

Detektion kleinster Lichtmengen mit Avalanche-Photodioden

Ein Überblick über optische APD-Receiver-Module

Bei Avalanche-Photodioden werden Ladungsträger in einem elektrischen Feld beschleunigt und bilden durch Stoßionisation weitere Elektron-Loch-Paare. Auf diese Weise kann selbst ein einzelnes Photon einen deutlichen Photostrom auslösen, welcher sich dann detektieren lässt. Avalanche-Photodioden sind daher normalen PIN-Dioden überlegen, wenn es um Anwendungen geht, bei denen kleinste Lichtmengen detektiert werden sollen.

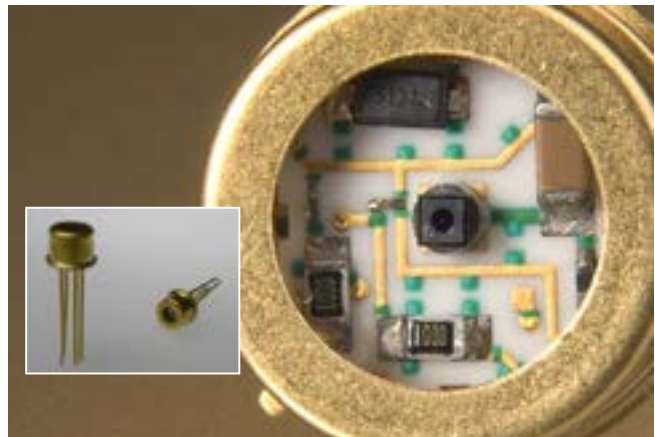
WINFRIED REEB • DRAGAN GRUBISIC

Die Verwendung von Avalanche-Photodioden (avalanche photodiodes, APDs) stellt den effizientesten Weg dar, die Empfindlichkeit zu erhöhen. Dabei kann die interne Verstärkung der APD erhöht werden, bis das Signal-Rausch-Verhältnis (signal-noise-ratio, SNR) durch das Shot-Rauschen limitiert wird. Das Leistungsvermögen des kompletten Detektorsystems hängt jedoch zum überwiegenden Teil von der elektronischen Schaltung ab.

Signalverstärkung

APDs werden nur dann benötigt, wenn das Rauschen des kompletten Empfängers durch das Verstärker-rauschen limitiert ist, d.h. der Rauschanteil des Verstärkers größer ist als das Rauschen des Detektors. Dies tritt jedoch nur bei hohen Geschwindigkeiten auf.

In diesem Fall ist die Transimpedanz-Verstärkung durch die τRC Zeitkonstante limitiert. Durch den Einsatz einer APD mit interner Verstärkung verbessert sich das Signal-Rausch-Verhältnis eines APD-Verstärker-Moduls relativ im Vergleich zu einem Modul mit PIN-Detektor plus Verstärker. Sowohl die optimale Verstärkung als auch das SNR des Empfängers ist umso höher, je niedriger das excess noise [1]. Bei hohen Bandbreiten ist dieses spezifisch durch die Verstärkung verursachte Rauschen die dominante Rausch-



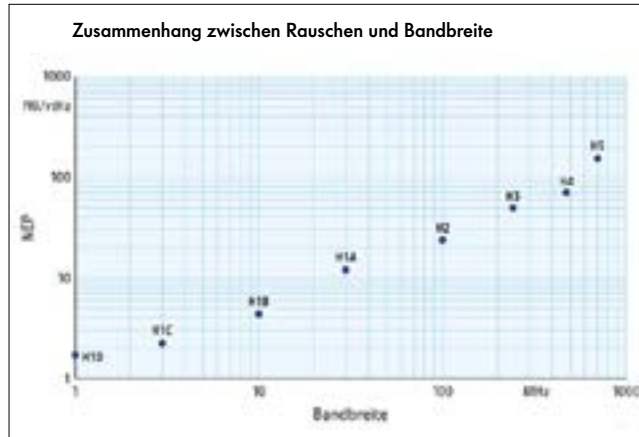
quelle. Deswegen ist es wichtig, die Kapazität, welche an dem Verstärker anliegt, so klein wie möglich zu halten, um das Gesamt-rauschen des Detektor-Verstärker-Moduls zu reduzieren.

Das optimale SNR

In der Praxis wird dies erreicht, indem bei einem Receiver-Modul alle Komponenten dicht beieinander auf einem Keramiksубstrat mit niedriger Kapazität untergebracht sind. Dies reduziert die Streukapazität und damit das Rauschen, wodurch die beste Systembandbreite für die jeweilige Anwendung gegeben ist. Darüber hinaus lassen sich so ex-

trem kompakte Module aufbauen. Einfach ausgedrückt gilt es, bei einem APD-Receiver-Modul zwischen Geschwindigkeit und Rauschen abzuwägen. Ein typischer Empfänger besteht aus der APD und einem Transimpedanzverstärker (TIA). Beim TIA handelt es sich um einen Strom-in-Spannung konvertierenden Verstärker, welcher mittels Rückkopplungswiderstand die Verstärkung fixiert. Da die APD einen Strom erzeugt, dient der Rückkopplungswiderstand als Verstärkung. Vereinfacht entspricht die Ausgangsspannung des Verstärkers dem APD-Strom multipliziert mit dem Rückkopplungswiderstand.

Detektion kleinster Lichtmengen mit Avalanche-Photodioden



1: Optimal eingestellte Signal-Rausch-Verhältnisse bei realen APD-Receiver

Störfaktoren

Neben dem Rauschen der APD ist das »Johnson«-Rauschen des Rückkopplungswiderstands die Hauptkomponente des Gesamtrauschens [2]. Im Gegensatz zur »Johnson«-Störspannung, welche bei größer werdendem Widerstand steigt, sinkt der äquivalente »Johnson«-Störstrom. So wird durch Erhöhen der Verstärkung (Rückkopplungswiderstand) die Eingangsrauschdichte des Verstärkers verringert. Zum Problem wird jetzt jedoch die Verringerung der Bandbreite, da für den TIA das Produkt aus Verstärkung und Bandbreite konstant ist, das heißt mit höherer Verstärkung beziehungsweise größerem Widerstand sinken sowohl Bandbreite als auch Eingangsrauschdichte.

Optimale Aussteuerung

Das Diagramm (Bild 1) zeigt den optimalen Zusammenhang zwischen Rauschen und Bandbreite, welche mit den APD-Verstärker-Einheiten von Laser Components realisiert werden. Das Rauschen ist hier als äquivalente Rauschleistung (noise equivalent power, NEP) dargestellt, welches ein Wert in Watt, äquiva-

lent zur Rauschdichte des Systems, ist. Dies ist ein guter Indikator für den niedrigsten Wert an optischer Leistung, welcher durch den Empfänger detektiert werden kann.

Auswahl des korrekten APD-Receiver

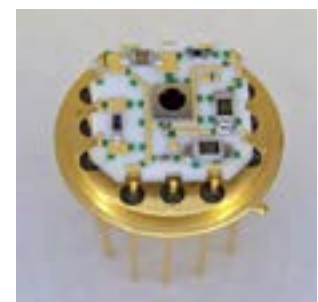
Für den Nutzer ist es wichtig, sich über die tatsächlichen Anforderungen an die Bandbreite bei seiner Anwendung im Klaren zu sein, um so das am besten geeignete Bauteil auswählen und das damit verbundenen NEP minimieren zu können. Auf dem Markt werden hierfür verschiedene Modelle, jedes optimiert für eine andere Bandbreite, angeboten.

Zum Nachweis kleinster Lichtmengen ist beispielsweise die »H1«-Serie von Laser Components entwickelt worden (Bild 2). Die Bauteile sind DC-gekoppelt und verfügen über einen 50 Ohm Ausgang. Eine zweite Verstärkerstufe zur Signalinvertierung sorgt außerdem dafür, dass ein Lichtpuls eine positive Spannung erzeugt und eine zusätzliche Spannungsverstärkung auftritt. Die Verstärkerstufe kann außerdem als Tiefpass-Filter verwendet werden,

um Hochfrequenzrauschen zu reduzieren. Ebenfalls eingebaut ist eine Temperaturdiode, um die APD-Temperatur zu messen. Hierdurch kann die Vorspannung durch den Nutzer variiert werden, um so temperaturbedingte Änderungen der Empfängerempfindlichkeit zu kompensieren. Zusätzlich verfügt die Schaltung über einen internen Filter zur Reduzierung der Störungen auf der Hochspannung.

Bis 30 MHz reicht der Bandbreitenbereich der H1-Receiver, die zusätzlich mit verschiedenen Verstärkerkonfigurationen verfügbar sind. Die Modelle »A« bis »D« verwenden verschiedene Rückkopplungswiderstände, was dem Nutzer die Wahl zwischen verschiedenen Empfindlichkeiten gibt, die mit den Bandbreitenanforderungen seiner Anwendung abgestimmt werden können.

Dagegen werden AC-gekoppelte APD-Receiver mit Bandbreiten bis zu 750 MHz vor allem zur sehr schnellen Detektion von kleinsten Lichtmengen eingesetzt (Bild 3). Die Spitzengeschwindigkeit ist hierbei nur durch die Art der verwendeten APD limitiert. Entwickelt für die problemlose Verwendung in high speed Digitalelektroniken haben die Empfänger der »H2«, »H3«, »H4« und »H5«-Serie von Laser Components differenzielle Ausgänge.



2: DC-gekoppelter APD-Receiver ohne Kappe in einem »12-PIN TO-8«-Gehäuse zum Nachweis kleinster Lichtmengen

Detektion kleinster Lichtmengen mit Avalanche-Photodioden



3: AC-gekoppelter APD-Receiver in einem 5-PIN TO-46-Gehäuse

Welcher Detektor für welche Anwendung

Hybride und Avalanche Photodioden eines Herstellers können in der Regel beliebig miteinander kombiniert werden. Die beiden Materialkombinationen von kommerzieller Relevanz sind dabei Silizium und InGaAs. Si-APDs sind, abhängig von ihrer Struktur, zwischen 300 und 1100 nm empfindlich, InGaAs zwischen 900 und 1700 nm. Durch den Einsatz verschiedener Detektorstrukturen lässt sich die spektrale Empfindlichkeit von APDs auf bestimmte Wellenlängen optimieren (650 beziehungsweise 905 oder 1064 nm bei Si-APDs und 1550 nm bei InGaAs-APDs). Weitere Optimierungsschritte und Selektionen ermöglichen darüber hinaus die Herstellung extrem rauscharmer APDs, mit denen man einzelne Photonen nachweisen kann. Dies ermöglicht es dem Anwender, den richtigen Detektor für seine spezifischen Anforderungen zu wählen.

Medizinische Anwendungen wie zum Beispiel optische Kohärenztomographie (optical coherence tomography, OCT) und Fluoreszenzmessungen verlangen für gewöhnlich den niedrigen NEP der »H1«-Serie. Fortschritte in der Verwendung von Nahinfrarotquellen in Verbindung mit APDs haben den Weg für die OCT-Bildgebung bei stark streuendem Gewebe geebnet. Heutzutage ist die optische in vivo Biopsie eines der herausforderndsten Anwendungsfelder für OCT. Hohe Auflösung, hohe Durchdringungstiefe und das Potential zur funktionalen Bildgebung ermöglichen der OCT eine Qualität in der optischen Biopsie, welche genutzt werden kann, um beispielsweise Gewebe- und Zellfunktionen sowie Morphologie zu begutachten.

Die gängigste Anwendung für sehr schnelle APD-Receiver-Module ist die Entfernungsmessung mittels Laser oder Laserscanner, welche auf der »time-offlight«-Methode basieren. Um eine Auflösung im Millimeterbereich zu erreichen sind sehr hohe Messfrequenzen nötig. Aus diesem Grund setzen sowohl kommerzielle als auch militärische rangefinder, Geschwindigkeitsmessgeräte, Celiometer und LIDAR-Systeme für gewöhnlich auf die hohen Bandbreiten der »H2«- bis »H5«-Serie.



4: Komplettes »plug & play« APD-Modul mit integriertem H1-Receiver

Fazit: eine passende Produktpalette

Streukapazität an der Schnittstelle zwischen Detektor und Verstärker hat einen negativen Einfluss auf das Rauschen und die Bandbreite des Detektorsystems. Detektor-Verstärker-Hybride, bei welchen alle Komponenten dicht beieinander auf einem Keramiksubstrat mit niedriger Kapazität untergebracht sind, helfen die bestmögliche Systemperformance zu bekommen. Dabei sind gewisse Kompromisse zwischen Rauschen und Bandbreite zu bedenken. Laser Components bietet verschiedene APD-Hybride an, um eine optimale Systemleistung für die jeweilige Anwendung zu erzielen.

LITERATUR

- 1 http://en.wikipedia.org/wiki/avalanche_photodiode
- 2 http://en.wikipedia.org/wiki/johnson_noise

AUTOREN

WINFRIED REEB studierte an der FH Aalen Feinwerktechnik/ Optoelektronik. Seit 1994 ist er Produktingenieur bei Laser Components und beschäftigt sich mit dem Vertrieb von aktiven Komponenten für die Lasertechnik und Optoelektronik.

DRAGAN GRUBISIC ist Geschäftsführer von Laser Components DG, dem Produktionsstandort von »High-Tech Avalanche-Photodioden« in Phoenix, Arizona, USA. Heute profitiert er von seinen umfassenden Erfahrungen im Bereich der Lichtdetektion sowie in der Entwicklung und im Aufbau von IR-Photodetektoren, die er nach seinem M.Sc. Abschluss sammelte.

Ähnlich erschienen in der Zeitschrift *Laser+Photonic* Ausgabe 3, 2009