

Die PIN-Photodiode ist der Photodetektor erster Wahl

Es werde Strom!

In vielen Sensorikanwendungen ist infrarote (IR), ultraviolette (UV) oder sichtbare Strahlung (Licht) zu detektieren. Hierzu steht eine große Auswahl an opto-elektrischen Wandlern (Photodetektoren) zur Verfügung, die den photoelektrischen Effekt sensorisch nutzen.

Dr. Mike Hodges, Produktingenieur für Laserdioden und Photodioden beim APD-Hersteller und Optoelektronik-Distributor Laser Components: »Weil PIN-Photodioden sehr kompakt, vielfältig und kostengünstig in hohen Stückzahlen zu produzieren sind, sind sie zum Photodetektor erster Wahl geworden. Einsatz finden sie in einem breiten Feld – von der Sensorik über die Medizintechnik bis hin zu Telekommunikationsanwendungen. Wenn ihre Empfindlichkeit für eine bestimmte Anwendung nicht ausreicht, bieten Avalanche Photodioden (APDs) mit ihren vielen Vorteilen die optimale Lösung. Vor allem in der Entfernungsmesstechnik und bei Fluoreszenzmessungen haben sie sich durchgesetzt.«

Photodioden sind in verschiedensten Bauformen und Größen verfügbar. Neben einfachen Photodioden, d.h. Detektoren mit einer empfindlichen Fläche, dienen Differential- sowie Quadrantendioden der Positionsbestimmung.

Je nach Ausführung weisen Photodioden beachtliche Unterschiede auf. Die wichtigsten Parameter sind die Anstiegszeit, die Quantenausbeute, die Größe und Empfindlichkeit der aktiven Fläche, die Linearität des Signals, der Dunkelstrom sowie die Empfindlichkeit gegenüber anderen Störquellen, welche sich auf die Performance des Bauteils auswirken. Die Empfindlichkeit der Photodiode ist umso wichtiger, je weniger Licht zur Verfügung steht und wird typischerweise mit dem Begriff NEP (Noise Equivalent Power) beschrieben. Hierbei handelt es sich um die optische Leistung, die benötigt wird, um das Eigenrauschen des Detektors zu überwinden, d.h. um ein Signal-Rauschverhältnis von 1 am Detektorausgang zu erzeugen.

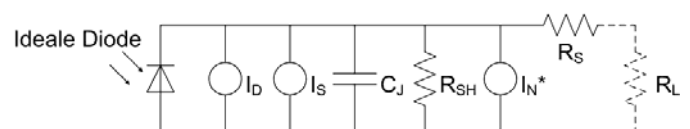


Photodioden sind in verschiedensten Bauformen und Größen verfügbar.

Man könnte meinen, bei der großen Auswahl an Bauteilen, würde jeder Anwender leicht fündig werden. Hodges schränkt aber ein: »Die unterschiedlichen Bauteileparameter sind nicht unabhängig von einander. Die Abstimmung des optimalen Bauelements-Designs ist daher eine große Herausforderung.« Er nennt ein Beispiel: Detektiert werden soll eine unfokussierte Lichtquelle in einer Hochgeschwindigkeitsanwendung. Für die erste Anforderung bietet sich in erster Näherung ein Detektor mit großer aktiver Fläche an. Jedoch steigt auch die elektrische Kapazität mit der Bauteilfläche, was für Hochgeschwindigkeitsanwendungen ungünstig ist. Hodges sieht darin aber keinesfalls einen Grund zum Verzagen: »Zum Glück lässt die Technologie die Schaffung anwendungs- und kundenspezifischer Bauteile zu, die auf ein optimales Verhältnis der Größe und der sonstigen Anforderungen ausgelegt sind.«

Die meisten Leistungsparameter hängen in hohem Maße von dem Design der nachgeschalteten Elektronik ab. Die elektrischen Eigenschaften können sehr komplex sein. In der Darstellung werden sie daher häufig mit einem Ersatzschaltbild veranschaulicht.

Der schwache Photostrom bedarf fast immer einer Signalverarbeitung, die meistens mit Transimpedanzverstärkern (Transimpedance Amplifier, TIA) stattfindet. Je höher die Eingangsimpedanz ist, desto größer wird prinzipiell das Spannungssignal am Verstärkerausgang. Die Kehrseite der hohen Eingangsimpedanz ist, dass diese eine große Zeitkonstante bedingt, was die Anstiegszeit des Systems verlängert. Der Einsatz des TIA umgeht dieses Problem, indem ein Operationsverstärker verwendet wird, der eine optimierte Eingangsimpedanz ermöglicht in Zusammenhang mit einer Schaltzeit, die einige Größenordnungen kleiner ist als es mit einem herkömmlichen Verstärker bei der gleichen Impedanz möglich wäre. Darüber hinaus liefert ein optimierter TIA ein lineares Signal über einen sehr breiten Dynamikbereich und ergänzt somit das äußerst lineare Verhalten der Photodiode.



I_D	Dunkelstrom	I_N^*	Rauschstrom
I_S	Photostrom	R_S	Vorwiderstand
C_J	Kapazität	R_L	Lastwiderstand
R_{SH}	Shuntwiderstand		



HÖHERE FUNKTIONALITÄT UND SPEZIALISIERUNG

Die meisten Photodioden sind für OEM-Anwendungen bestimmt. Kontinuierliche Fortschritte in der Aufbau- und Verbindungstechnik kommen den wachsenden Anforderungen OEMs an Ausgereiftheit und Funktionalität entgegen. Dies vereinfacht die Integration der Photodiode in das Endgerät und spart Zeit und Geld. Typische Beispiele integrierter Produkte sind Hybrid-Photodioden mit »on-Chip-TIAs« und Detektoren mit integrierter thermoelektrischer Kühlung.

Diese Baugruppen haben häufig ebenfalls eingegliederte optische Elemente, um das Licht aufzubereiten, bevor es den aktiven Bereich einer Photodiode erreicht. Typische Beispiele sind Photodioden mit einem optischen Faseranschluss, welche mehrere Vorteile bieten. So muss die Photodiode sich nicht unmittelbar in der Nähe der Lichtquelle bzw. Probe befinden, was bei Messungen in einer sehr heißen oder rauen Umgebung technisch vorteilhaft und oft auch kostengünstiger ist. Die Datenübertragung in der Telekommunikation ist nach wie vor die Hauptanwendung für fasergekoppelte Photodioden.

Anwendungsspezifische Bauteile beinhalten mitunter auch Linsen bzw. Linsen-Arrays, um Licht auf die Photodiode zu fokussieren oder Filter, um bestimmte Wellenlängen durchzulassen bzw. zu unterdrücken. Neben herkömmlichen Filtern, die auf oder ggf. in das Gehäuse der Photodiode eingeklebt werden, ist es heutzutage auch gängig, dielektrische Multilayer-Beschichtungen direkt auf die Photodiode aufzudampfen. Zusätzliche optische Filter sind dann entbehrlich, was Platz und Kosten einspart. Solche Komponenten sind ideale Produkte für Laser Applikationen wie Barcode-Scanner sowie kompakte Entfernungsmessgeräte, bei denen ein Filter das Umgebungslicht blockiert, während die Laserwellenlänge passiert.

Da Photodioden nur selten ohne eine passende Lichtquelle eingesetzt werden können, bieten viele Lieferanten den Service der Systemintegration an. Die Möglichkeiten sind beinahe unbegrenzt. Ein bekanntes und einfaches Beispiel ist der Optokoppler, bei dem typischerweise eine Leuchtdiode als Lichtquelle eingesetzt wird. Hier können sowohl die LED als auch die Photodiode im selben Gehäuse montiert werden, um dem Anwender unnötige Entwicklungsarbeit zu ersparen.

UNZÄHLIGE ANWENDUNGSBEISPIELE

In der industriellen Sensortechnik finden Photodioden unter anderem in Abstandssensoren Einsatz, z.B. bei Lasertastern oder in Triangulationssensoren. Je nach Messmethode werden Einzeldioden, Differenzialdioden oder auch Arrays verwendet; in vielen Fällen mit eingebautem Bandpassfilter aus bereits angesprochenen Gründen. Da solche Sensoren oft sehr klein und kompakt gebaut werden müssen, sind die Photodioden teilweise strengen Anforderungen bezüglich Baugröße unterworfen. Sie werden daher häufig im SMD-Gehäuse oder auch auf offenen Keramikträgern angeboten. Die in der industriellen Sensortechnik verwendeten Sensoren arbeiten vorwiegend im sichtbaren oder im NIR-Bereich, weshalb Si-Photodioden bevorzugt werden. Zu den Hauptanwendungen der Si-PIN-Photodioden-Arrays gehören industrielle Längenmessgeräte und Drehgeber.

Ein viel versprechender Markt für die Entfernungsmesstechnik stellt die Automobilindustrie dar. Weltweit werden derzeit intensiv Lösungen für das so genannte Automatic Cruise Control (ACC) entwickelt. In der einfachsten Form dieser Anwendung geht es darum, den Abstand zum vorausfahrenden Auto ständig zu kontrollieren und den Fahrer zu warnen, wenn er zu dicht auffährt. Weiterentwicklungen beabsichtigen, bei Gefahren in das Fahrgeschehen einzugreifen wenn der Fahrer auf Gefahrenhinweise nicht reagiert. Das Messprinzip kann auch erweitert werden, indem die ACC-Information um eine Hinderniserkennung am Straßenrand ergänzt wird.

Die ersten ACC-Geräte wurden vorwiegend auf Radar-Basis entwickelt und für Fahrzeuge der Luxusklasse als teures Zubehör angeboten. Es lässt sich derzeit aber ein deutlicher Wechsel in Richtung Lasertechnik feststellen. Ziel dabei ist es, deutlich günstigere Sensoren herzustellen, die zukünftig auch in PKWs der Mittelklasse eingebaut werden können. Erste Laser-ACC-Systeme sind bereits Marktreif.

Röntgendetektoren kommen zur Kontrolle von Fracht und Gepäckstücken zum Einsatz. Die kurzwelligen Röntgenstrahlen durchdringen aber die Photodiode, ohne absorbiert zu werden. Daher bringen die Detektorhersteller Szintillatoren auf die Photodiodenoberfläche auf. Das sind Kristalle aus Materialien wie z.B. Tl-dotiertes CsI. Diese wandeln die einfallenden Röntgenstrahlen in sichtbares Licht (typ. 565 nm) um, das ein Si-PIN-Zeilendetektor erfasst. Auch hier werden vielfältige kundenspezifische Aufbauten angeboten - auch Röntgendetektoren für Anwendungen in der Medizintechnik.

Darüber hinaus gibt es zahlreiche Anwendungen für Si-Photodioden in der analytischen Messtechnik. Nicht zuletzt werden InGaAs-Photodioden weltweit in großen Stückzahlen als Empfänger in optischen Netzwerken verwendet.



APD ERKENNT AUCH KLEINE LICHTER

Für das Detektieren geringer Lichtpegel können PIN-Photodioden ungeeignet sein. Als Alternative bieten sich Avalanche-Photodioden (APD) an. Am häufigsten bedient sich die Entfernungsmesstechnik dieser empfindlichen Detektoren: Einfache Entfernungsmessgeräte, mit denen sich Räume vermessen oder Entfernungen bis ca. 200 m berechnen lassen, findet man heutzutage in fast jedem Baumarkt. Diese Geräte verwenden kostengünstige, meist sichtbar emittierende Laserdioden, die einen mit definierter Frequenz modulierten Laserstrahl auf das Messobjekt richten.

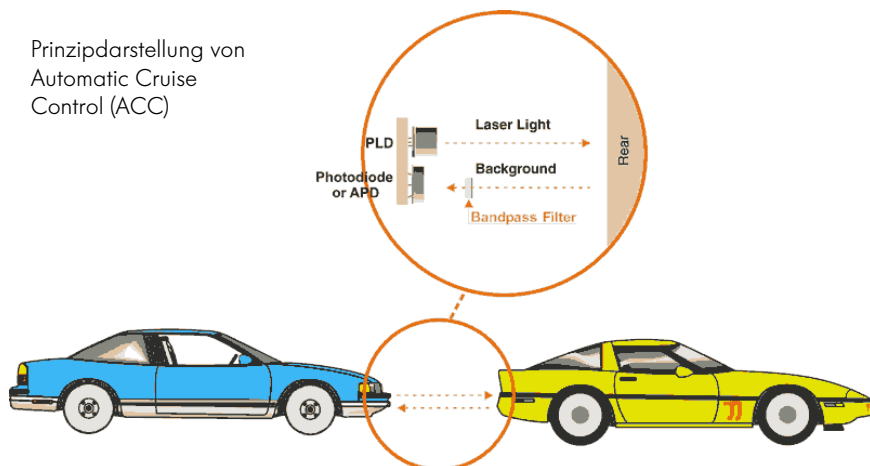
PIN-Photodioden eignen sich zwar für den Einsatz bei kürzeren Stecken, die meisten Geräte dieser Art setzen jedoch Si-APDs als Empfänger ein. Die eingebaute Verstärkung der APD sorgt dafür, dass die Diode eine wesentlich geringere Lichtleistung nachweisen kann als eine einfache PIN-Diode. Eine kostengünstige APD misst bei gleicher Laserleistung etwa eine vierfach größere Entfernung gegenüber der PIN; eine High-End-APD ermöglicht die zehnfache Distanz.

Das APDs teuer sind, ist schon fast eine überkommene Vorstellung: „Dank der kontinuierlichen Weiterentwicklung der APD-Technologie und der steigenden Nachfrage, können APDs kostengünstig hergestellt werden und sind somit nur unwesentlich teurer als PIN-Photodioden“ berichtet Hodges. Immer mehr Anwender setzen deshalb APDs ein, was zu weiteren Kosten- und Preissenkungen geführt hat. Für Laser Components hat es sich deshalb bezahlt gemacht, dass es vor einigen Jahren eine APD-Fertigungsstätte in Phoenix/Arizona übernahm und konsequent ausbaute: „Wir haben die steigende Nachfrage am eigenen Leib erfahren und unsere Produktionsstätten ausgeweitet, in denen wir mittlerweile mehr als 25.000 APDs pro Monat fertigen“ sagt Hodges.

Eine weitere Möglichkeit, Entfernungen zu messen, stellt die Pulslaufzeit- oder so genannte TOF-Messung (TOF = Time-of-Flight) dar. Hier werden kurze Hochleistungslaserpulse durch eine Optik gebündelt und in Richtung des Messobjektes gesandt. Eine APD sorgt dafür, dass das reflektierte Licht möglichst »sinnvoll« weiterverwendet wird. Mittels Pulslaufzeitmessung wird anhand der Lichtgeschwindigkeit die Information des reflektierten Lichts in eine Entfernungsinformation umgewandelt. Häufig reicht eine Reichweite von einigen hundert Metern bei den Messgeräten aus. Kommerzielle Entfernungsmessgeräte, mit denen bspw. Golfspieler Ihr Handicap verbessern können, wurden hierfür entwickelt. Ferngläser mit eingebautem Rangefinder für Jäger sind ebenfalls gefragte Produkte und werden mit Messbereichen bis zur 2 km angeboten. Wird die Laserleistung entsprechend erhöht, ist es möglich, über mehrere Kilometer zu messen wie z.B. in den Wolkenhöhenmessgeräten, die heutzutage an keinem modernen Flughafen fehlen dürfen.

APDs finden außerdem Einsatz in einer Vielfalt von Anwendungen in der Medizintechnik, der analytischen Messtechnik, sowie in der Spektroskopie. Ein interessantes Einsatzgebiet sind auch Laserscanner, die zum Beispiel Gefahrenbereiche in automatisierten Fertigungsanlagen überwachen. Hier tastet ein Laserstrahl mithilfe eines Polygonspiegels einen Bereich in einem Radius von einigen Metern kontinuierlich zweidimensional ab. Dringen Personen oder Gegenstände in den Gefahrenbereich ein, wird ein Warnsignal ausgelöst und die Fertigung ggf. angehalten.

In den bisher genannten Beispielen werden in der Regel Silizium-APDs eingesetzt, deren Spitzenempfindlichkeit bei ca. 900 nm liegt, was optimal für das Detektieren von Laserimpulsen ist, wie sie gängige Puls Laserdioden im Wellenlängenbereich um 905 nm emittieren. Hohe Leistungen sind aber nicht augensicher. Deshalb werden auch Rangefinder bei 1550 nm gebaut, die InGaAs-APDs als Empfänger verwenden. Weil diese Detektoren und auch die 1550-nm-Laser deutlich teurer sind, wird diese Technologie derzeit vorwiegend in High-End bzw. bei militärischen Rangefindern verwendet. (wo)



Funktionsprinzip der Photodiode

Photodioden basieren auf dem photoelektrischen Effekt und sind Halbleiterbauelemente. Als Halbleitermaterial kommt am häufigsten Silizium (Si) zum Einsatz. Es ist preiswert, weist einen weitgehend linearen Dynamikbereich von mehreren Dekaden bei geringem Dunkelstrom auf und deckt den Spektralbereich von 250 nm (UV) bis 1100 nm (nahes IR) ab. Für den IR-Spektralbereich ab 800 nm kommen zusammengesetzte Werkstoffe wie Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs, für 900 nm – 1700 nm), oder Gallium-Arsenid (GaAs für 800 nm – 2000 nm) in Betracht. Weitere mögliche Legierungen sind InSb, InAs und PbSe.

Photodioden weisen mindestens eine p- und n-dotierte Schicht auf. Befindet sich zwischen der p- und n-dotierten Schicht noch eine undotierte (intrinsische) Schicht, spricht man von einer PIN-Diode. Einfallendes Licht tritt durch die p-Schicht in die Photodiode ein. Die Lichtintensität nimmt als Folge der Absorption exponentiell mit der Eindringtiefe ab. Alle Photonen, die in der pn-Grenzschicht (Raumladungszone) absorbiert werden, produzieren Ladungsträger, welche sich sofort voneinander trennen und durch das interne elektrische Feld über die Sperrschicht befördert werden. Diese tragen zum Photostrom bei.

In vielen Anwendungen ist es wünschenswert, die Dicke dieser Raumladungszone zu maximieren. Beispielsweise ist die Anstiegszeit der Photodiode kürzer, wenn die meisten Ladungsträger in der Raumladungszone gebildet werden. Dies erhöht auch die Quanteneffizienz (QE), d.h. das Verhältnis zwischen Elektronenstrom und Lichtstrom, des Bauteils, weil die meisten Ladungsträger keine Chance zur Rekombination haben. (wo)

Die Avalanche-Photodiode (APD)

Ein limitierendes Element von PIN-Photodioden ist die fehlende interne Verstärkung – ein auftreffendes Photon produziert (bestenfalls) lediglich ein Elektron-Loch-Paar. Bei sehr schlechten Lichtverhältnissen ist also eine interne Verstärkung notwendig, um das Signal über das Eigenrauschen zu heben. Früher gab es hierzu nur den auf Vakuumröhren-Technologie basierenden Photomultiplier (PMT).

Der PMT ermöglicht zwar eine hohe Verstärkung, hat jedoch eine Anzahl von praktischen Limitierungen: Er wird warm, ist relativ sperrig, bietet – verglichen mit einer Photodiode – lediglich eine eingeschränkte Linearität, einen schmalen Spektralantwort-Bereich und eine geringe QE (typisch < 25%), besonders im IR-Bereich. Nicht zuletzt ist die hohe Betriebsspannung eines PMT (typ. mehrere kV) für viele Anwendungen nicht hinnehmbar.

APDs bieten nun eine vorteilhafte Festkörper-Alternative für die meisten PMT-Applikationen. Auftreffende Photonen produzieren in einer APD Elektron-Loch-Paare, wie bei jeder anderen Photodiode. Dabei unterscheiden sich APDs von einfachen PIN-Photodioden darin, dass beim Einfall von Photonen eine interne Ladungslawine ausgelöst wird. Hierfür muss an der APD eine Sperrspannung angelegt werden, um die Raumladungszone aufzuweiten. In der APD werden die vom Licht freigesetzten Ladungsträger im elektrischen Feld derart beschleunigt, dass sie durch Stoßionisation weitere Elektron-Loch Paare erzeugen, was zu einer Lawine (engl.: Avalanche) führt, daher der Name der Diode, die auch als Lawinen-Photodiode bekannt ist. Ist die Sperrspannung kleiner als die Durchbruchspannung, so stirbt die Lawine aufgrund von Reibungsverlusten wieder ab. Ein einzelnes Photon hat bis dahin aber hunderte oder gar tausende von Elektronen erzeugt. Kompakte Spannungsversorgungen mit eingebauter Temperaturkompensation ermöglichen den einfachen, stabilen Betrieb der APD auch über einen breiten Temperaturbereich.

Ähnlich wie PIN-Dioden werden APDs auch aus verschiedenen Materialien hergestellt, wobei am häufigsten Silizium (300 – 1100 nm), InGaAs (900 – 1700 nm) sowie Germanium (800 – 1600 nm) verwendet werden. Während Si-APDs mit unterschiedlichen Herstellungsprozessen in einer Vielzahl an Größen von 230 µm bis sogar 16 mm Durchmesser hergestellt werden, sind die InGaAs-APDs in der Regel deutlich kleiner (max. 350 µm), weil das Halbleitermaterial auf großen Wafern nicht mit der nötigen Homogenität hergestellt werden kann (die wegen der hohen Feldstärke in der Grenzschicht unabdingbar ist). (wo)

Dr. Mike Hodges, Laser Components

„Weil PIN-Photodioden sehr kompakt, vielfältig und kostengünstig in hohen Stückzahlen zu produzieren sind, sind sie zum Photodetektor erster Wahl geworden.“



Ähnlich erschienen in der Zeitschrift Markt & Technik, Ausgabe 15/2008

05/08 / V1 / HW / Ic/veroeffentlichung/ es-werde-strom.doc

