkel θ eines Sensors, der an dem Brennpunkt platziert ist, und mit der Länge L gegeben durch:

$$\theta_{x,y} = 2 \times \arctan\left(\frac{L_{x,y}/2}{f}\right) \quad \text{Gleichung 2}$$

wobei:

f die Brennweite der Empfängerlinse ist;

L_x, L_y die horizontale und vertikale Sensorlänge ist; und

$\theta_{x,y}$ der Blickwinkel des SiPM-Detektors ist.

[0040] Dies bedeutet, dass ein großer Sensor einen großen Blickwinkel aufweist, wenn eine kurze Brennweite verwendet wird. Wenn die Linsenapertur erweitert wird, werden mehr Umgebungsphotonen detektiert, während die Zahl von zurückkehrenden Laserphotonen konstant bleibt. Der SiPM **400** ist gegenüber Sättigung anfällig, wie es aus dem starken Überschießen am Anfang des Histogrammfensters in **Fig. 5** ersichtlich ist. Wenn der Sensor **400** gesättigt ist, können die Laserphotonen durch den SiPM **400** nicht länger detektiert werden, was zu einer niedrigeren Signaldetektionsrate und einem niedrigeren Gesamt-SNR_H führt.

[0041] **Fig. 6** veranschaulicht ein beispielhaftes LiDAR-System **600**. Dieses umfasst eine Laserquelle **605** zum Übertragen einer periodischen Laserpulses **607** durch eine Sendelinse **604**. Ein Ziel **608** streut und reflektiert Laserphotonen **612** durch eine Empfangslinse **610**, und einige der Photonen werden zurück in Richtung eines SiPM-Sensors **615** reflektiert. Der SiPM-Sensor **615** wandelt die detektierten Laserphotonen und einige detektierte Photonen aufgrund von Rauschen in elektrische Signale um, die dann durch die Zeitgebungselektronik zeitgestempelt werden. Um zu vermeiden, dass der SiPM-Sensor **610** seinen Sättigungspunkt erreicht, ist es erforderlich, dass die Brennweite relativ lang gehalten wird. Für eine gegebene Brennweite f eines Linsensystems ist der Blickwinkel θ des SiPM-Sensors **615**, der auf dem Brennpunkt angeordnet ist und mit der Länge L durch Gleichung 2 gegeben. Somit erfordert ein großer Sensor einen großen Blickwinkel, wenn eine kurze Brennweite verwendet wird, wie es in **Fig. 6A** veranschaulicht ist. Große Blickwinkel (AoV), in der Größenordnung von vielen zehn Graden, bis zu 90°+ werden in LiDAR-Sensoren aus dem Stand der Technik verwendet, wo der Detektor auf eine Szene starrt, während ein Laser typischerweise die Szene für eine Winkelauflösung abtastet. Diese Sensoren beruhen typischerweise auf PIN- und Lawinendioden, die eine starke Umgebungslichtunterdrückung aufweisen. Jedoch wird das Signal/Rausch-Verhältnis SNR durch große Blickwinkel stark beeinträchtigt, da der Rauschpegel durch den Empfänger-AoV festgelegt wird, welcher die Genauigkeit des

LiDAR-Systeme begrenzt. Außerdem sind diese Vorrichtungen nicht für Weitentfernungsmess-LiDAR geeignet, wo die Anzahl der zurückgekehrten Photonen eine Einzel-Photonen-Detektionseffizienz erfordert.

[0042] SiPM-Detektoren, die SPAD- oder SiPM-Sensoren mit kurzem Blickwinkel verwenden, erfüllen die Einzel-Photonen-Detektionseffizienzanforderung. Sensoren mit kurzen AoV, d.h. < 1 Grad, können entweder als Einzelpunktsensoren in Abtastsystemen zum Abdecken eines größeren Gesamt-AoVs verwendet werden oder in Arrays angeordnet werden. SPAD/SiPMs-Sensoren leiden jedoch aufgrund des notwendigen Erholungs-/Wiederaufladeprozesses der Sensoren an einem begrenzten Dynamikbereich. Bei jeder Fotodetektion in einer Mikrozeile des SiPM muss der Lawinenprozess durch zum Beispiel einen Widerstand unterdrückt (ausgelöscht) werden, welcher den Fotostrom entlädt und die Diode aus dem Durchbruchbereich herausbringt. Dann beginnt ein passiver oder aktiver Wiederaufladeprozess, um die Diodenvorspannungs-Spannung wiederherzustellen, wodurch die Anfangsbedingungen für die nächste Fotodetektion bereit wiederhergestellt werden. Die Zeitdauer, während der der Lösch- und Wiederaufladeprozess stattfindet, wird üblicherweise als Totzeit oder Erholungszeit bezeichnet. Es können keine weiteren Detektionen in diesem Zeitfenster aufgrund dessen stattfinden, dass die Vorspannungsbedingung der Diode außerhalb des Geiger-Modus liegt. Wenn in einem SiPM eine Mikrozeile in das Totzeitfenster eintritt, kann die andere Mikrozeile dennoch Photonen detektieren. Somit definiert die Zahl von Mikrozeilen den Photonendynamikbereich des Sensors, was zulässt, dass eine höhere Zahl von Photonen pro Zeiteinheit detektiert werden kann. Wenn keine Mikrozeilen für die Detektion aufgrund von Totzeit verfügbar sind, sagt man, dass der SiPM in seinem Sättigungsbereich ist. Es ist eine hohe Zahl von Dioden innerhalb eines SiPM (Mikrozeilen) notwendig, um den Erholungsprozess zu kompensieren, was die involvierten Einheiten des Detektors beschränkt. Große SiPMs liefern einen hohen Dynamikbereich. Die Größe des SiPM zusammen mit der Brennweite des empfangenen legt den Blickwinkel fest, wie nach Gleichung 2 und wie es in **Fig. 6A** veranschaulicht ist.

[0043] SiPM-Detektoren leiden an Sättigung bei hohen Umgebungslichtbedingungen aufgrund von Detektor-totzeit. Die vorliegende Offenbarung spricht dieses Problem an, indem der Blickwinkel (AoV von angle of view) des SiPM-Detektors begrenzt wird, um das Sammeln unerwünschten Rauschens, d.h. nicht kohärenten Umgebungslichts, zu vermeiden. Ein kurzer Blickwinkel für einen großen Sensor erfordert in einem optischen Einzellinsensystem lange Brennweiten. Derartige Brennweiten sind für LiDAR-Systeme nicht geeignet, die in kompakten Umgebungen arbeiten müssen, in welchen der verfügbare Raum 10 cm oder weniger beträgt. Die vorliegende Lösung paart einen SiPM-Sensor, der als ein Geiger-Modus-Detektor arbeitet, mit einer Empfängerlinse und einem Aperturblendenelement, das den AoV begrenzt und die Brennweitenerfordernisse reduziert, wodurch zugelassen wird, dass SiPM-Sensoren in LiDAR-Systeme eingebaut werden können, die in einer kompakten Umgebung arbeiten. Das Aperturblendenelement sperrt das Licht, das von einem großen Blickwinkel kommt, und spreizt das gesammelte Licht über die gesamte Fläche des SiPM, wodurch der Detektionseffizienzgrad einer Linsenanordnung mit langer Brennweite effektiv erreicht wird.

[0044] Nun unter Bezugnahme auf **Fig. 7**, zeigt diese einen beispielhaften SiPM-Sensor **700**, der in eine LiDAR-Vorrichtung gemäß der vorliegenden Lehre eingebaut sein kann. Der SiPM-Sensor **700** umfasst ein Array von Einzel-Photonen-Lawinen-Fotodioden (SPAD von Single Photon Avalanche Photodiode), die eine Messfläche **705** definieren. Es ist eine Linse **710** vorgesehen, um eine Korrekturoptik zur Verfügung zu stellen. Eine Aperturblende **715** ist zwischen der Linse **710** und der Messfläche **705** vorgesehen, welche das Licht, das von einem größeren Winkel kommt, sperrt und das gesammelte Licht auf die Sensorfläche **705** streut, wodurch damit die Notwendigkeit für längere Brennweiten überwunden wird. Eine Apertur ist eine Öffnung oder ein Loch, welche/welches die Übertragung von Licht dort hindurch ermöglicht. Die Brennweite und Apertur einer optischen Vorrichtung bestimmen den Kegelwinkel einer Vielzahl von Strahlen, die an einem Brennpunkt in einer Bildebene ankommen. Die Apertur kollimiert die Lichtstrahlen und ist sehr wichtig für die Bildqualität. Wenn eine Apertur schmal ist, werden stark kollimierte Strahlen hindurchgelassen, was zu einem scharfen Brennpunkt an der Bildebene führt. Wenn jedoch die Apertur breit ist, werden nicht kollimierte Strahlen durch die Apertur gelassen, was den scharfen Brennpunkt für bestimmte Strahlen, die aus einer bestimmten Distanz ankommen, begrenzt. Somit führt eine weite Apertur zu einem scharfen Bild für Objekte in einem bestimmten Abstand. Der Betrag an einkommenden Strahlen wird auch durch die Größe der Apertur bestimmt. Eine optische Vorrichtung kann Elemente aufweisen, die die Strahlbündel begrenzen. In der Optik werden diese Elemente dazu verwendet, das Licht, das durch die optische Vorrichtung gelassen wird, zu begrenzen. Diese Elemente werden gewöhnlich als Blenden bezeichnet. Eine Aperturblende ist die Blende, die den Strahlkegelwinkel und die Helligkeit an dem Bildpunkt festlegt. Die Brennweite der Optik des SiPMs **700** kann infolge der Aperturblende **715** wesentlich kleiner sein als die der Optik des SiPM **400**.

[0045] Um den Blickwinkel zu reduzieren, während der Dynamikbereich aufrecht erhalten wird, der für eine gegebene Genauigkeit und eine Entfernungsmessgenauigkeit erforderlich ist, wird ein großer Sensor in der

Regel mit einer Linsenapertur mit langer Brennweite gepaart, wie es in **Fig. 6A** veranschaulicht ist. Lange Brennweiten -10+ cm sind jedoch nicht für kompakte Systeme wirksam, wo die maximale Länge in der Regel ~10 cm oder weniger beträgt. Anwendungen, die kompakte LiDAR-Systeme erfordern, umfassen autonome Fahrzeuge, fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme (ADAS von Advanced Driver Assistance Systems) und 3D-Bildgebung. Die vorliegende Lösung stellt eine LiDAR-Vorrichtung **800** zur Verfügung, die die Vorteile der SPAD/SiPM-Technologie nutzt und dafür geeignet ist, in einer kompakten Umgebung aufgenommen zu werden, indem sie ein Aperturblendenelement **820** enthält. Das Aperturblendenelement **820** ist zwischen dem Sensor **815** und einer Linse **810** mit kurzer Brennweite gelegen. Die Aperturblende **820** hat zwei primäre Funktionen. Zunächst wird die Aperturblende verwendet, um das Licht, das von einem ursprünglich größeren Winkel kommt, zu sperren. Die Größe der Aperturblende beruht auf der Größe der Sensorfläche und der Brennweite. Zweitens streut die Aperturblende das gesammelte Licht über die gesamte aktive Fläche des Sensors, um den Dynamikbereich auszubereiten, der aufgrund des großen Sensors verfügbar ist.

[0046] Die Abmessungen und die Position der Aperturblende betreffen beide die Größe der Sensorfläche und den gewünschten Blickwinkel und die Brennweite der Empfängerlinse. Die Abmessung $P_{x,y}$ kann zu dem erforderlichen Blickwinkel gemäß der folgenden Gleichung passen:

$$P_{x,y} = 2 \times f \times \tan\left(\frac{\theta_{x,y}}{2}\right) \quad \text{Gleichung 3}$$

[0047] Während der Sensor in einer bestimmten Distanz platziert ist, um die Streuung des Lichts der gesamten aktiven Fläche sicherzustellen:

$$x = f \times \frac{L_x}{D_{lens}} \quad \text{Gleichung 4}$$

wobei:

f die Brennweite der Empfängerlinse ist;

$\theta_{x,y}$ der Sensorblickwinkel ist;

$P_{x,y}$ die Aperturblendenabmessung ist; und

D_{lens} der Durchmesser der Empfängerlinse ist.

[0048] Das Licht kann sich gleichmäßig über die aktive Sensorfläche ausbreiten; jedoch ist keine Bildgebungsfähigkeit erforderlich, da das System ein Einzelpunktsensor ist. Es ist anzumerken, dass die gegebenen Gleichungen theoretische Maxima darstellen und beispielhaft vorgesehen sind. Die Distanzen können eine Justierung erfordern, um Toleranzen zu berücksichtigen.

[0049] Nun unter Bezugnahme auf **Fig. 9** ist eine beispielhafte LiDAR-Vorrichtung **900** veranschaulicht, die auch gemäß der vorliegenden Lehre ist. Die LiDAR-Vorrichtung **900** ist im Wesentlichen ähnlich wie die LiDAR-Vorrichtung **800**, und ähnliche Elemente sind mit ähnlichen Bezugszeichen markiert. Der Hauptunterschied ist, dass die LiDAR-Vorrichtung **900** eine gemeinsam genutzte Optik für den Sender **905** und den Empfänger **910** umfasst. Ein Strahlteiler, der durch einen Polarisationspiegel **920** vorgesehen ist, ist zwischen der Linse **810** und der Aperturblende **820** vorgesehen. Der Polarisationspiegel reflektiert den Laserstrahl auf die Szene und lenkt das reflektierte Licht auf den SiPM-Sensor **910**.

[0050] Fachleute auf dem Gebiet werden feststellen, dass die Benutzung einer Aperturblende zulässt, dass die LiDAR-Systeme **800** und **900** eine kurze Brennweite haben können, während eine große Sensorfläche in der Größenordnung von 1 mm² oder größer benutzt wird. Da die LiDAR-Vorrichtung der vorliegenden Lehre ein optisches System mit einer kurzen Brennweite benutzt, lässt es zu, dass das LiDAR-System in kompakten Umgebungen mit einer Länge von 10 cm oder weniger zwischen dem Detektor und der Empfängeroptik eingebaut sein kann. Die folgende Tabelle liefert einige Beispielabmessungen für die Komponenten der LiDAR-Vorrichtung gemäß der vorliegenden Lehre. Die Beispielabmessungen sind lediglich beispielhaft vorgesehen, und es ist nicht beabsichtigt, die vorliegende Lehre auf die vorgesehenen Beispielabmessungen zu begrenzen.

Aktive Fläche von SiPM-Sensor	Distanz von Aperturblende von SiPM-Sensor	Blickwinkel	Aperturblendenabmessungen
1 mm ²	0,197 mm	0,1°	87,3 µm
3 mm ²	0,59 mm	0,5°	436 µm
6 mm ²	1,18 mm	1°	873 µm
Beispiele für eine 1 Zoll-Linse mit einer Brennweite von 5 cm			

[0051] Die LiDAR-Vorrichtung **900** kann als Flugzeit-(ToF-)LiDAR-System (ToF von time of flight, Flugzeit) arbeiten, so dass ein Laserpuls einen Sender **905** zu einer bekannten Zeit verlässt. Nachdem der Laserpuls auf ein Ziel **925** trifft, wird reflektiertes Licht zu dem Empfänger **910** zurückgeführt. Wenn das Ziel **925** eine spiegelartige Oberfläche aufweist, wird die spiegelnde Reflexion Photonen in einem Winkel äquivalent zu dem Einfallswinkel reflektieren. Dies kann dazu führen, dass die maximale Zahl von Photonen, die von dem Ziel reflektiert wird, an dem Empfänger **910** detektiert wird. Es können Standard-Lawinen-Fotodioden-(APD-)Sensoren verwendet werden, um Licht von einem Retroreflektor zu detektieren, der Licht zurück entlang des Einfallsweges ungeachtet des Einfallswinkels reflektiert. Jedoch sind die meisten Oberflächen in der realen Welt keine spiegelnden Ziele und reflektieren das einfallende Licht nicht direkt. Diese nicht spiegelnden Flächen können typischerweise als Lambertsche Oberfläche dargestellt werden. Wenn eine Lambertsche Oberfläche von einem Empfänger mit einem endlichen Blickwinkel (AoV) betrachtet wird, ist die Quantität von empfangenen Photonen mit dem Betrachtungswinkel unveränderlich, und die Photonen werden über eine Oberfläche mit 2π Steradian ausgebreitet. Der Nettoeinfluss eines Lambertschen Reflektors ist derart, dass die Zahl von zurückgekehrten Photonen proportional zu $1/\text{Distanz}^2$ ist. Zusätzlich ist die Zahl von gesendeten Photonen durch Augensicherheitsrandbedingungen begrenzt. Aufgrund der Reduktion der Zahl von zurückgekehrten Photonen mit $1/\text{Distanz}^2$ und dem Unvermögen, die Quellenleistung einfach zu erhöhen, ist es erwünscht, dass jedes detektierte Photon zu der Gesamtgenauigkeit des LiDAR-Systems **900** beiträgt.

[0052] Typische ToF-LiDAR-Systeme aus dem Stand der Technik verwenden entweder eine gepulste oder eine kontinuierliche Beleuchtung. Die Letztere verwendet ein kontinuierlich zeitlich variierendes Signal, das als ein sinusförmiges Signal dargestellt werden kann. Um die Entfernung des Ziels zu detektieren, ist es erforderlich, das Signal zu beschaffen und jede Phasenwinkelverschiebung zwischen dem ausgehenden und dem eingehenden Signal zu ermitteln. Diese Verschiebung wird dann dazu verwendet, die Distanz von der Quelle zu dem Ziel zu berechnen. Wegen der Natur der Arbeitsweise ist es erforderlich, den Peak und den Tiefpunkt des sinusförmigen Signals zu detektieren. Die Anforderung nach dem Stand der Technik, um sowohl den Peak als auch den Tiefpunkt des Signals zu detektieren, vergeudet Photonen, da nicht alle detektierten Photonen bei der Ermittlung der Zieldistanz verwendet werden. Dies erfordert es, dass potentiell nicht augensichere Signalquellen mit hohen optischen Leistungen für eine Langdistanzdetektion von Zielen mit niedrigem Reflexionsvermögen verwendet werden müssen.

[0053] Ein alternatives Verfahren für ToF-LiDAR ist es, eine gepulste Signalquelle zu verwenden und die direkte Flugzeit zwischen der Zeit, zu der die Signalquelle eingeschaltet wurde, und der Zeit, zu der der Puls an den Empfänger detektiert wurde, zu detektieren. Ein wichtiger Unterschied zwischen direkten und indirekten ToF-LiDAR-Systemen ist, dass das direkte ToF-System nur erfordert, dass das erste detektierte Photon die Distanz zu dem Ziel genau bestimmt. Nutzen aus diesem Unterschied zu ziehen, lässt zu, dass ein direktes ToF-LiDAR-System die Zieldistanz unter Verwendung einer geringeren Zahl von zurückgekehrten Photonen genau ermitteln kann. Um eine Zielentfernungsmessung über die gleiche Distanz vorzusehen, kann deshalb ein direktes ToF-System eine niedriger gepulste Quelle als ein kontinuierliches Beleuchtungssystem verwenden.

[0054] Die Weite des Pulses hat zwei Hauptimplikationen für LiDAR-Systeme für lange Distanz. Zunächst muss die Laserpulsweite zu der Bandbreite des Detektors passen. LiDAR-Systeme nach dem Stand der Technik auf der Basis von linearen Fotodioden sind bandbreitenbegrenzt und erfordern Pulsweiten von vier oder mehr Nanosekunden, um das Echosignal ausreichend zu erfassen. Wenn die Stärke des empfangenen Pulses niedriger wird, wie bei Zielen in langer Distanz mit niedrigem Reflexionsvermögen, wird die Pulsweite auch ein dominanter Faktor bei der Genauigkeit des Sensors. Die Detektion des Pulses kann zu einem beliebigen Zeitpunkt innerhalb des Laserpulses ausgelöst werden. Ein langer Puls übersetzt sich daher zu einer niedrigeren Genauigkeit der Messung.

[0055] Sensoren mit hoher Bandbreite, wie etwa SPADs/SiPMs, können mit niedrigeren Pulsweiten aufgrund des nichtlinearen Betriebsmodus und der niedrigen Anstiegszeit arbeiten. Es ist zweckmäßig, die optimale Pulsweite für eine Zielentfernungsmessgenauigkeit zu berechnen, was zulässt, dass eine Lichtquelle mit nied-

riger Leistung verwendet werden kann. Unter der Voraussetzung, dass sich Licht mit c , der Lichtgeschwindigkeit oder 299.792.458 m/s ausbreitet, kann die Distanz d zwischen dem Ziel und dem LiDAR-System durch die folgende Formel ermittelt werden

$$d = \frac{\Delta t * c}{2}, \quad \text{Gleichung 5}$$

wobei Δt die Zeitdifferenz zwischen der Aufbringung der Lichtquelle in Richtung des Ziels und dem Empfang des zurückgekehrten Lichts von dem Ziel an den Empfänger ist.

[0056] Diese Gleichung kann umgeschrieben werden, um die erforderliche Zeitdifferenz zwischen der Aufbringung der Lichtquelle und dem am Empfänger detektierten Echo oder t zu ermitteln. Dies kann durch die folgende Formel ausgedrückt werden:

$$d = \frac{\Delta d * 2}{c}, \quad \text{Gleichung 6}$$

wobei Δd die erforderliche Entfernungsmessgenauigkeit ist. Somit ist beispielsweise für eine gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit von 10 cm dann eine Laserpulsweite von 667 ps erwünscht.

[0057] Die Reduktion des Pulses lässt zu, dass eine höhere Spitzenleistung erreicht werden kann, wobei die gleiche Durchschnittsleistung beibehalten wird, was entscheidend für Augensicherheitsberechnungen ist. Unter Bezugnahme auf **Fig. 10** kann die Durchschnittsleistung eines Laserpulses aus seiner Wiederholungsrate PRR, der Pulsweite T_{pw} und der Spitzenleistung P_{peak} berechnet werden:

$$P_{avg} = P_{peak} \times \frac{T_{pw}}{T_p} = P_{peak} \times T_{pw} \times PRR \quad \text{Gleichung 7}$$

[0058] Bei Fixierung der Durchschnittsleistung aufgrund von Augensicherheitsbegrenzungen wird die Spitzenleistung berechnet als

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{T_{pw} \times PRR} \quad \text{Gleichung 8}$$

[0059] Und daher kann eine höhere Laserspitzenleistung mit der gleichen Durchschnittsleistung durch Verringern der Pulsweite erreicht werden, wie es in **Fig. 11** veranschaulicht ist.

[0060] Die vorliegende Offenbarung beschreibt eine LiDAR-Vorrichtung **800**, die eine augensichere Laserquelle **900** zum Emittieren von Laserpulsen umfasst. Ein SiPM-Detektor **910** detektiert reflektierte Photonen von einem Ziel **925**. Eine Linse **810** stellt eine Optik bereit. Ein Controller **940** kann mit der augensicheren Laserquelle **900** zusammenarbeiten, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die selektiv an die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit angepasst ist. Der Controller **940** steuert die Laserquelle derart, dass die Durchschnittsleistung der Laserpulse fest ist, um Beschränkungen hinsichtlich der Augensicherheit zu erfüllen. Begrenzungen der Laserquelle hinsichtlich der Augensicherheit sind in Standards dargelegt, die beispielsweise durch das American National Standards Institute (Ansi) Serie **Z136** oder International Standard IEC60825 ausgeführt sind. Somit ist vorstellbar, dass die Laserquelle **905** mit den Standards Ansi **Z136** oder IEC60825 kompatibel ist. Die Durchschnittsleistung der Laserpulse kann fest sein, um Augensicherheitsstandards zu erfüllen, wie sie in zumindest einem der Standards AnsiZ136 und IEC60825 dargelegt sind. Es ist nicht beabsichtigt, die vorliegende Lehre auf vorgesehene beispielhafte Augensicherheitsstandards zu begrenzen, die beispielhaft angegeben sind.

[0061] Der Controller **940** ist betreibbar, um die Laserquelle derart zu steuern, dass die augensichere Laserquelle ausgestaltet ist, um die Pulsweite zu variieren und somit eine vorbestimmte Durchschnittsleistung zu erreichen. Beispielsweise wendet die augensichere Laserquelle eine hohe Laserspitzenleistung mit der gleichen vorbestimmten Durchschnittsleistung an, indem die Pulsweite der Laserpulse verringert wird. Alternativ wendet die augensichere Laserquelle eine niedrigere Laserspitzenleistung mit der gleichen vorbestimmten Durchschnittsleistung an, indem die Pulsweite der Laserpulse vergrößert wird. Die augensichere Laserquelle

kann derart ausgestaltet sein, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die an die gewünschte Detektionsauflösung angepasst ist, so dass jedes emittierte Photon, die detektiert wird, zu der gewünschten Entfernungsmessgenauigkeit beiträgt. Zum Beispiel für eine gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit von 10 cm ist die Laserpulsweite auf **667** Pikosekunden festgelegt. Der Controller **940** ist programmierbar, um die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit festzulegen. In einer beispielhaften Ausführungsform ist die Weite der Laserpulse kleiner als 1 Nanosekunden.

[0062] Fachleute werden feststellen, dass verschiedene Modifikationen an den oben beschriebenen Ausführungsformen vorgenommen werden können, ohne vom Umfang der vorliegenden Erfindung abzuweichen. Auf diese Weise ist zu verstehen, dass die Lehre nur insofern begrenzt ist, als es im Lichte der beigefügten Ansprüche als notwendig erachtet wird. Der Ausdruck Halbleiter-Fotovervielfacher soll jegliche Festkörper-Fotovervielfachervorrichtung abdecken, wie etwa Silizium-Fotovervielfacher [SiPM von Silicon Photomultiplier], MicroPixel Photon Counter Counters [MPPC], MicroPixel Avalanche Photodiodes [MAPD], ist aber nicht darauf beschränkt.

[0063] Ähnlich werden die Wörter umfasst/umfassen, wenn sie in der Beschreibung verwendet werden, dazu benutzt, die Anwesenheit von angeführten Merkmalen, Bestandteilen, Schritten oder Komponenten zu spezifizieren, aber nicht die Anwesenheit oder Hinzufügung von einen oder mehreren zusätzlichen Merkmalen, Bestandteilen, Schritten, Komponenten oder Gruppen davon auszuschließen.

Schutzansprüche

1. LiDAR-Vorrichtung, umfassend:
eine augensichere Laserquelle zum Emittieren von Laserpulsen;
einen Geiger-Modus-Detektor für detektierte reflektierte Photonen;
eine Optik;
wobei die augensichere Laserquelle derart ausgestaltet ist, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die selektiv an die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit angepasst ist.
2. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die Durchschnittsleistung der Laserpulse fest ist, um Augensicherheitsstandards zu erfüllen, die in zumindest einem der Standards AnsiZ136 und IEC60825 dargelegt sind.
3. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, wobei die augensichere Laserquelle ausgestaltet ist, um die Pulsweite zu variieren und somit eine vorbestimmte Durchschnittsleistung zu erreichen.
4. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 3, wobei die augensichere Laserquelle ausgestaltet ist, um eine hohe Laserspitzenleistung mit der gleichen vorbestimmten Durchschnittsleistung durch Reduzieren der Pulsweite der Laserpulse anzuwenden.
5. LiDAR-Vorrichtung nach den Ansprüchen 3 oder 4, wobei die augensichere Laserquelle ausgestaltet ist, um eine niedrigere Laserspitzenleistung mit der gleichen vorbestimmten Durchschnittsleistung durch Vergrößern der Pulsweite der Laserpulse anzuwenden.
6. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, wobei die Laserspitzenleistung unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet wird:

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{T_{pw} \times PRR}$$

wobei:

P_{avg} die Durchschnittsleistung eines Laserpulses ist;
 T_{pw} die Pulsweite ist; und
PRR die Wiederholungsrate ist.

7. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die augensichere Laserquelle derart ausgestaltet ist, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die an eine gewünschte Detektionsauflösung angepasst ist, so dass jedes emittierte Photon, das detektiert wird, zu der gewünschten Entfernungsmessgenauigkeit beiträgt.

8. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die gewünschte Laserpulsweite unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet wird:

$$t = \frac{\Delta d * 2}{c},$$

wobei

Δd die gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit ist;

c die Lichtgeschwindigkeit ist; und

t die erforderliche Pulsweite des Lasers ist.

9. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 8, wobei für eine gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit von 10 cm die Laserpulsweite auf 667 Pikosekunden festgelegt ist.

10. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei der Geiger-Modus-Detektor ein Einzel-Photonen-Sensor ist.

11. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei der Geiger-Modus-Detektor aus einem zusammengefassten Array von Einzel-Photonen-Lawinen-Fotodioden-(SPAD-)Sensoren (SPAD von Single Photon Avalanche Photodiode) gebildet ist.

12. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, die ferner einen Controller umfasst, der mit dem augensicheren Laser zum Steuern der augensicheren Laserquelle derart zusammenarbeiten kann, dass die emittierten Laserpulse eine Weite aufweisen, die an eine gewünschte Entfernungsmessgenauigkeit angepasst ist.

13. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 12, wobei der Controller zum Einstellen der gewünschten Entfernungsmessgenauigkeit programmierbar ist.

14. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei die Weite der Laserpulse kleiner als 1 Nanosekunden ist.

15. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei die Optik eine Empfangslinse umfasst.

16. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 15, wobei die Optik eine Sendelinse umfasst.

17. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei die Optik einen Strahlteiler umfasst, so dass eine einzige Linse zum Senden und Empfangen benutzt wird.

18. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 17, wobei der Strahlteiler einen Polarisierungsspiegel umfasst, der zwischen der einzelnen Linse und dem Geiger-Modus-Detektor gelegen ist.

19. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 18, wobei die Aperturblende zwischen dem Geiger-Modus-Detektor und der Optik gelegen ist.

20. LiDAR-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 19, wobei die Aperturblende an dem Brennpunkt der Optik gelegen ist.

21. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 20, wobei die Aperturblende Abmessungen zum Anpassen eines erforderlichen Blickwinkels aufweist, der auf der Größe der aktiven Fläche des SiPM-Detektors beruht.

22. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 21, wobei der Blickwinkel kleiner als 1 Grad ist.

23. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 19, wobei die Aperturblende Licht, das von der Optik gesammelt wird, über die gesamte aktive Fläche des SiPM-Detektors streut.

24. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 21, wobei für eine gegebene Brennweite f der Blickwinkel $\theta_{x,y}$ des SiPM-Detektors, der an dem Brennpunkt platziert ist, und mit einer gegebenen Länge L , gegeben ist durch:

$$\theta_{x,y} = 2 \times \operatorname{atan} \left(\frac{L_{x,y}/2}{f} \right)$$

wobei:

Brennweite der Empfängerlinse: f

horizontale und vertikale Länge des Sensors: L_x, L_y ;

Blickwinkel des Sensors: $\theta_{x,y}$

25. LiDAR-Vorrichtung nach Anspruch 21, wobei die Aperturblende Abmessungen aufweist, um den erforderlichen Blickwinkel gemäß folgender Gleichung anzupassen:

$$P_{x,y} = 2 \times f \times \tan \left(\frac{\theta_{x,y}}{2} \right)$$

wobei:

Brennweite der Empfängerlinse: f

Sensorblickwinkel: $\theta_{x,y}$

Aperturblendengröße: $P_{x,y}$

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

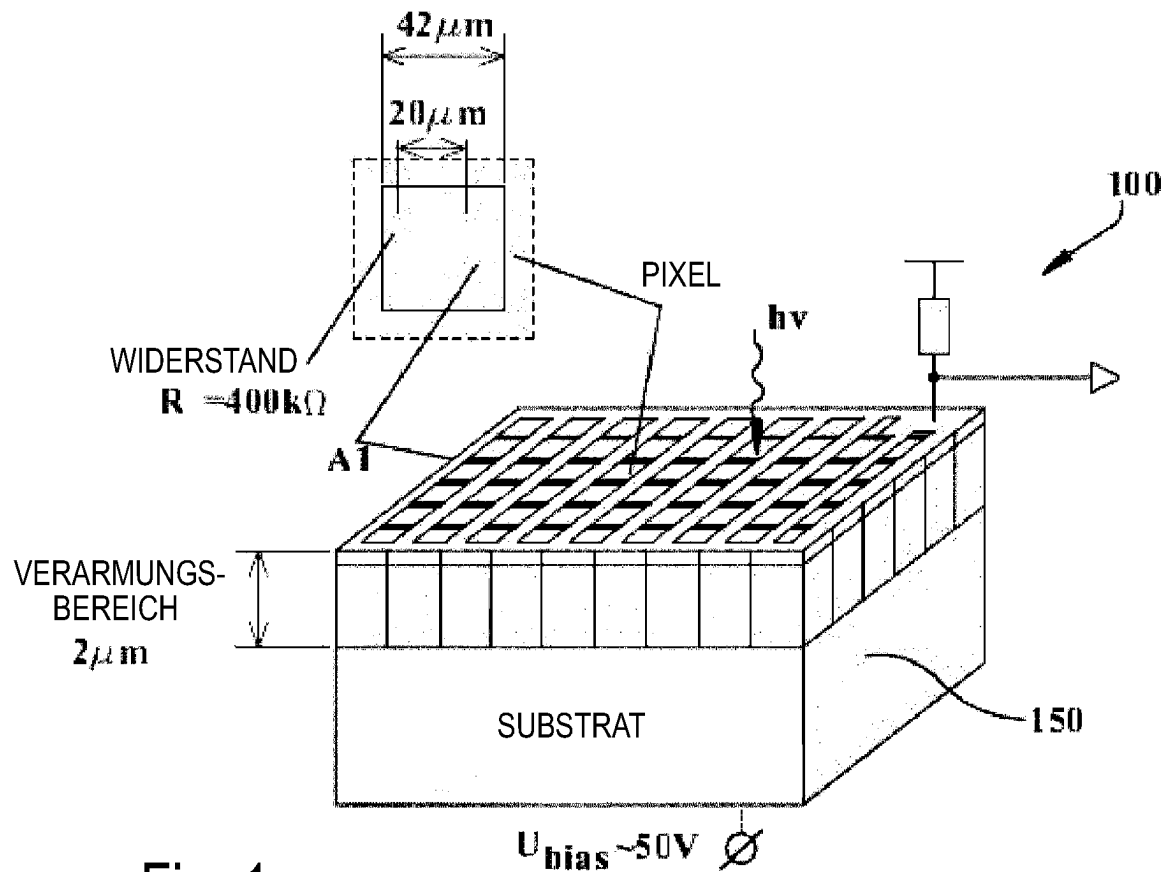


Fig. 1

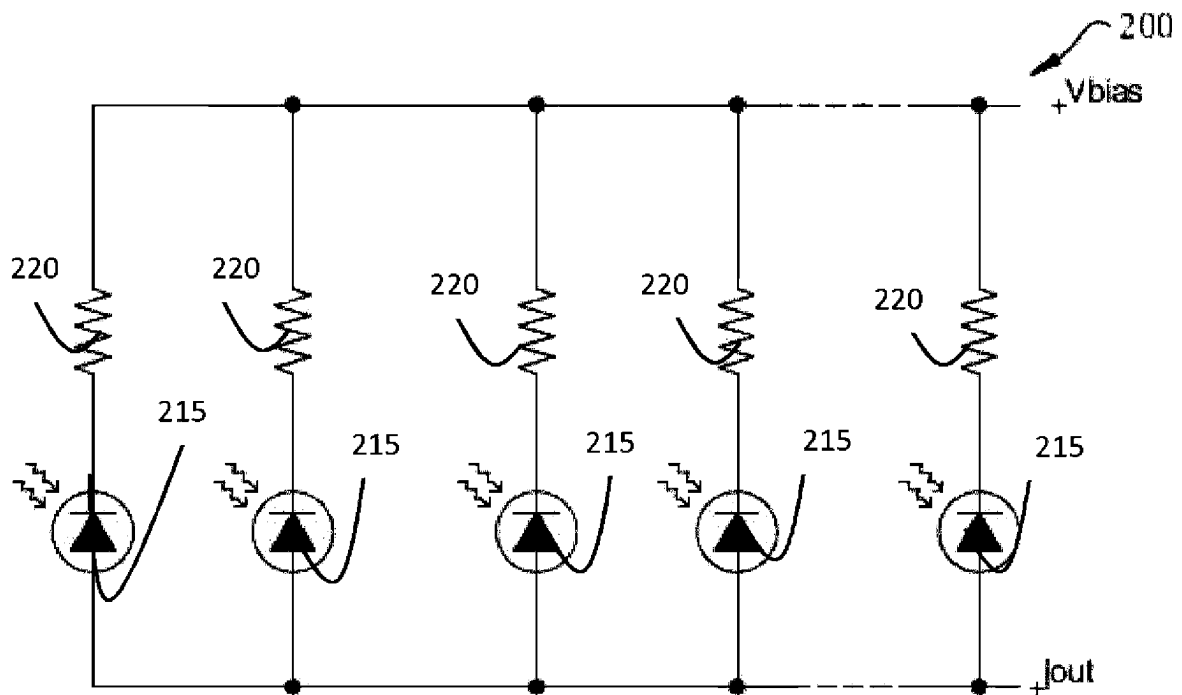


Fig. 2

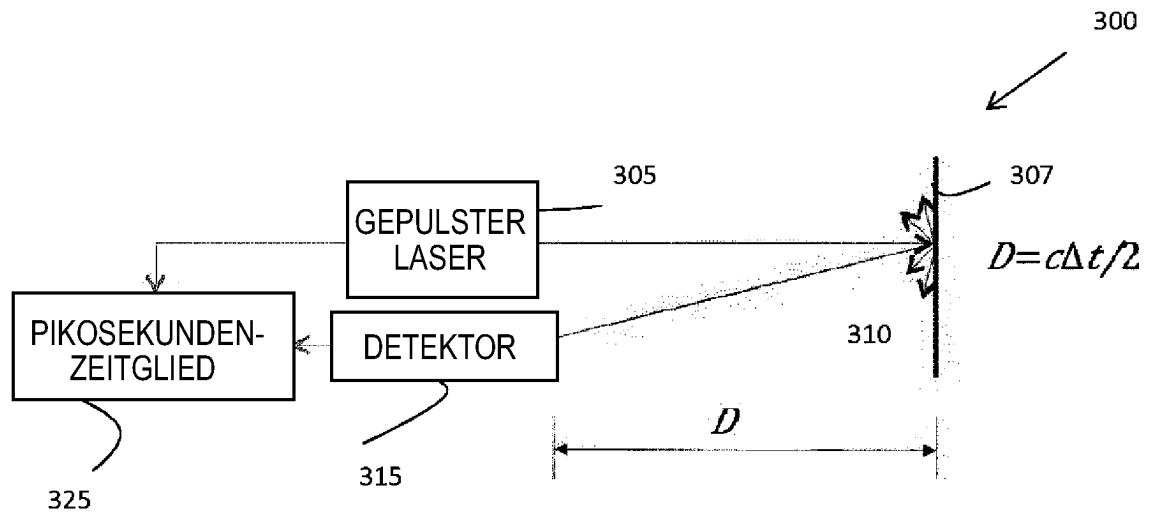


Fig. 3

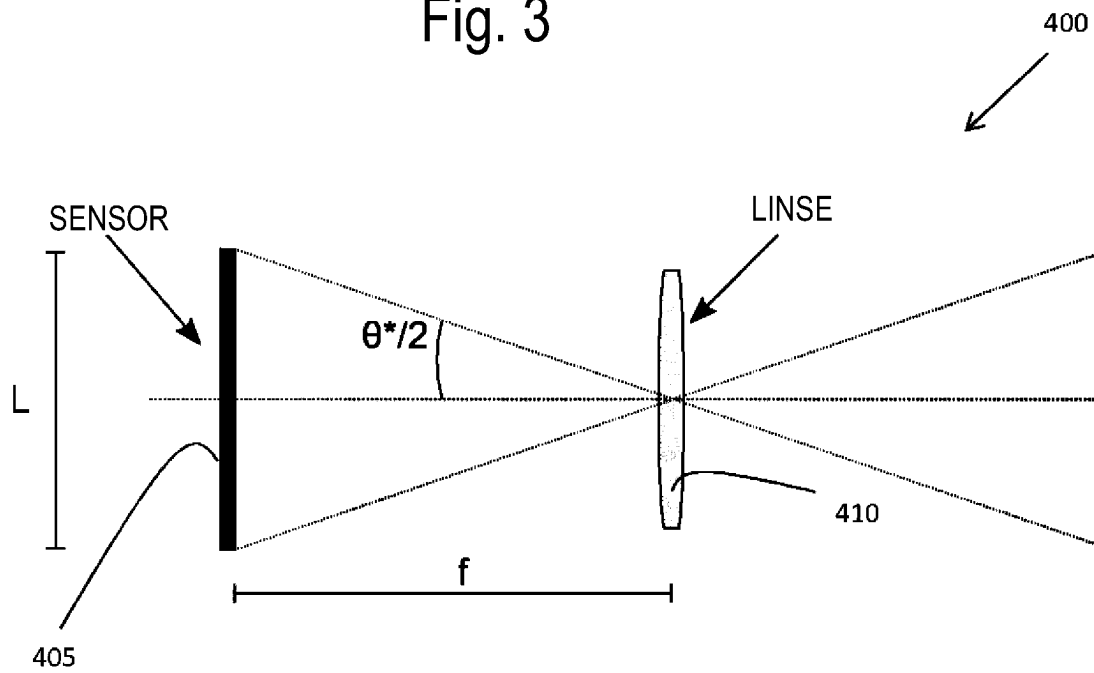


Fig. 4

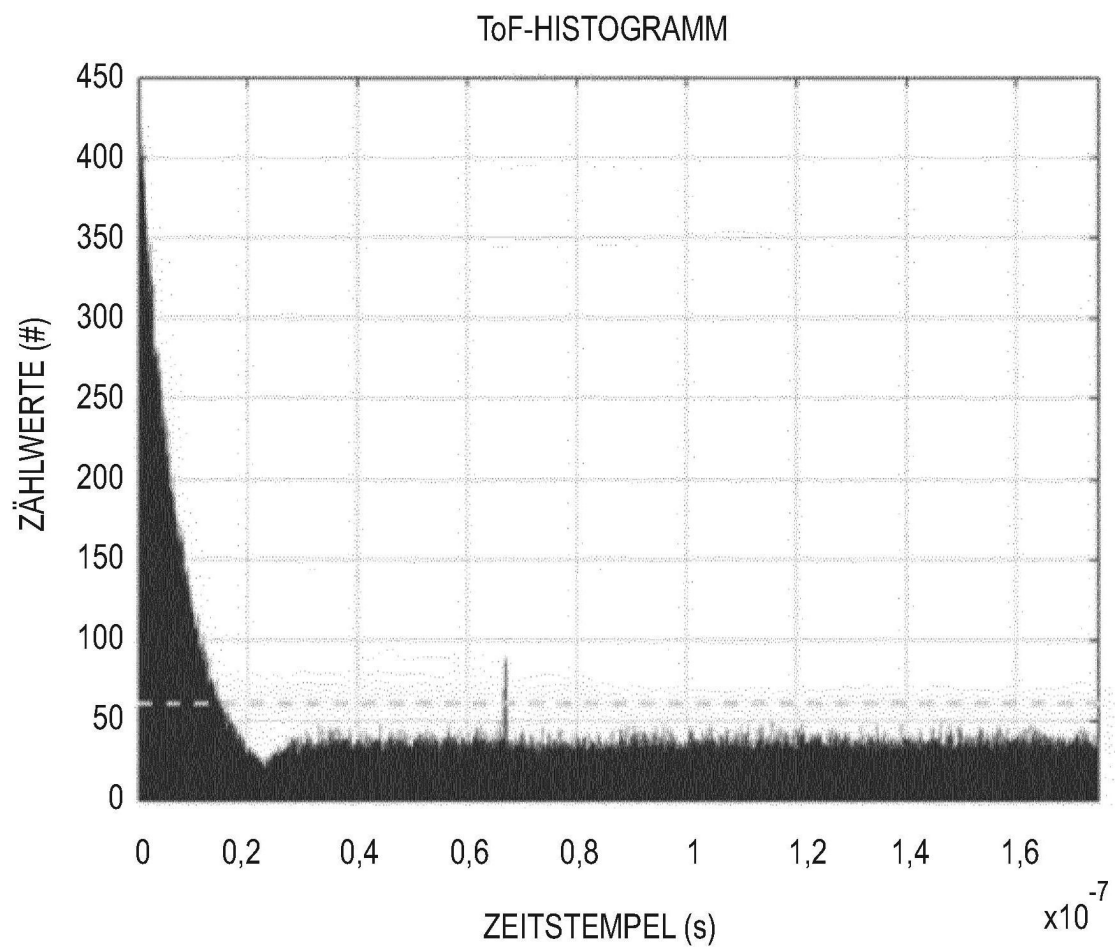


Fig. 5

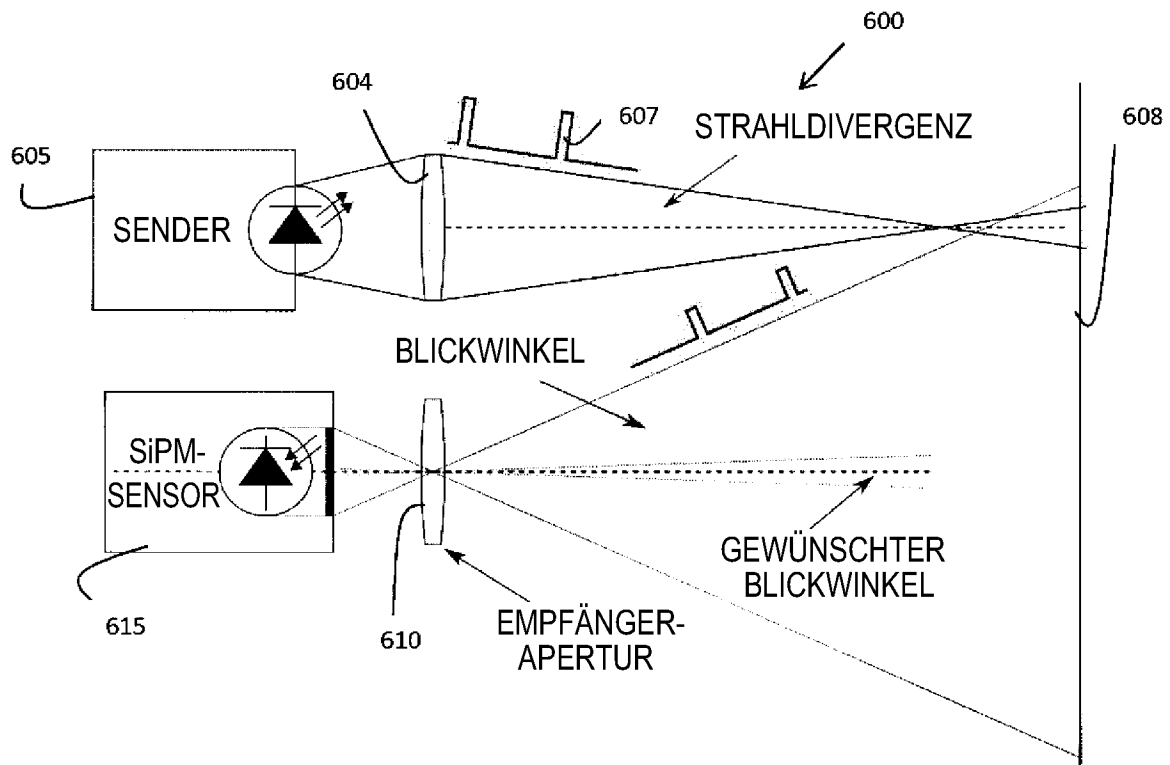


Fig. 6

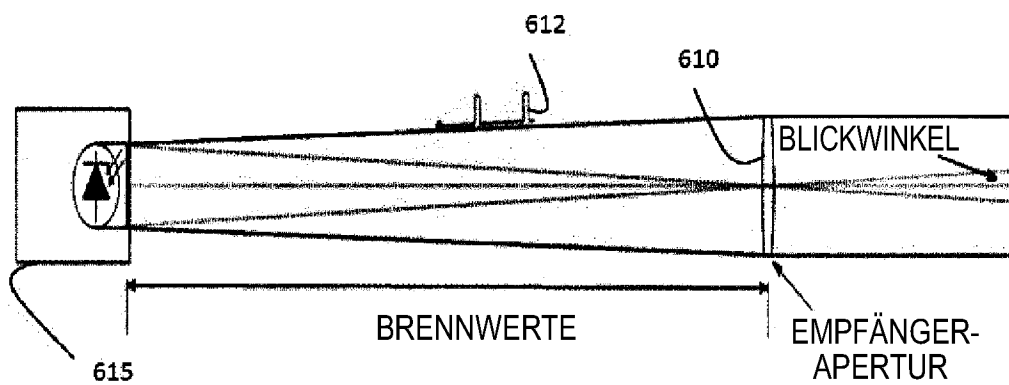


Fig. 6A

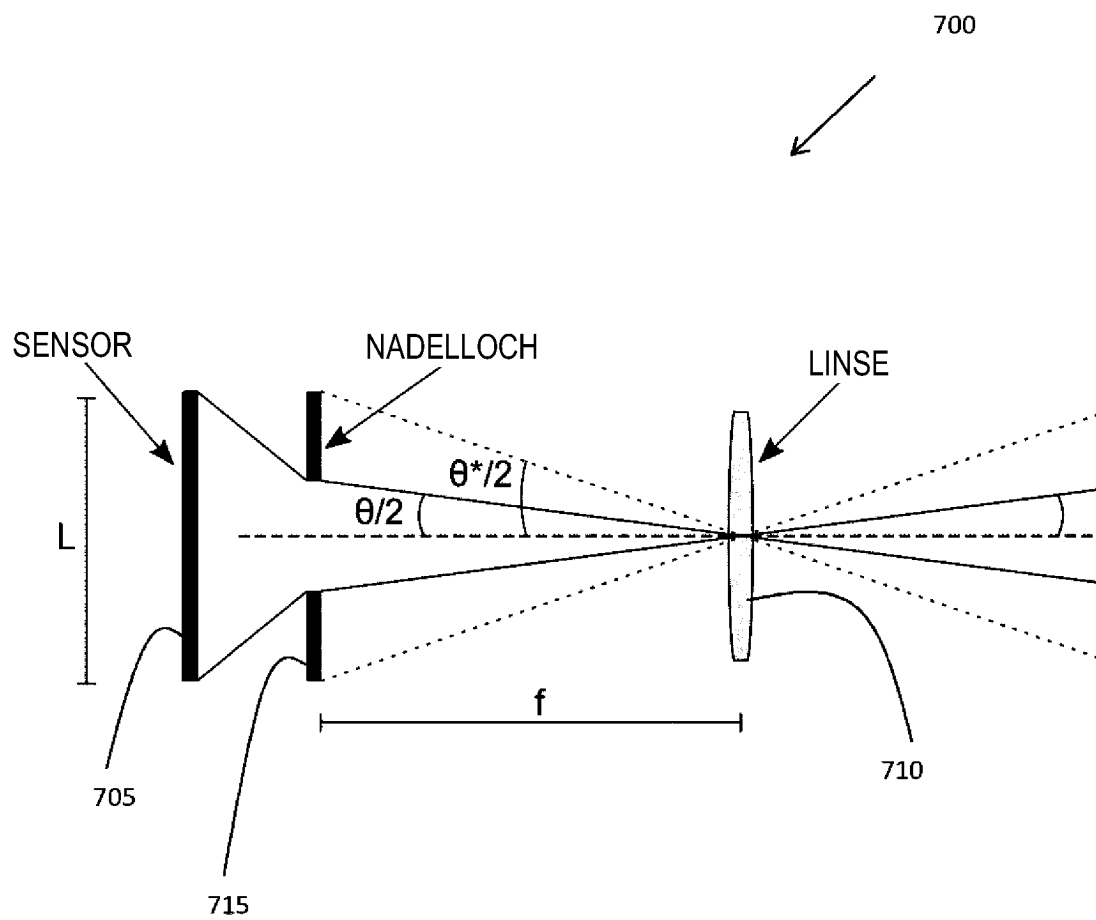


Fig. 7

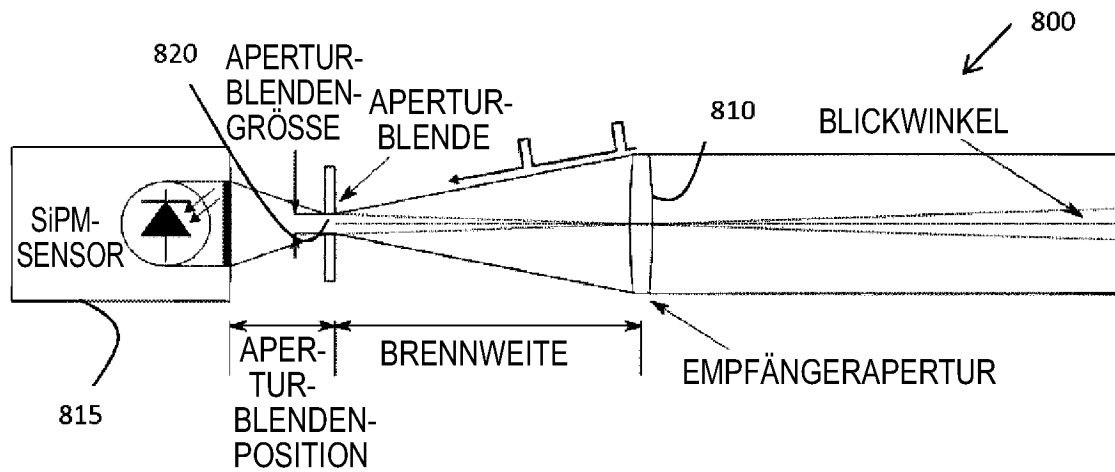


Fig. 8

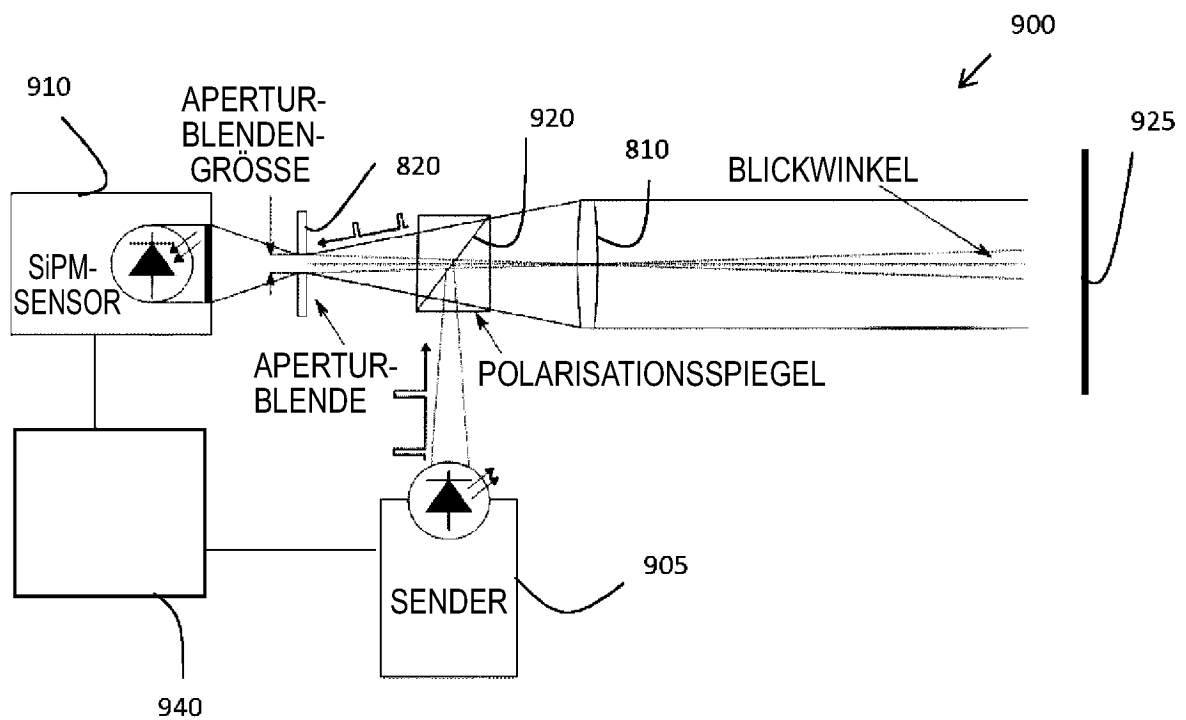


Fig. 9

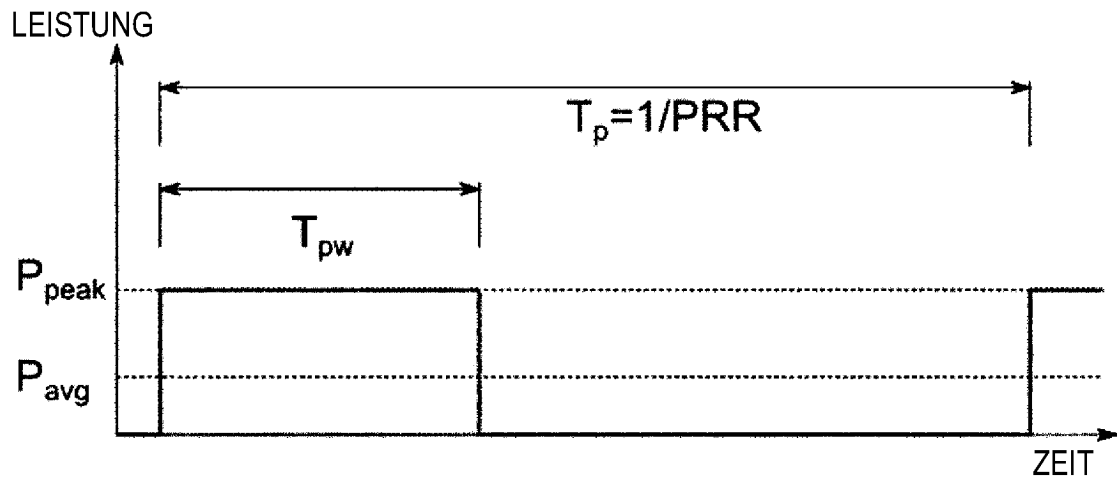


Fig. 10

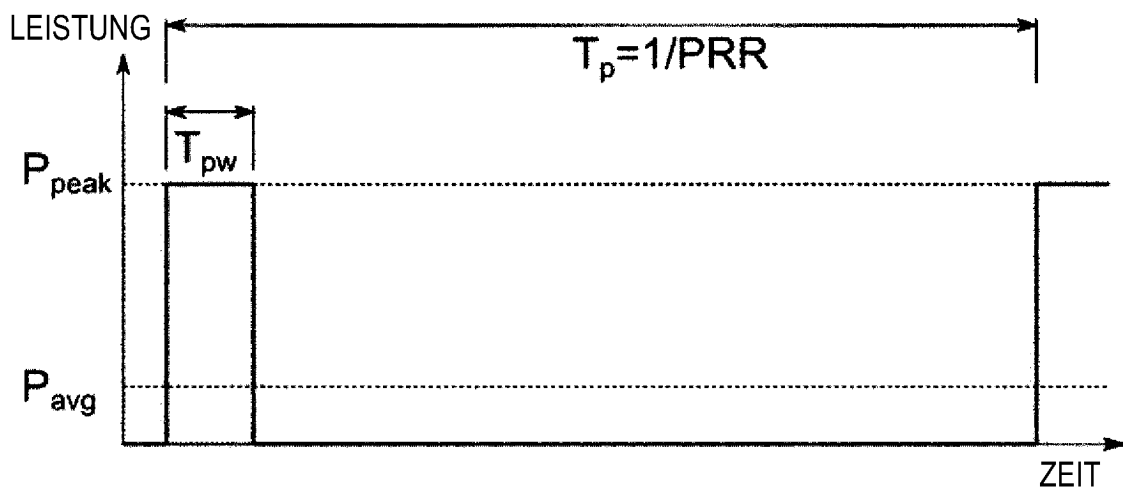


Fig. 11