



(10) **DE 10 2014 103 770 B4** 2018.10.31

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 103 770.7**

(22) Anmeldetag: **19.03.2014**

(43) Offenlegungstag: **02.10.2014**

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **31.10.2018**

(51) Int Cl.: **H03F 3/08 (2006.01)**

**H03F 3/45 (2006.01)**

**G01J 1/16 (2006.01)**

**G01J 1/44 (2006.01)**

**H04B 10/60 (2013.01)**

Innerhalb von neun 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. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:  
**13/850,496 26.03.2013 US**

(73) Patentinhaber:  
**Excelitas Canada Inc., Vaudreuil-Dorion, CA**

(74) Vertreter:  
**Wablat Lange Karthaus Anwaltssozietät, 14129  
Berlin, DE**

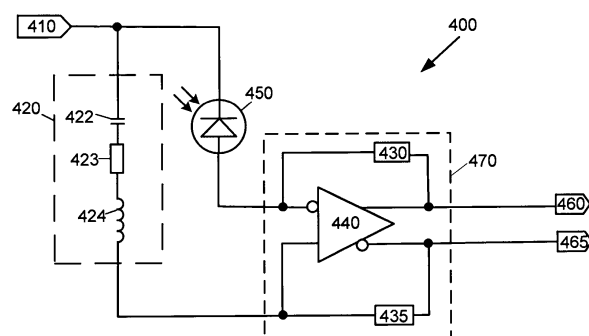
(72) Erfinder:  
**Laforce, Frederic, Coteau-du-Lac, CA**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

<b>US</b>	<b>2007 / 0 086 790</b>	<b>A1</b>
<b>EP</b>	<b>0 127 743</b>	<b>A2</b>

(54) Bezeichnung: **Optischer Differenzverstärker für Avalanche-Photodioden und SiPM**

(57) Hauptanspruch: Photoelektrische Empfängerschaltung (400) zum Umwandeln eines optischen Signales in ein elektrisches Signal für Hochfrequenzanwendungen, mit einem Differenz-Transimpedanzverstärker (470), der einen ersten Eingang und einen zweiten Eingang aufweist, mit einem als Avalanche-Photodiode oder Halbleiter-Photomultiplier ausgebildeten Photodetektor (450, 550, 650, 750), der mit einem ersten Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers (470) verbunden ist, mit einer Hochspannungsversorgungsquelle (410), die konfiguriert ist, um über eine Hochspannungsversorgung eine Vorspannung an den Photodetektor (450, 550, 650, 750) anzulegen, mit einem Impedanzelement (730), das zwischen der Hochspannungsquelle (410) und der Hochspannungsversorgung verbunden ist, und mit einem Spannungs-Sensorelement (420, 520, 620), das eine im Wesentlichen gleiche Impedanz wie der Photodetektor (450, 550, 650, 750) darstellt und dessen einer Anschluss mit der Hochspannungsversorgung und dessen anderer Anschluss mit dem zweiten Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers (470) verbunden ist, wobei das Impedanzelement (730) konfiguriert ist, die Spannung im fall eines optischen Signals großer Leistung, das auf den Photodetektor (450, 550, 650, 750) auftrifft, herabzusetzen.



**Beschreibung****BEREICH DER ERFINDUNG**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf Lichtsensoren und im Einzelnen auf eine Photodetektorschaltung.

**HINTERGRUND DER ERFINDUNG**

**[0002]** Photodetektoren werden verwendet, um Licht einer vorgegebenen Wellenlänge zu detektieren und einen Strom zu erzeugen, der zu der Intensität des detektierten Lichts proportional ist. An einen Photodetektor kann eine Vorspannung angelegt sein. Das Ausgangssignal des Photodetektors kann mit Schwankungen der Vorspannung schwanken.

**[0003]** Eine Photodetektorschaltung 100 gemäß dem Stand der Technik ist in **Fig. 1** dargestellt. Die Schaltung weist einen Photodetektor 150 zwischen einer Hochspannungsversorgung 110 und einem Transimpedanzverstärker 170 (TIA) auf, der einen Spannungsverstärker 140 und einen Rückkopplungswiderstand 130 aufweist. Das Signal (Photostrom) von dem Photodetektor wird durch den Transimpedanzverstärker 170 verstärkt, wodurch ein Photostrom von dem Detektor in eine Spannung 160 umgewandelt wird, die für eine Nachbearbeitung, beispielsweise in einer Nachbearbeitungsschaltung (nicht dargestellt) geeignet ist.

**[0004]** Jede Variation der Hochspannungsversorgung 110 wird durch die Impedanz des Photodetektors 150 auf den Eingang des Transimpedanzverstärkers 170 gekoppelt. Beispiele derartiger Schwankungen umfassen Rauschen aus der Spannungsquelle oder eine beabsichtigte Variation der Hochspannungsversorgung zur Steuerung der Verstärkung im Falle einer Avalanche-Photodiode (APD) oder eines Halbleiter-Photomultipliers (Silicon Photomultiplier - SiPM). Prinzipbedingt wird jede Spannungsschwankung von der Hochspannungsversorgung 110 in einen Strom konvertiert, der durch den Transimpedanzverstärker 170 verstärkt und auf das von dem Photodetektor 150 stammende Signal addiert wird. Die von der Schwankung der Hochspannungsversorgung 110 herrührende Spannung kann das Ausgangssignal 160 am Ausgang des Transimpedanzverstärkers 170 auf verschiedene Weisen beeinflussen. Beispielsweise kann die Schwankung als Rauschen angesehen werden, das die Detektionsfähigkeit eines Nachbearbeitungssystems (nicht dargestellt) beeinträchtigt, das das optische Signal bearbeitet. In ähnlicher Weise kann die Schwankung einen Offset am Ausgang des Transimpedanzverstärkers 170 verursachen. Zusätzlich kann die Schwankung die Frequenzantwort des Empfängers 100 beeinflussen, wenn die Spannung aus der Hochspannungsquelle 110 mit dem Photostrom korreliert ist.

**[0005]** Eine zweite Schaltung 200 gemäß dem Stand der Technik ist in **Fig. 2** dargestellt und durch die US-Patentanmeldung 2004/0130397 A1 und das US-Patent 7,561,812 B2 beschrieben. Das Ziel dieser Schaltung besteht darin, Immunität gegenüber Rauschen aus einer Spannungsquelle 210 mit einem Differenz-Transimpedanzverstärker 270 zu erzeugen. Bei der zweiten Schaltung 200 gemäß dem Stand der Technik ist eine Photodiode 250 zwischen der Spannungsquelle 210 und einem invertierenden Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers 270 verbunden, wobei ein Kondensator 220 zwischen der Spannungsquelle 210 und einem nicht-invertierenden Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers 270 angeordnet ist. Der Kondensator 220 weist einen Wert auf, der der Sperrschichtkapazität des Photodetektors 250 entspricht. Widerstände 230 und 250 sind an den invertierenden und nicht-invertierenden Eingängen des Verstärkers 240 vorgesehen. Die US-Patentanmeldung 2004/0130397 A1 und das US-Patent 7,561,812 B2 zielen beide auf Applikationen ab, bei denen die Spannung niedrig ist, und weisen bei Hochfrequenz-Applikationen unter Verwendung von Avalanche-Photodioden (APD) eine eingeschränkte Leistung auf. Für einen Halbleiter-Photomultiplier (SiPM) sind sie nicht ausreichend.

**[0006]** Bei Hochfrequenz-Applikationen unter Verwendung einer Avalanche-Photodiode oder eines SiPM kann ein einfacher Kondensator unter Umständen den Photodetektor nicht akkurat modellieren. Ferner wird eine Hochspannung benötigt, um die APD oder den SiPM vorzuspannen. Dies schränkt den praktischen Nutzen dieser Schaltung gemäß dem Stand der Technik ein.

**[0007]** Außerdem sind beide Schaltungen auf einen Gleichtaktstrom begrenzt (der Strom wird gleichzeitig an den Eingängen des Differenz-Transimpedanzverstärkers injiziert) innerhalb des Dynamikbereichs jedes Einganges des Differenz-Transimpedanzverstärkers. Eine große Schwankung in der Spannungsquelle 210 kann den Transimpedanzverstärker 270 sättigen.

**[0008]** Schwankungen der Hochspannungsversorgung werden durch das US-Patent Nr. 5,696,657 adressiert, wobei die Rate, mit der die Hochspannungsversorgung schwankt, sorgfältig gesteuert wird, um die Größe des durch die APD fließenden Stromes zu minimieren. Dies ist eine wesentliche Beschränkung eines Systemes, wenn es wünschenswert ist, die Verstärkung der APD schnell zu verändern, wie dies beispielsweise bei Entfernungsmess-Applikationen der Fall ist, bei denen ein nahes Ziel einen erheblichen Anteil des Lichtes zurück in den Empfänger reflektiert, was den Empfänger sättigt und ihn in Hinblick auf eine Detektion eines Zieles blind macht, das in größerer Entfernung in der Sichtlinie angeordnet ist. Der Stand der Technik offenbart auch

verschiedene Wege, große Ströme zu handhaben, indem der Dynamikbereich des Transimpedanzverstärkers ausgedehnt wird.

**[0009]** Die Pseudo-Differenz-Transimpedanzverstärker, die in US 6,803,825 B2 und US 6,784,750 B2 diskutiert werden, fühlen die Schwankung der Hochspannungsversorgung ab, um einen Anhaltspunkt für den Photostrom zu geben, in dem ein Koppelkondensator an der Hochspannung verwendet wird. Diese Konfiguration verwendet den Koppelkondensator als Möglichkeit, den Wechselanteil des Photostromes unabhängig von der Quelle des Wechselstromes zu messen, der durch den Photodetektor fließt. Diese Schaltungen setzen voraus, dass der Wechselstrom ausschließlich von dem Photostrom herrührt, da sie auf eine große Schwankung der Spannungsversorgung nicht reagieren können. Ferner injizieren diese Schaltungen einen Gleichstrom am Eingang des Transimpedanzverstärkers, der für eine schnelle Veränderung des Signales nicht verwendet werden kann. Dementsprechend besteht in der Industrie ein Bedürfnis danach, diese Nachteile zu adressieren.

(Ergänzungen nach Hauptantrag)

**[0010]** Es ist bereits ein optischer Empfänger mit einem Photodetektor zwischen einer Spannungsversorgung und einem Differenzverstärker bekannt. Eine programmierbare variable Kapazität ist zwischen der Spannungsversorgung und einem Eingang des Differenzverstärkers eingeschaltet (US 2007/0086790 A1). Bei dem Photodetektor handelt es sich um eine PIN-Diode.

**[0011]** Ebenfalls bekannt ist eine Lichtdetektorschaltung mit einer Photodiode, die zwischen einer Spannungsquelle und einem Eingang eines Verstärkers eingeschaltet ist. Zwischen der Spannungsquelle und dem anderen Eingang des Verstärkers ist eine Kapazität eingeschaltet (EP 0 127 743 A2).

**[0012]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine photoelektrische Empfängerschaltung zu schaffen, die gegen eine Schwankung der Hochspannungsversorgung insbesondere bei Avalanche-Photodioden oder Halbleiter-Photomultipliern immunisiert ist.

Zusammenfassung der Erfindung

(Ergänzungen nach Hauptantrag)

**[0013]** Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung eine photoelektrische Empfängerschaltung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 vor.

**[0014]** Zur Lösung der genannten Aufgabe schlägt die Erfindung ebenfalls eine photoelektrische Empfänger-

fängerschaltung mit den Merkmalen des Anspruchs 10 vor.

**[0015]** Zur Lösung der genannten Aufgabe schlägt die Erfindung ebenfalls eine photoelektrische Empfängerschaltung mit den Merkmalen des Anspruchs 19 vor.

**[0016]** Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der jeweiligen Unteransprüche.

**[0017]** Andere Systeme, Verfahren und Merkmale der vorliegenden Erfindung werden dem Fachmann bei Betrachtung der folgenden Zeichnungen und der detaillierten Beschreibung deutlich sein oder werden. Alle derartigen zusätzlichen Systeme, Verfahren und Merkmale gelten in die Beschreibung und den Schutzbereich der vorliegenden Erfindung einbezogen und als durch die beigefügten Ansprüche geschützt.

#### Figurenliste

**[0018]** Die beigefügten Zeichnungen sind in die Anmeldung aufgenommen, um ein weiteres Verständnis der Erfindung zu ermöglichen. Gleichzeitig sind sie in die Beschreibung aufgenommen und bilden einen Teil davon. Die Zeichnungen stellen Ausführungsbeispiele der Erfindung dar und dienen zusammen mit der Beschreibung dazu, die Grundprinzipien der Erfindung zu erläutern. Dabei bilden alle beschriebenen, in der Zeichnung dargestellten und in den Patentansprüchen beanspruchten Merkmale für sich genommen sowie in beliebiger geeigneter Kombination miteinander den Gegenstand der Erfindung, unabhängig von ihrer Zusammenfassung in den Patentansprüchen und deren Rückbeziehung sowie unabhängig von ihrer Beschreibung und ihrer Darstellung in der Zeichnung.

**[0019]** Es zeigt:

**Fig. 1:** ein Schaltbild einer ersten Photodetektorschaltung gemäß dem Stand der Technik,

**Fig. 2:** ein Schaltbild einer zweiten Photodetektorschaltung gemäß dem Stand der Technik,

**Fig. 3:** ein Schaltbild eines ersten Ausführungsbeispiels einer Differenz-Verstärkerschaltung für eine APD,

**Fig. 4:** ein Schaltbild eines zweiten Ausführungsbeispiels einer Differenz-Verstärkerschaltung für einen SiPM,

**Fig. 5:** ein Schaltbild eines dritten Ausführungsbeispiels einer Photodioden-Empfängerschaltung

**Fig. 6:** ein Schaltbild eines vierten Ausführungsbeispiels einer Photodioden-Differenzverstärkerschaltung mit einem Stromspiegel,

**Fig. 7:** ein Schaltbild eines fünften Ausführungsbeispiels einer Photodioden-Differenzverstärkerschaltung mit einem Stromspiegel,

**Fig. 8:** ein Schaltbild eines sechsten Ausführungsbeispiels einer Photodioden-Differenzverstärkerschaltung,

**Fig. 9:** ein Schaltbild eines siebten Ausführungsbeispiels einer Photodioden-Differenzverstärkerschaltung.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

**[0020]** Nachfolgend wird im Detail auf Ausführungsbeispiele der Erfindung Bezug genommen, von denen Beispiele in den beigefügten Zeichnungen dargestellt sind. Soweit möglich, werden die gleichen Bezugszeichen in den Zeichnungen und der Beschreibung zur Bezeichnung der gleichen oder ähnlicher Teile verwendet.

**[0021]** Die vorliegende Erfindung sieht eine Photodetektorempfängerschaltung vor, die konfiguriert ist, um zu verhindern, dass Strom, der in dem Photodetektor durch eine Veränderung der Hochspannungsversorgung induziert wird, den Ausgang des Transimpedanzverstärkers erreicht.

**[0022]** Exemplarische Ausführungsbeispiele eines optischen Verstärkers mit einer APD (Avalanche-Photodiode) oder einem SiPM (Silizium-Photomultiplier), die gegen eine Variation der Versorgungsspannung des Photodetektors immun sind, werden dargestellt. Ein Differenz-Transimpedanz-Verstärker weist einen Eingang auf, der mit dem Photodetektor verbunden ist, wobei der andere Eingang mit einer Sensorvorrichtung zum Abfühlen einer Variation der Hochspannungsversorgung verbunden ist. Das Sensorelement weist eine Schaltung auf, die die Impedanz des Photodetektors nachbildet.

**[0023]** Eine optische Verstärkerschaltung zum Umwandeln eines optischen Signales in ein elektrisches Signal verwendet einen Photodetektor, dessen Kathode mit einer Hochspannungsversorgung und dessen Anode mit dem Eingang des Transimpedanzverstärkers verbunden ist. Eine Schwankung der Hochspannungsversorgung induziert einen Wechselstrom, der durch die Avalanche-Photodiode entsprechend ihrer Impedanz fließt und auf den Photostrom aus dem Photodetektor addiert wird. Der durch die Variation der Hochspannung induzierte Strom wird auf den Photostrom aufsummiert und kann Rauschen verursachen, einen Offset der Ausgangsspannung des Transimpedanzverstärkers verursachen oder die Frequenzantwort des optischen Empfängers beeinflussen, wenn die Spannungsschwankung mit dem Photostrom korreliert ist.

**[0024]** Die vorliegende Erfindung stellt eine photoelektrische Empfängerschaltung bereit, die ein optisches Signal in ein elektrisches Signal umwandelt. Der Empfänger weist einen Differenz-Transimpedanzverstärker, eine Photodiode, deren einer Anschluss mit einem Eingang eines Differenz-Transimpedanzverstärkers und deren anderer Anschluss mit einer Hochspannungsversorgungsquelle verbunden ist, die geeignet ist, die Photodiode mit einer benötigten Vorspannung vorzuspannen, ein Spannungssensorelement, dessen einer Anschluss mit der Hochspannungsversorgung und dessen anderer Anschluss mit dem zweiten Eingang des differenziellen Transimpedanzverstärkers verbunden ist, auf. Verschiedene Ausführungsbeispiele sehen Lösungen vor, um einen optischen Verstärker gegen eine Schwankung der Hochspannungsversorgung zu immunisieren.

**[0025]** Das Spannungs-Sensorelement weist im Wesentlichen die gleiche Impedanz wie der primäre Photodetektor auf. Der Strom, der durch das Hochspannungs-Sensorelement fließt, und der Strom, der durch den Photodetektor fließt als Antwort auf eine Schwankung der Hochspannungsversorgung, werden als Gleichtaktstrom angesehen, der durch die Gleichtaktunterdrückung (Common Mode Rejection Ratio - CMMR) des Differenz-Transimpedanzverstärkers bedämpft wird. Je ähnlicher die Impedanz des Sensorelementes zu derjenigen der Lichtsensorvorrichtung ist, desto besser wird die Gleichtaktunterdrückung sein. Beispielsweise könnte im Idealfall das Sensorelement ein Dummy-Photodetektor sein, der kein Lichtsignal empfängt, oder der gleiche Typ, wie der primäre Photodetektor. Alternativ hierzu kann eine äquivalente Schaltung verwendet werden, um den Photodetektor zu repräsentieren, allerdings auf Kosten einer geringeren Immunität gegen Rauschen der Hochspannungsversorgung.

**[0026]** Eine Impedanz, die zu einer APD (Avalanche-Photodiode) äquivalent ist, kann durch einen Widerstand in Reihenschaltung mit einem Kondensator und einer Induktivität modelliert werden, die den Reihenwiderstand der APD sowie die Sperrschichtkapazität der APD bei der nominalen Betriebsspannung darstellen, wobei eine Induktivität die Verbindung der APD mit der Außenwelt darstellt. Andere mögliche parasitäre Elemente können ferner auch einbezogen werden.

**[0027]** Ein erstes Ausführungsbeispiel eines optischen Empfängers **400** ist in **Fig. 3** dargestellt. Das erste Ausführungsbeispiel weist eine APD-äquivalente Impedanz **420** auf, die einen Kondensator **422**, der zu der Sperrschichtkapazität der APD **450** äquivalent ist, einen Widerstand **423** mit zu der APD **450** äquivalenten Reihenwiderstand und eine Induktivität **424** aufweist, die zu der Induktivität der APD **450** äquivalent ist, die zwischen einen Transimpedanzverstär-

ker **470** und die Hochspannungsversorgung **410** geschaltet ist. Im Einzelnen ist die APD **450** zwischen der Hochspannungsversorgung **410** und einem ersten Eingang des Differenz-Transimpedanz-verstärkers **470** angeordnet, während die APD-äquivalente Impedanz **420** zwischen der Hochspannungsversorgung **410** und einem zweiten Eingang des Differenz-Transimpedanz-verstärkers **470** verbunden ist, der Ausgänge **460**, **465** aufweist.

**[0028]** Ein zweites Ausführungsbeispiel 500 ist in **Fig. 4** dargestellt. Für einen SiPM (Halbleiter-Photomultiplier) **550** kann ein Spannungssensorelement **520** aufgebaut werden unter Verwendung der gleichen Schaltung, wie sie von Corsi F. et al, „Modeling a silicon photomultiplier (SiPM) as a signal source for optimum front-end design“, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 572 (2007), 416-418, vorgeschlagen wurde, wobei ein SiPM äquivalenter Quench-Widerstand **521**, ein Quench-Kondensator **522**, eine Netzkapazität **523**, eine Sperrschichtkapazität **524** und eine Induktivität **525** verwendet werden, die die Verbindung des SiPM mit dem Transimpedanzverstärker **470** darstellen. Der SiPM **550** ist zwischen der Hochspannungsquelle **410** und dem ersten Eingang des Transimpedanzverstärkers **470** angeordnet, während die SiPM-äquivalente Impedanz **520** zwischen der Hochspannungsversorgung **410** und dem zweiten Eingang des Transimpedanzverstärkers **470** verbunden ist.

**[0029]** Bei einem dritten Ausführungsbeispiel eines optischen Empfängers **600**, das in **Fig. 5** dargestellt ist, kann das gesamte Ausgangsrauschen des Verstärkers **600** dadurch verringert werden, dass der zweite Ausgang **465** des Differenz-Transimpedanzverstärkers **470** mittels eines Filters **675** gefiltert wird, um auf das Frequenzspektrum der Schwankung der Hochspannungsversorgung **410** anzusprechen. Beispielsweise rührt Rauschen bei einer Hochspannungsversorgung oft von schaltenden DC-DC Wandlern her. Bei dem dritten Ausführungsbeispiel werden ein Photodetektor **650** und eine Photodetektor-äquivalente Impedanz **620** mit Eingängen des Differenz-Transimpedanz-verstärkers **470** verbunden. Die Photodetektorimpedanz **620** kann beispielsweise als Impedanzlast **420** aus dem ersten Ausführungsbeispiel, Impedanzlast **520** aus dem zweiten Ausführungsbeispiel oder als andere Impedanzlast implementiert werden, die im Wesentlichen an die Impedanz des Photodetektors **650** angepasst ist. Die Schaltung **600** hält Rauschen, das mit dem Single-Ended-Transimpedanzverstärker **470** in Verbindung steht, außerhalb des Bandpasses des Filters **675**, wodurch das Hochspannungsrauschen beseitigt wird.

**[0030]** Eine andere Verbesserung gegenüber der Photodetektorschaltung aus **Fig. 1** gemäß dem Stand der Technik, kann nützlich sein, wenn Avalanche-Photodioden zum Einsatz kommen. Bei Appli-

kationen, bei denen die Entfernung gemessen wird, können starke optische Pulse auf die Avalanche-Photodiode **150** auftreffen. Hierbei kann der Photostrom groß genug sein, um den Transimpedanzverstärker **140** und/oder den Photodetektor **150** zu beschädigen. Es ist wünschenswert, den Empfänger **100** vor hohen optischen Leistungen zu schützen, und zwar unter Verwendung eines Widerstandes in Reihe mit der APD **150**. Wenn der Photostrom durch den Photodetektor **150** ansteigt, verringert sich die Spannung über dem Photodetektor **150** aufgrund der Spannung, die sich über dem Widerstand aufbaut, was die Verstärkung (und den Photostrom) einer APD verringert.

**[0031]** Ein Widerstand in Reihe mit der Avalanche-Photodiode **150** kann die Bandbreite des Verstärkers **110** verringern, was seine Verwendung für Hochfrequenz-Applikationen einschränkt. Um die erforderliche Bandbreite aufrecht zu halten, kann ein großer Entkopplungskondensator (nicht dargestellt) zwischen der Hochspannungsversorgung **110** und Masse angeordnet werden. Diese Technik kann den Gleichstromanteil des Photostromes begrenzen, nicht aber ein schnell transientes Signal.

**[0032]** Die Differenz-Konfiguration, die im Vorhergehenden bei dem ersten, zweiten und dritten Ausführungsbeispiel beschrieben worden ist, kann verwendet werden, um dieses Problem zu lösen. **Fig. 6** zeigt ein viertes Ausführungsbeispiel. Ein Impedanzelement **730**, beispielsweise ein Widerstand oder ein anderes Impedanzelement, das sowohl passiv als auch aktiv sein kann, wird zwischen der Hochspannungsquelle **410** und einer Hochspannungsversorgung **715** angeordnet, ohne die Frequenzantwort des Empfängers **700** zu beeinflussen. Diese Schaltung **700** entspricht dem Stand der Technik, was die Frequenzantwort betrifft. Die Impedanz **730** kann verwendet werden, um die Verstärkung der APD **750** im Falle eines optischen Signales hoher Leistung zu verringern. Da kein großer Kondensator an der Hochspannungsversorgung **715** vorhanden ist, antwortet die Schaltung **700** auf ein schnell transientes Signal. Die einzigen Kapazitäten sind die Sperrschichtkapazität der APD **750** und die äquivalente Kapazität des Sensorelementes **620** zum Abfühlen von Schwankungen der Hochspannungsversorgung.

**[0033]** Die APD-Hochspannungsversorgung **715** kehrt zu einem Wert vor dem Puls zurück, wenn die optische Leistung wieder zu null wird. Wiederum bildet der Strom, der in dem Hochspannungs-Sensorelement **620** während des Wiederaufladens (oder des "Wiederauflade-Stromes") induziert wird, ein Gegengewicht zu dem Strom, der in der APD-äquivalenten Impedanz **620** aufgrund der Schwankung der Hochspannungsversorgung **410** induziert wird, was zu einem sauberen Signal am Ausgang des Differenz-Transimpedanz-Verstärkers **470** führt. Wenn dieser Punkt nicht berücksichtigt wird, kann der Wie-

deraufladestrom als Offset-Spannung am Ausgang des Transimpedanz-verstärkers 470 erscheinen, was schwierig zu handhaben sein kann im Falle eines einfachen Phasenanschnitts-Komparators zur Detektion der Anwesenheit eines Pulses oder aber den Transimpedanzverstärker 470 sättigen kann.

**[0034]** Ein in **Fig. 7** dargestelltes fünftes Ausführungsbeispiel bietet eine Möglichkeit, den durch eine Schwankung der Hochspannungsversorgung induzierten Strom durch eine Photodetektor-äquivalente Impedanz **823** zu eliminieren, und stellt einen optischen Empfänger **800** mit einem erweiterten Dynamikumfang zur Verfügung, indem ein Pseudo-Differenz-Empfänger verwendet wird. Dies ist besonders interessant bei optischen Empfängern, die eine Avalanche-Photodiode **850** verwenden, bei der die Hochspannungsversorgung **810** verwendet werden kann, um die Verstärkung der APD **850** zu steuern, wobei die Verstärkung den Störabstand (Signal-to-noise ratio - SNR) des Signales am Ausgang des optischen Empfängers **800** beeinflusst. Als solche erlaubt es die Schaltung dem Benutzer des APD-Empfängers **800**, die Hochspannungsversorgung **810** der APD aktiv einzustellen, während sich die Schaltung im Betrieb befindet, wobei die Auswirkungen auf die Detektionseigenschaften des Verstärkers verringert sind.

**[0035]** Eine Eliminierung der Schwankung der Hochspannungsversorgung wird erreicht, indem der durch den Photodetektor **850** aufgrund einer Schwankung der Vorspannung fließende Strom mit einem Spannungssensorelement **823** abgefühlt wird, das die Hochspannungsschwankung in einem Strom umwandelt, der eine annähernd gleiche Amplitude aufweist, wie der durch eine Schwankung der Hochspannungsversorgung **810** in dem Photodetektor **850** induzierte Strom, wobei ein Stromspiegel **890** verwendet wird, der mit dem Sensorelement **823** zum Abfühlen der Hochspannungsschwankung am Eingang des Transimpedanzverstärkers **880** verbunden ist. Der an dem Eingang des Transimpedanzverstärkers **880** gespiegelte Strom kann viel größer sein als der Dynamikbereich des Transimpedanzverstärkers **880**, was den Dynamikbereich des optischen Verstärkers **880** erweitert hinsichtlich Schwankungen der Vorspannung. Diese Schaltung bildet also einen Pseudo-Differenz-Transimpedanzverstärker hinsichtlich einer Schwankung der Vorspannung des Photodetektors.

**[0036]** Wie bei dem ersten Ausführungsbeispiel weist bei dem fünften Ausführungsbeispiel eine optische Empfängerschaltung **800** zum Umwandeln eines optischen Signales in ein elektrisches Signal einen Photodetektor **850** auf, dessen Kathode mit einer Hochspannungsversorgung **810** und dessen Anode mit dem Eingang eines Transimpedanz-verstärkers **880** verbunden ist. Eine Schwankung der Hochspannungsversorgung induziert einen Wechselstrom, der durch die Impedanz **823**, die zu der Avalanche-Pho-

todiode äquivalent ist, und auf den Photostrom aus dem Photodetektor **850** addiert wird. Der durch die Schwankung der Hochspannung induzierte Strom wird auf den Photostrom aufsummiert und kann Rauschen hinzufügen, einen Offset der Ausgangsspannung des Transimpedanzverstärkers erzeugen oder die Frequenzantwort des optischen Empfängers **880** beeinflussen, wenn die Spannungsschwankung mit dem Photostrom korreliert ist.

**[0037]** Das Spannungs-Sensorelement **823** ist mit der Hochspannungsversorgung **810** verbunden und wird verwendet, um die Schwankung der Hochspannungsversorgung in einen Strom umzuwandeln, dessen Amplitude annähernd gleich zu der Amplitude des Stromes ist, der in dem Photodetektor **850** induziert wird. Der Strom aus dem Hochspannungs-Sensorelement **823** wird auf den Eingang des Transimpedanzverstärkers **880** gespiegelt, um den Strom auszulöschen, der in der Avalanche-Photodiode **850** aufgrund einer Schwankung der Hochspannungsversorgung induziert wurde.

**[0038]** Der in dem Photodetektor **850** erzeugte Strom wird an den Transimpedanzverstärker **880** gesendet, wo das Photostrom-Signal beispielsweise für eine Weiterverarbeitung an dem Ausgang **860** in eine Spannung gewandelt wird. Das Spannungs-Sensorelement **823**, dessen Impedanz gleich der Impedanz des Photodetektors **850** ist, wird verwendet, um die Schwankung der Hochspannung **810** abzufühlen. Der durch die Spannungs-Sensorvorrichtung **823** fließende Strom wird unter Verwendung eines Stromspiegels **890** auf den Eingang des Transimpedanzverstärkers gespiegelt, wobei auf diese Weise jeder Strom beseitigt wird, der in dem Photodetektor **850** durch die Schwankung der Hochspannungsversorgung **810** induziert wird.

**[0039]** Der ohne weiteres erhältliche Transimpedanzverstärker **880** mit einem Ausgang kann eine große Bandbreite und niedriges Rauschen aufweisen. Der Stromspiegel **890** kann die Fähigkeit zur Handhabung hoher Ströme aufweisen und schnell auf eine Schwankung der Hochspannung ansprechen, und zwar aufgrund der begrenzten Verstärkung, die benötigt wird, um diese Funktion zu erreichen. Eine Rückkopplung vom Ausgang des Transimpedanzverstärkers **880** wird nicht benötigt, so dass auf diese Weise die Rückstellzeit im Falle einer großen Schwankung der Hochspannungsversorgung verringert ist. Dies macht den Empfänger **800** ferner weniger anfällig für Oszillation. Eingangsschutz und eine variable Transimpedanz können ferner durch die Schaltung **800** implementiert werden, um einen erweiterten Dynamikbereich des Photostromes zu erzielen.

**[0040]** **Fig. 8** zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Stromspiegels **890**, der aus zwei angepassten Tran-

sistoren **991** und zwei Konstantstromquellen **992** zur Vorspannung der zwei angepassten Transistoren **991** besteht. Während der in **Fig. 8** dargestellte Stromspiegel Bipolar-Transistoren **991** verwendet, können auch beliebig geeignete Alternativen zur Bipolar-Technologie, beispielsweise FET, MOSFET, HEMT oder auch ein anderer Typ einer Bipolar-Technologie verwendet werden.

**[0041]** Bemerkenswert ist bei dem Stromspiegel **890** seine Einfachheit. Allerdings ist der Designer gezwungen, hinsichtlich Bandbreite, Eingangsimpedanz, Rauschen und Strombereitstellungsfähigkeiten des Stromspiegels **890** Kompromisse einzugehen. Idealerweise sollte die Eingangsimpedanz des Stromspiegels **890** null sein, und das durch den Stromspiegel **890** erzeugte Rauschen sollte so niedrig wie möglich sein.

**[0042]** Das in **Fig. 9** dargestellte siebte Ausführungsbeispiel einer Konfiguration einer optischen Empfängerschaltung **1110** verwendet vorteilhafterweise einen Differenz-Transimpedanzverstärker **1180**, wobei ein erster Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers **1180** mit einem Photodetektor **1150** und ein zweiter Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers **1180** mit einem Sensorelement **1122** zum Abfühlen einer Schwankung einer Hochspannungsversorgung **1110** verbunden ist, wobei die Impedanz des Spannungs-Sensorelementes **1122** der Impedanz des Photodetektors **1150** gleicht.

**[0043]** Ein zweites Hochspannungs-Sensorelement **1123** ist mit zwei in Reihe geschalteten Stromspiegeln **1191** und **1192** verbunden, die verwendet werden, um eine stromgleiche Amplitude an beiden Eingängen des Differenz-Transimpedanzverstärkers **1180** zu injizieren.

**[0044]** Da das Eingangssignal der Stromspiegel **1191** und **1192** das gleiche ist, wird der an beiden Eingängen des Differenz-Transimpedanzverstärkers **1180** injizierte Strom als Gleichtaktsignal angesehen, das durch die Gleichtaktunterdrückung des Differenz-Transimpedanzverstärkers **1180** unterdrückt wird.

**[0045]** Die zwei Stromspiegel **1191** und **1192** können einfach durch einen Stromspiegel mit einem Eingang und zwei Ausgängen gebildet werden. Dies ist besonders dann vorteilhaft, wenn Rauschen, das durch den Stromspiegel erzeugt wird, gleichzeitig an beiden Eingängen des differenziellen Transimpedanzverstärkers **1180** injiziert wird, so dass es durch die Gleichtaktunterdrückung des Differenz-Transimpedanzverstärkers beseitigt wird.

**[0046]** Der Differenz-Transimpedanzverstärker **1180** mit dem Photodetektor **1150** und dem ersten Sensorelement **1122** für die Hochspannung kann auf eine geringe Schwankung der Hochspannungsver-

sorgung ansprechen, während das zweite Hochspannungs-Sensorelement mit den Stromspiegeln **1191** und **1192** eine große Schwankung der Hochspannungsversorgung handhaben kann.

**[0047]** Die Hochspannungs-Sensorelemente **1122** und **1123** weisen vorzugsweise die gleiche Impedanz wie der Photodetektor **1150** auf, um einen Strom zu liefern, der soweit wie möglich gleich dem Strom ist, der in dem Photodetektor **1150** induziert wird. Idealerweise können die Hochspannungs-Sensorelemente **1122** und **1123** Dummy-Photodetektoren sein, die also kein Lichtsignal empfangen, und zwar von der gleichen Bauart wie der lichtdetektierende Photodetektor **1150**. Alternativ hierzu können die Hochspannungs-Sensorelemente **1122**, **1123** durch äquivalente Impedanzen ersetzt werden, wie beim ersten und zweiten Ausführungsbeispiel diskutiert.

**[0048]** Es sollte beachtet werden, dass der in **Fig. 7** dargestellte Stromspiegel **890** und die Stromspiegel **1191**, **1192** (**Fig. 10**) auf verschiedene Weise ausgeführt werden können, wie dies dem Fachmann bekannt ist. Es ist deutlich, dass diese Ausführungsbeispiele von Stromspiegeln die Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung nicht einschränken und das ohne weiteres andere Stromspiegelkonfigurationen verwendet werden können, die dem Fachmann allgemein bekannt sind.

**[0049]** Zusammenfassend ist dem Fachmann klar, dass verschiedene Modifikationen und Schwankungen hinsichtlich der Struktur der vorliegenden Erfindung vorgenommen werden können, ohne dem Umfang und Geist der Erfindung zu verlassen. In Anbetracht des Vorstehenden ist es beabsichtigt, dass die vorliegende Erfindung Modifikationen und Schwankungen der Erfindung umfasst, sofern sie in den Schutzbereich der folgenden Ansprüche und ihrer Äquivalente fallen.

## Patentansprüche

1. Photoelektrische Empfängerschaltung (400) zum Umwandeln eines optischen Signales in ein elektrisches Signal für Hochfrequenzanwendungen, mit einem Differenz-Transimpedanzverstärker (470), der einen ersten Eingang und einen zweiten Eingang aufweist, mit einem als Avalanche-Photodiode oder Halbleiter-Photomultiplier ausgebildeten Photodetektor (450, 550, 650, 750), der mit einem ersten Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers (470) verbunden ist, mit einer Hochspannungsversorgungsquelle (410), die konfiguriert ist, um über eine Hochspannungsversorgung eine Vorspannung an den Photodetektor (450, 550, 650, 750) anzulegen,

mit einem Impedanzelement (730), das zwischen der Hochspannungsquelle (410) und der Hochspannungsversorgung verbunden ist, und mit einem Spannungs-Sensorelement (420, 520, 620), das eine im Wesentlichen gleiche Impedanz wie der Photodetektor (450, 550, 650, 750) darstellt und dessen einer Anschluss mit der Hochspannungsversorgung und dessen anderer Anschluss mit dem zweiten Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers (470) verbunden ist, wobei das Impedanzelement (730) konfiguriert ist, die Spannung im Fall eines optischen Signals großer Leistung, das auf den Photodetektor (450, 550, 650, 750) auftrifft, herabzusetzen.

2. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 1, wobei das Spannungs-Sensorelement (420) einen Kondensator (422), einen Widerstand (423) und eine Induktivität (424) aufweist.

3. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 2, wobei der Kondensator (422), der Widerstand (423) und die Induktivität (424) in Reihe geschaltet sind.

4. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 1, wobei das Spannungs-Sensorelement (420) einen äquivalenten Photodetektor-Quench-Widerstand, einen Quench-Kondensator, eine Netzkapazität und eine Sperrschichtkapazität aufweist.

5. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 4, wobei der äquivalente Photodetektor-Quench-Widerstand (521) zu dem Quench-Kondensator (522) parallel geschaltet ist und wobei die Sperrschichtkapazität (524) in Reihe mit der Parallelschaltung aus dem Photodetektor-Quench-Widerstand (521) und dem Quench-Kondensator (522) geschaltet ist.

6. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 4, wobei die Sperrschichtkapazität parallel zu einer ersten Unterkomponente geschaltet ist, die den äquivalenten Photodioden-Quench-Widerstand, den Quench-Kondensator und die Netzkapazität aufweist.

7. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 4, die ferner eine Induktivität (525) aufweist, die in Reihe mit einer zweiten Subkomponente geschaltet ist, die den äquivalenten Photodioden-Quench-Widerstand, den Quench-Kondensator, die Netzkapazität und die Sperrschichtkapazität aufweist.

8. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 1, die ferner ein Bandpassfilter (675) aufweist, das mit wenigstens einem Ausgang des Differenz-Transimpedanz-Verstärkers (470) verbunden ist.

9. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 1, wobei das Spannungs-Sensorelement einen Dummy-Photodetektor aufweist, der im Wesentlichen ähnlich zu dem Photodetektor ist.

10. Photoelektrische Empfängerschaltung zum Umwandeln eines optischen Signales in ein elektrisches Signal für Hochfrequenzanwendungen, mit einem Transimpedanzverstärker (880) mit einem Eingang, mit einem Photodetektor (850), der mit dem Eingang des Transimpedanzverstärkers (880) mit einem Eingang verbunden ist, mit einer Hochspannungsversorgungsquelle (810), die konfiguriert ist, um eine Vorspannung an den Photodetektor (850) anzulegen, und mit einem Spannungs-Sensorelement (823), das eine im Wesentlichen gleiche Impedanz wie der Photodetektor darstellt, das zwischen die Hochspannungsversorgung (810) und einen Eingang eines Stromspiegels (890) geschaltet ist, wobei ein Ausgang des Stromspiegels (890) mit dem Photodetektor (850) und dem Eingang des Transimpedanzverstärkers (880) mit einem Eingang verbunden ist.

11. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 10, die ferner ein Impedanzelement (730) aufweist, das zwischen die Hochspannungsversorgungs-Quelle und den Photodetektor (750) geschaltet ist, wobei das Impedanzelement (730) konfiguriert ist, die Verstärkung des Photodetektors (750) im Fall eines optischen Signals großer Leistung, das auf den Photodetektor (450) auftrifft, herabzusetzen.

12. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 10, wobei das Spannungs-Sensorelement (823) einen Dummy-Photodetektor aufweist, der im Wesentlichen zu dem Photodetektor (850) ähnlich ist.

13. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 10, wobei das Spannungssensorelement (823) einen Kondensator, einen Widerstand und eine Induktivität aufweist.

14. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 13, wobei der Kondensator, der Widerstand und die Induktivität in Reihe geschaltet sind.

15. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 10, wobei das Spannungs-Sensorelement (823) einen äquivalenten Photodetektor-Quench-Widerstand, einen Quench-Kondensator, eine Netzkapazität und eine Sperrschichtkapazität aufweist.

16. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 15, wobei der äquivalente Photodetektor-Quench-Widerstand parallel zu dem Quench-Kondensator geschaltet ist und wobei die Sperrschichtkapazität in Reihe zu der Parallelschaltung aus



dem Photodetektor-Quench-Widerstand und dem Quench-Kondensator geschaltet ist.

17. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 15, wobei die Sperrschichtkapazität parallel zu einer ersten Subkomponente geschaltet ist, die den äquivalenten Photodetektor-Quench-Widerstand, den Quench-Kondensator und die Netzkapazität aufweist.

18. Photoelektrische Empfängerschaltung nach Anspruch 15, die ferner eine Induktivität aufweist, die in Reihe mit einer zweiten Subkomponente geschaltet ist, die den äquivalenten Photodetektor-Quench-Widerstand, die Quench-Kapazität, die Netzkapazität und die Sperrschichtkapazität aufweist.

19. Photoelektrische Empfängerschaltung zum Umwandeln eines optischen Signales in ein elektrisches Signal, mit einem Differenz-Transimpedanzverstärker (1180), mit einem Photodetektor (1150), der mit einem ersten Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers (1180) verbunden ist, mit einer Hochspannungsversorgungsquelle (1110), die konfiguriert ist, um eine Torspannung an den Photodetektor (1150) anzulegen, mit einem ersten Spannungs-Sensorelement, das eine im Wesentlichen gleiche Impedanz wie der Photodetektor darstellt, das zwischen die Hochspannungsversorgung und einen zweiten Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers geschaltet ist, mit einem zweiten Spannungssensorelement (1122), das eine im Wesentlichen gleiche Impedanz wie der Photodetektor darstellt, das zwischen die Hochspannungsversorgung (1110) und einen Eingang eines ersten Stromspiegels (1191) geschaltet ist, und mit einem zweiten Stromspiegel (1192), der zwischen den ersten Stromspiegel (1191) und den zweiten Eingang des Differenz-Verstärkers geschaltet ist, wobei der Ausgang des ersten Stromspiegels (1191) mit dem ersten Eingang des Differenz-Transimpedanzverstärkers (1180) verbunden ist.

20. Photoelektrische Verstärkerschaltung nach Anspruch 19, die ferner einen einzelnen Stromspiegel aufweist, der den ersten Stromspiegel (1191) und den zweiten Stromspiegel (1192) aufweist, wobei der einzelne Stromspiegel einen Sensoreingang und zwei Ausgänge aufweist.

21. Photoelektrische Verstärkerschaltung nach Anspruch 19, wobei das erste Spannungs-Sensorelement (1122) und/oder das zweite Spannungs-Sensorelement (1123) einen Dummy-Photodetektor aufweist, der zu dem Photodetektor (1150) im Wesentlichen ähnlich ist.

22. Photoelektrische Verstärkerschaltung nach Anspruch 19, wobei das Spannungs-Sensorelement einen Kondensator, einen Widerstand und eine Induktivität aufweist.

23. Photoelektrische Verstärkerschaltung nach Anspruch 19, wobei der Kondensator, der Widerstand und die Induktivität in Reihe geschaltet sind.

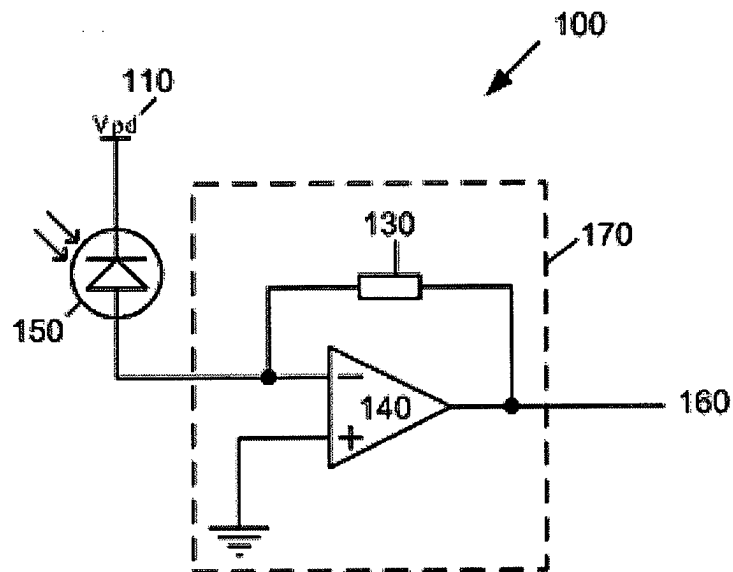
24. Photoelektrische Verstärkerschaltung nach Anspruch 19, wobei das Spannungs-Sensorelement einen äquivalenten Photodetektor-Quench-Widerstand, einen Quench-Kondensator, eine Netzkapazität und eine Sperrschichtkapazität aufweist.

25. Photoelektrische Verstärkerschaltung nach Anspruch 19, die ferner ein Bandpassfilter aufweist, das mit wenigstens einem Eingang des Stromspiegels verbunden ist.

26. Photoelektrische Verstärkerschaltung nach Anspruch 19, die ferner ein Impedanzelement aufweist, das zwischen die Hochspannungsversorgungs-Quelle und den Photodetektor geschaltet ist.

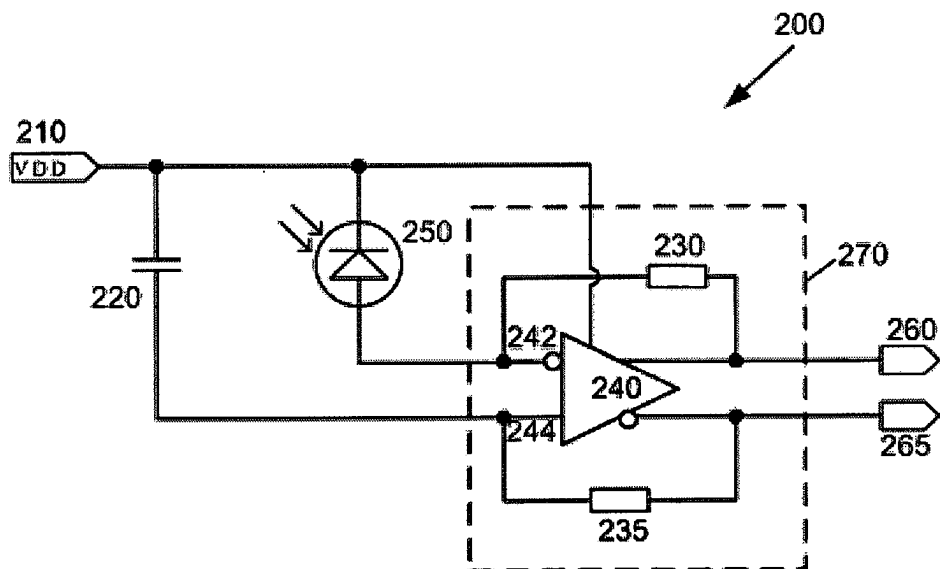
Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



**FIG. 1**

(Stand der Technik)



**FIG. 2**

(Stand der Technik)

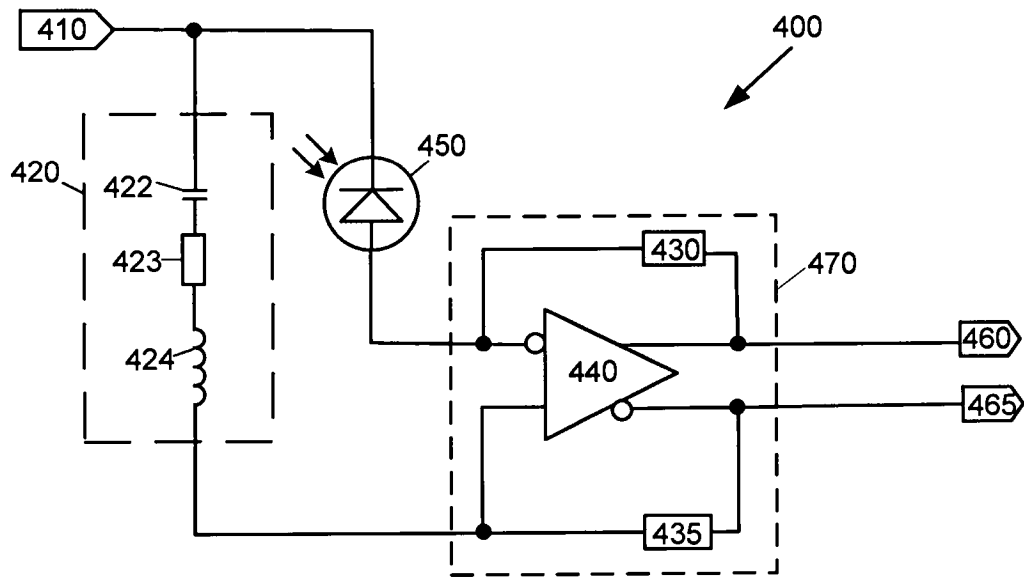


FIG. 3

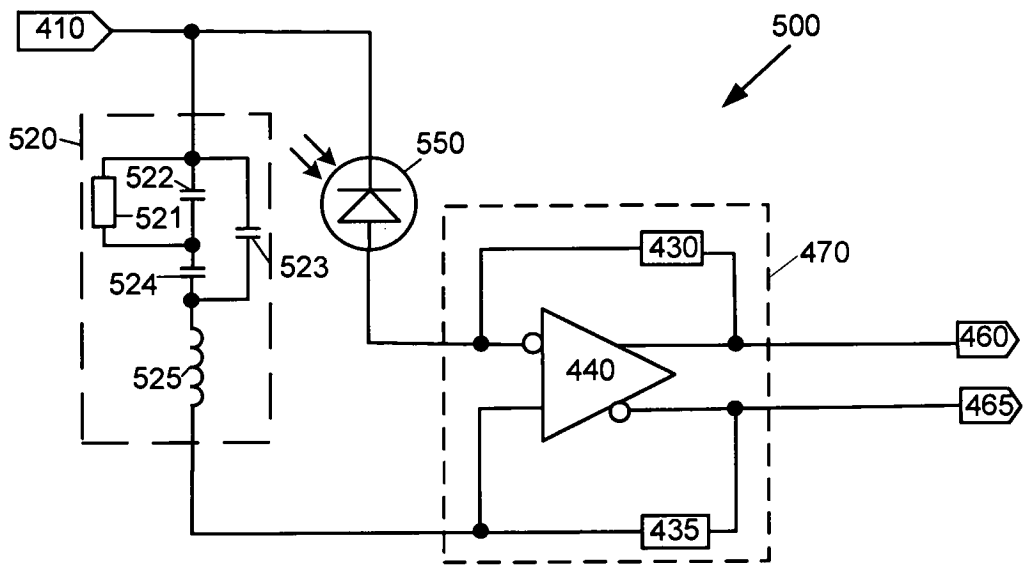


FIG. 4

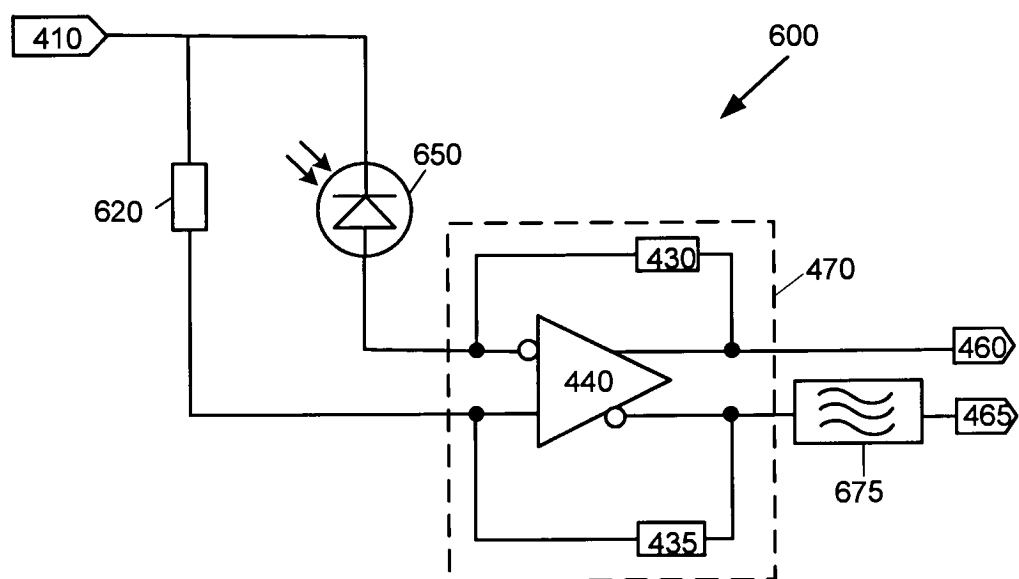


FIG. 5

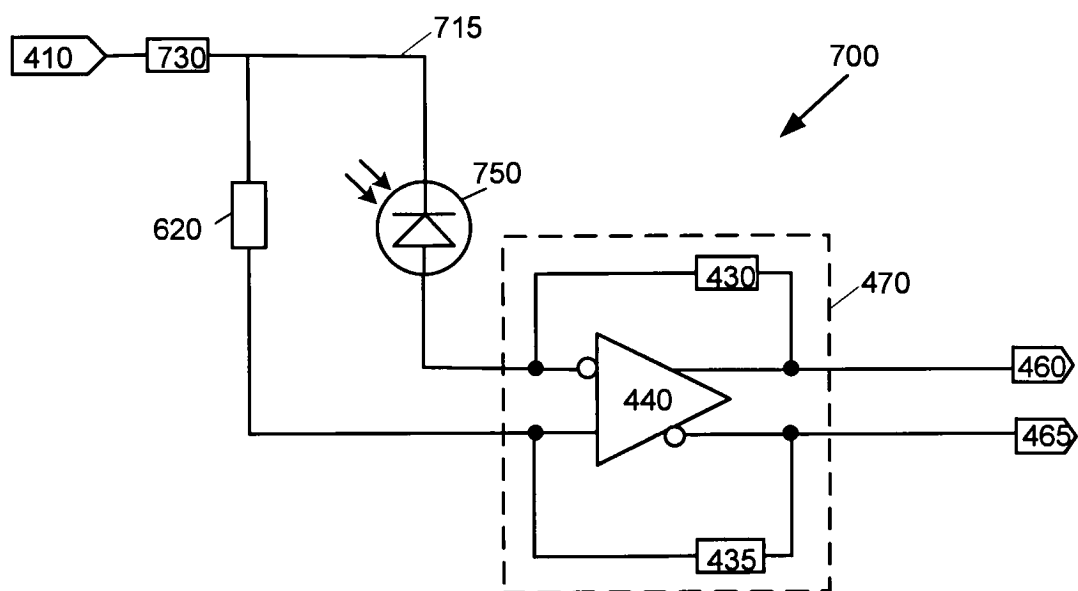
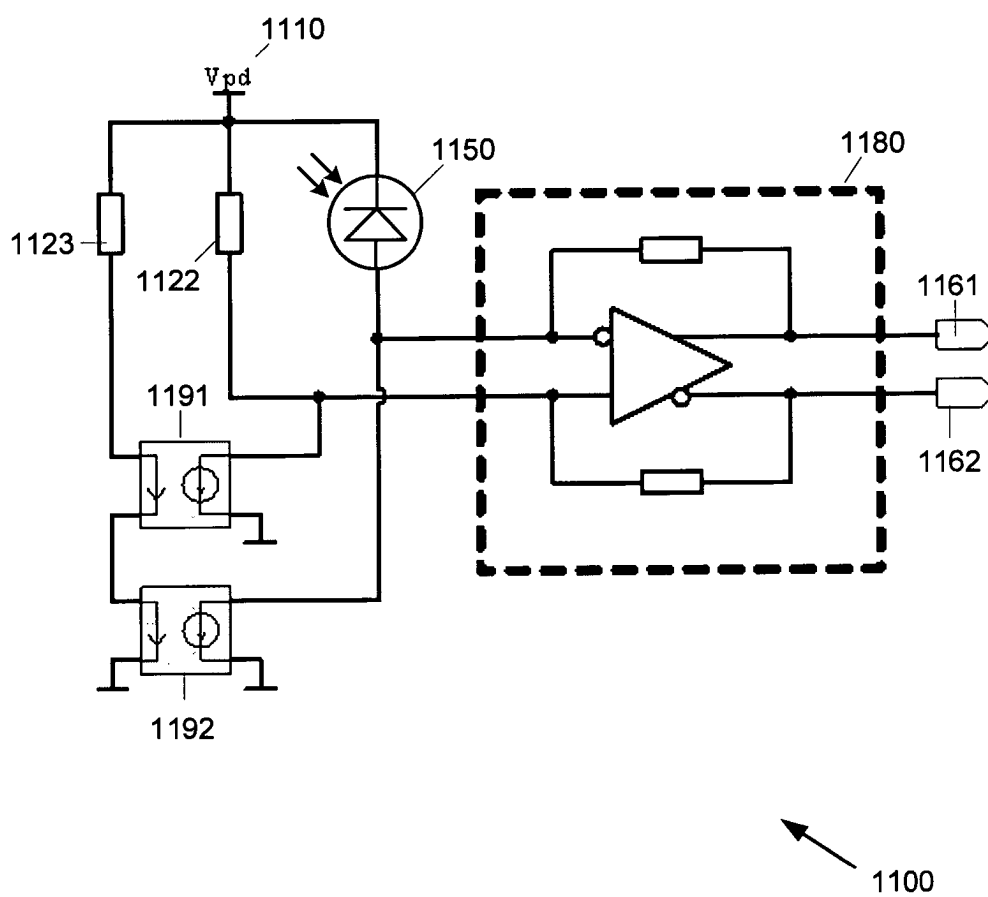


FIG. 6





**FIG. 9**