



## Single-Photon-Avalanche-Dioden

### VERBESSERTES APD-DESIGN ERMÖGLICHT EFFIZIENTERE EINZELPHOTONEN-DETEKTOREN

Noch vor 25 Jahren hätte sich kaum jemand die Bedeutung von Einzelphotonendetektoren im 21. Jahrhundert vorstellen können. Heutzutage vertrauen Wissenschaftler und Ingenieure selbstverständlich auf diese Technik, um extrem schwache Lichtsignale zu detektieren.

**MIKE HODGES  
STEPHANIE GRABHER**

Bei Anwendungen, bei denen traditionelle Detektoren nicht mehr zwischen Signal und Rauschen unterscheiden können, treten Einzelphotonendetektoren in Aktion. Prominente Beispiele hierfür sind die Quantenkryptografie, Spektroskopie, LIDAR-Anwendungen, DNA-Analysen, Partikelmessungen, Fluoreszenzmikroskopie oder Einzelmoleküldetektion.

Betrachtet man die Größenordnung der Signalstärken, die in solchen Fällen detektiert werden, wird offensichtlich, wieso man von Einzelphotonendetektion spricht. Die Anzahl der Photonen pro Sekunde, die einer gewissen optischen Leistung entspricht, wird durch folgende Formel beschrieben:

$$N(\lambda) = 5,03 \times 10^{15} \cdot \lambda \cdot P$$

wobei  $P$  der optischen Leistung in Watt und  $\lambda$  der Wellenlänge in nm entspricht. Daraus folgt, dass 1 fW bei einer Wellenlänge von 405 nm in etwa 2000 Photonen pro Sekunde entspricht (**Bild 1**).

Obwohl sich die oben genannten Anwendungen in ihrer Thematik sehr unterscheiden, haben sie doch eines gemeinsam: den Anspruch auf einen hocheffizienten Einzelphotonenzähler mit gleichzeitig sehr geringem Hintergrundrauschen. Zu diesem Zweck sollen im Folgenden verschiedene Technologien für Einzelphotonendetektoren vorgestellt werden.

#### Der Photomultiplier

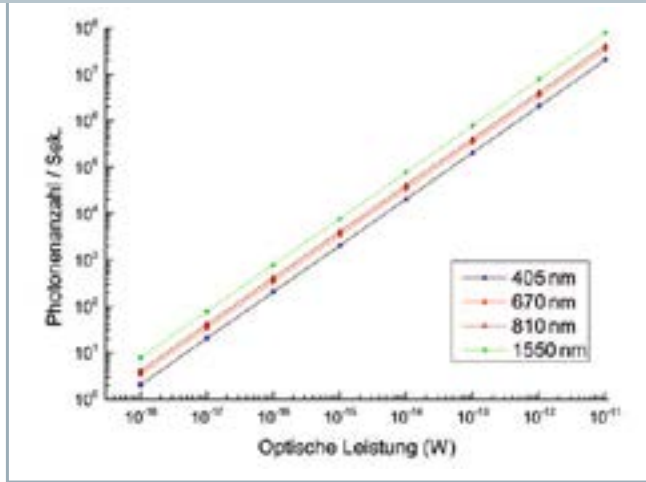
Der Photomultiplier (PMT) ist eine spezielle Form einer Vakuumröhre, die ein

einfallendes Photon mithilfe von interner Verstärkung durch einen Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) in ein elektrisches Signal umwandelt. Dabei entsteht ein lawinenähnlicher Effekt, der zu einem messbaren elektrischen Puls an der Anode am Ende des SEV führt. Für den Betrieb des PMTs werden sehr hohe Spannungen im Bereich von 1 bis 3 kV benötigt. Der schematische Aufbau eines PMT ist in **Bild 2** ersichtlich.

#### KONTAKT

LASER COMPONENTS GmbH  
82140 Olching, Deutschland  
Tel. +49 8142 2864765  
info@lasercomponents.com  
www.lasercomponents.com

Einzelphotonendetektion, Sensorik **OPTIK & OPTOELEKTRONIK**



1 Wellenlängenabhängige Korrelation zwischen Leistung und Anzahl der einfallenden Photonen

Um einzelne Photonen zu detektieren, kann der PMT auch in einem sogenannten »Geiger-Modus« betrieben werden. Allerdings muss hierbei durch den sehr hohen internen Strom das Gerät nach jedem Photonenereignis auf null gesetzt werden. Dies führt zu einer Totzeit, in welcher kein weiteres Photon detektiert werden kann.

Verschiedene Kathodenmaterialien mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften werden je nach dem bevorzugten Spektralbereich eingesetzt. Während diese Materialien zuerst im blauen beziehungsweise UV-Wellenlängenbereich am empfindlichsten waren, stehen dem Anwender heute auch PMTs mit verbesserter IR-Empfindlichkeit zur Verfügung. Im Normalfall sind PMTs mit relativ großen aktiven Flächen (bis 75 mm Durchmesser) ausgestattet, welche aber dann gekühlt werden

müssen, um sehr hohe Dunkelzählraten zu vermeiden. Zudem sind PMTs empfindlich gegenüber externen magnetischen Feldern und neigen zu hohem »Afterpulsing«: ein Effekt, der Ausgangspulse erzeugt, die nicht in direkter Verbindung mit dem zu detektierenden Signal stehen.

**Das APD-Array**

Auch Photodioden machen sich den photoelektrischen Effekt zur Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren und des damit verbundenen Photostroms zunutze. Vor Kurzem wurden »Multipixel-Avalanche-Photodioden« entwickelt, die auf der CMOS-Technologie basieren und im Geiger-Modus betrieben werden. Diese auch als »Silizium-Photomultiplier« bezeichneten Detektoren bestechen durch ihre geringen Kosten,

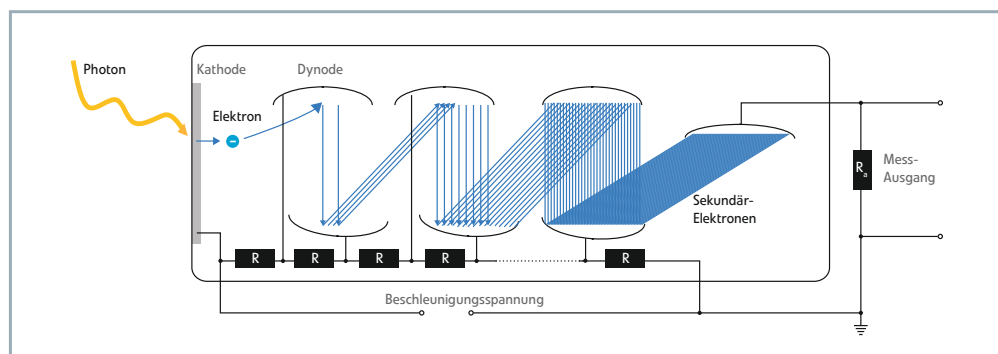
niedrigen Betriebsspannungen, kompakte Bauweise mit großer aktiver Fläche und eine gute zeitliche Auflösung. Bis heute gibt es jedoch noch ungelöste Nachteile der APD-Arrays: Das sind die hohe Dunkelzählrate, die etliche Größenordnungen über jenen der konventionellen Geiger-Modus-Single-Photon-Avalanche-Diode liegt, sowie die geringe Quanteneffizienz bei längeren Wellenlängen.

**Der PMT-APD-Hybrid**

Seit Kurzem existieren auch PMT-APD-Hybridssysteme, bei welchen das eintreffende Photon auf der Photokathode ein Elektron auslöst, dieses aber nicht wie bei üblichen PMTs in den SEV gelangt, sondern direkt auf eine APD trifft. Der Hauptvorteil, der sich aus diesem Prinzip ergibt, ist das so gut wie nicht vorhandene »Afterpulsing«. Weitere Vorzüge sind die große aktive Fläche im mm-Bereich sowie die gute zeitliche Auflösung. Die Kehrseite der Medaille ist das schwierige Handling dieser Hybridprodukte (über 8000 V an der Photokathode) sowie der eingeschränkte Spektralbereich und die Notwendigkeit einer rauscharmen nachgeschalteten Elektronik, wenn auf niedrige Dunkelzählraten Wert gelegt wird.

**Single-Photon-Avalanche-Dioden**

Anders als normale PIN-Dioden machen sich Avalanche-Photodioden (APDs) den Lawinendurchbruch zunutze, um interne Verstärkung und damit eine höhere Empfindlichkeit zu erzielen. Voraussetzung hierfür ist eine hohe Sperrspannung: ▶



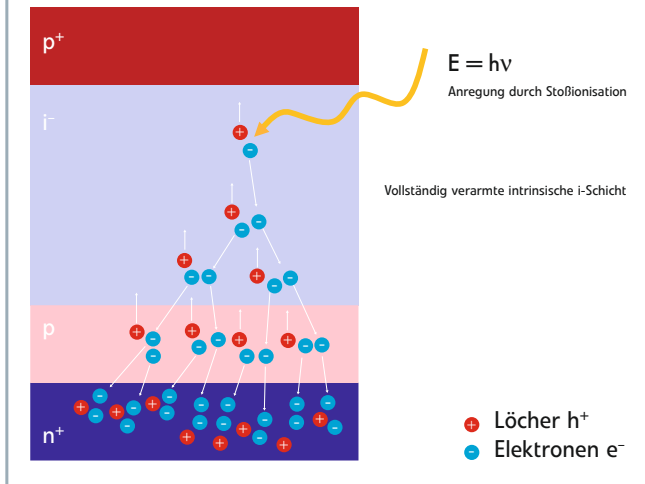
2 Schematischer Aufbau eines Photomultipliers (PMT)

www.laser-photonik.de

Internet-PDF-Datei. Diese PDF Datei enthält das Recht zur unbeschränkten Intranet- und Internetnutzung, sowie zur Verbreitung über elektronische Verteiler. Eine Verbreitung in gedruckter Form ist mit dieser PDF-Datei nicht gestattet.

08/19 / V02 / IF / IC / publications / single-photon-avalanche-dioden

OPTIK & OPTOELEKTRONIK Einzelphotonendetektion, Sensorik



3 Funktionsprinzip einer Avalanche-Photodiode (APD): Ein einfallendes Photon erzeugt ein Elektron-Loch-Paar. Das zur Multiplikationszone beschleunigte Elektron erzeugt durch Stoßionisation weitere Elektron-Loch-Paare und der Lawineneffekt entsteht.

► Diese weitet die Absorptionsregion der APD auf und ermöglicht so eine ausreichende Produktion von Elektron-Loch-Paaren durch Stoßionisation. Die erzeugten Elektronen werden dann durch die hohen Spannungen hin zur Multiplikationszone beschleunigt und verursachen dort durch weitere Stoßionisationen den Lawineneffekt (siehe Bild 3). Wird die APD unter der Durchbruchspannung betrieben, ebbt die Lawine aufgrund von Reibungsverlusten im Halbleiter sehr schnell ab. Verwendet man hingegen speziell konstruierte APDs und betreibt diese oberhalb der Durchbruchspannung (Geiger-Modus), spricht man von Single-Photon-Avalanche-Dioden (SPADs). Mit diesen SPADs lassen sich interne Verstärkungen von bis zu  $10^8$  erzielen, da die Ladungswelle erhalten bleibt.

Ein solcher Betriebsmodus führt zu hohen Strömen im Inneren der SPAD, die unter Kontrolle gehalten werden müssen, da sie ansonsten dazu führen, dass die Diode leitfähig bleibt oder beschädigt wird. Im einfachsten Fall wird das durch einen Vorwiderstand realisiert (passives Quenching), an welchem die Spannung abfällt, wodurch die SPAD wieder in den gesperrten

Zustand übergeht. Allerdings weisen solche Systeme sehr hohe Totzeiten auf und limitieren dadurch die maximale Zählrate [1]. Daher verwenden die meisten kommerziell erhältlichen SPAD-Module eine spezielle Elektronik (aktives Quenching), die die Sperrspannung innerhalb weniger Nanosekunden wieder absenkt, nachdem der Durchbruchstrom detektiert wurde. Dadurch entstehen kurze Totzeiten in der Größenordnung von 50 ns, welche die maximale Zählrate auf 10 MHz und mehr anwachsen lassen.

Zusätzlich werden moderne SPADs mit einer thermoelektrischen Kühlung ausgestattet und weisen daher extrem geringe Dunkelzählraten von 10 c/s und weniger auf. Bild 4 zeigt das Blockschaltbild eines

Count-Moduls von Laser Components mit Faseranschluss.

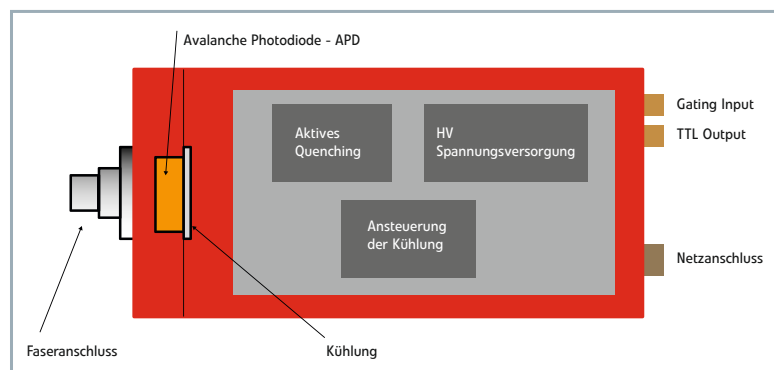
**Detektionseffizienz: Der Schlüssel zum Erfolg**

Einige Leistungsmerkmale, die zum Vergleich von Detektoren von Bedeutung sind, sind die Dunkelzählrate, die Afterpulsing-Wahrscheinlichkeit und die Totzeit. Der Parameter, dem die größte Relevanz bei den meisten Anwendungen zugesprochen wird, ist aber die Detektionseffizienz. Aus diesem Grund bevorzugt man oftmals SPADs im Gegensatz zu PMTs; ihre Quanteneffizienz (QE) im Bereich von 300 nm bis in den NIR-Bereich ist deutlich höher. Die QE ist definiert als Verhältnis zwischen absorbierten Photonen und generierten Elektronen und ist  $\leq 1$ . Sie kann auch als Prozentzahl angegeben werden und steht mit der spektralen Empfindlichkeit eines APD-Detektors in folgender Relation:

$$QE = (R_0 \cdot 1240) / \lambda \cdot 100 \%$$

Hier entspricht  $R_0$  der spektralen Empfindlichkeit in A/W sowie  $\lambda$  der Wellenlänge in nm. Die QE ist ein Maß für die Effizienz der APD selbst – die Effizienz des gesamten SPAD-Moduls wird zusätzlich von der Elektronik beeinflusst. Aus diesem Grund wird auf Datenblättern für SPAD-Module oftmals die Photonen-Detektionseffizienz ( $P_d$ ) genannt; sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein einfallendes Photon einen elektrischen Puls am Ausgang des Moduls erzeugt.

Beim Design einer SPAD ist zu beachten, dass sowohl die Detektionseffizienz



4 Blockschaltbild eines Count-Moduls von Laser Components

Einzelphotonendetektion, Sensorik OPTIK & OPTOELEKTRONIK

als auch die Dunkelzählrate von der Vorspannung, die an die APD angelegt wird, abhängen. Wie oben erwähnt, wird die APD im Geiger-Modus, das heißt über der Durchbruchspannung ( $V_{op} > V_{br}$ ), betrieben. Die Differenz zwischen  $V_{op}$  und  $V_{br}$  wird als Überspannung bezeichnet, welche so gewählt werden kann, dass bestimmte Parameter wie beispielsweise die Detektionseffizienz optimiert werden (siehe **Tabelle A**). Diese Optimierung ist allerdings nur erfolgreich, wenn die APD, die dem Modul zugrunde liegt, von ausreichend hoher Qualität ist. Das erfordert eine APD-Struktur, die für die maximale QE ausgelegt ist, aber zugleich einen minimalen  $K$ -Faktor aufweist [2], um das Hintergrundrauschen so niedrig wie möglich zu halten (der  $K$ -Faktor ist das Verhältnis zwischen den Ionisierungseigenschaften von Löchern und Elektronen).

Laser Components Detector Group's »VLoK«-APD (very low  $K$ ) ist speziell für diese Anforderungen konzipiert worden und besticht durch noch nie dagewesene Dunkelzählraten  $< 10$  c/s und zugleich durch eine Detektionseffizienz von  $> 80$  Prozent bei 670 nm.

Während SPADs traditionellerweise die Detektoren der Wahl für Anwendungen im roten und NIR-Wellenlängenbereich sind, dominierten PMTs die blaue und UV-Region des Spektrums aufgrund ihrer hohen QE bei kurzen Wellenlängen. Jüngste Entwicklungen bei SPADs zeigen jedoch, dass diese nicht nur im roten, sondern auch im blauen Wellenlängenbereich ihre Berechtigung haben. Ein gutes Beispiel hierfür ist die »Count blue«-Serie von Laser Components, die auf einer UV-verbesserten Version der VLoK-APD basiert. Der Count blue hat eine typische Detektionseffizienz von 55 Prozent bei 405 nm und von 70 Prozent bei 532 nm Wellenlänge. Auch für den nahen infra-



5 Die SPAD-Module Count NIR und Count Q

roten Bereich existieren mittlerweile verbesserte Detektoren wie beispielsweise der »Count NIR«, der speziell für Anwendungen in der Quantenoptik und Quanteninformation entwickelt wurde. Er zeichnet sich durch eine überdurchschnittliche Detektionseffizienz von typischerweise 60 Prozent bei 810 nm aus (**Bild 5**).

Weitere Vorteile der SPAD-Module sind die einfache Bedienung mit einer niedrigen Betriebsspannung (typischerweise 5 oder 12 V DC) sowie optionale Faserkopplungen, die für spezielle Wellenlängen optimiert werden können.

Weiter in den NIR-Bereich

Obwohl sich die Mehrheit der SPAD-Entwicklungen bisher auf Silizium beschränkt hat, besteht immer mehr Bedarf an Einzelphotonendetektoren im IR-Bereich. Für den Wellenlängenbereich ab 1000 nm eignen sich InGaAs-APDs, welche Detektionseffizienzen von bis zu 20 Prozent aufweisen. Da die Hauptanwendung für die InGaAs-Detektoren im Bereich der Quantenkryptografie liegt (das heißt bei 1550 nm), können diese geringeren Detektionseffizienzen durch einen nahezu verlustfreien Transport der Photonen in

Fasern kompensiert werden. Allerdings weisen diese Detektoren signifikant höhere Dunkelzählraten auf als Si-APDs.

Das neue »Count Q«-Modul (**Bild 5**) wurde deshalb speziell für solche Anwendungen entwickelt. Es zeichnet sich durch einstellbare QE (bis zu 15 Prozent; bereits korrigiert bezüglich Dunkelzählrate und *Afterpulsing*) sowie variable Totzeit aus und kann daher vom Kunden anwendungsspezifisch eingestellt werden.

Fazit

Mit der immer größer werdenden Anzahl von Anwendungen im Bereich der Einzelphotonenerzeugung im gesamten Wellenlängenbereich von UV bis IR wachsen auch die Anforderungen an Detektoren, die diese einzelnen Photonen detektieren können. Hierfür wird mehr und mehr versucht werden, die Vorteile der kostengünstigen CMOS-Technologie mit der effizienten und rauscharmen SPAD zu kombinieren.

LITERATUR

- 1 Stipevic M., Skenderovic H., Gracin D.: »Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range«, Optics Express 18(2010) S. 17448-17459
- 2 Webb, P.P. et al: »Properties of Avalanche Photodiodes«, RCA Review. Vol. 35, Juni 1974, S. 234-278

AUTOREN

Dr. MIKE HODGES ist Produktingenieur bei Laser Components und für den Vertrieb von APDs und gepulsten Laserdioden verantwortlich.

STEPHANIE GRABHER ist Produktingenieurin bei Laser Components und verantwortlich für den Vertrieb der Einzelphotonendetektoren.

www.laser-photonik.de  
Online unter LP110211

Betriebsspannung ( $V_{op}$ )	Überspannung ( $V_{br} - V_{op}$ )	$P_d$ @ 405 nm (Prozent)	$P_d$ @ 670 nm (Prozent)	$P_d$ @ 810 nm (Prozent)	Dunkelzählrate (c/s)	Afterpulsing (Prozent)	Totzeit (ns)
346,3	2,0	30	55	32	15,4	0,04	61
348,4	4,1	36	69	43	31,4	0,11	55
350,6	6,3	40	79	51	57,4	0,24	51
352,3	8,0	43	85	55	91,4	0,42	50
355,0	10,7	45	90	60	138,2	0,89	49

A Detektionseffizienz und Dunkelzählrate in Abhängigkeit von der Betriebsspannung für eine VLoK-APD

www.laser-photonik.de

Internet-PDF-Datei. Diese PDF Datei enthält das Recht zur unbeschränkten Intranet- und Internetnutzung, sowie zur Verbreitung über elektronische Verteiler. Eine Verbreitung in gedruckter Form ist mit dieser PDF-Datei nicht gestattet.