

Silizium-Detektoren der Zukunft

Verschiedene Typen von Detektoren ermöglichen ein breites Spektrum von Anwendungen in Forschung und Industrie.

Winfried Reeb

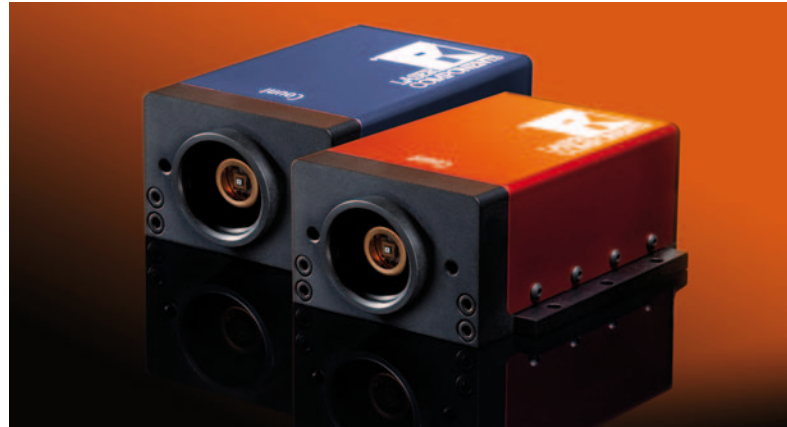
In der Spektroskopie spielt die Umwandlung von Photonen in Elektronen, vor allem im Bereich des sichtbaren Lichts, eine entscheidende Rolle. Als Ausgangsstoff für solche „Lichtumwandler“ eignet sich Silizium optimal, da es nahezu unbegrenzt verfügbar ist.

Nachdem in Deutschland der Atomausstieg beschlossen ist, gewinnt die Energiegewinnung mittels Solarzellen erneut an Bedeutung. Bei der Solarzelle bzw. photovoltaischen Zelle handelt es sich um ein elektrisches Bauelement, das kurzwellige Strahlungsenergie (meist Sonnenlicht) direkt in elektrische Energie wandelt. Solarzellen sind im Prinzip wie großflächige Photodioden aufgebaut und dienen als Stromquelle. Bei den großflächig (200 bis 400 cm²) hergestellten Zellen dreht sich somit alles um einen hohen Wirkungsgrad und hohe Leistungsdichte.

Verlangt nun die Applikation, kleine oder kleinste Lichtmengen nachzuweisen, muss der Detektor möglichst rauscharm und sehr empfindlich sein. Abhängig von den geforderten Spezifikationen stehen z. B. Photodioden, CCDs, Avalanche Photodioden (APD), Photomultiplier (PMT) oder Single Photon Counting Module zur Auswahl.

Detektion mit Photodioden

Eine Photodiode ist eine Halbleiterdiode, die einfallende Photonen an einem p-n-Übergang oder pin-Übergang^{#)} durch den inneren Photoeffekt in einen elektrischen Strom umwandelt. Abhängig von Material und Dotierung geschieht dies im UV-, sichtbaren oder IR-Bereich. Mithilfe eines Szintillators lässt sich Röntgenstrahlung nachweisen. Ziel ist es dabei, die Information zu analysieren, die das Licht



COUNT-Photonenzähler zählen einzelne Photonen und bieten sehr niedrige Dun-

kelzählraten bei besten Rauscheigenschaften.

überträgt. Hängt die Information von der Position ab, eignen sich spezielle positionsempfindliche Detektoren wie PSDs, CCDs oder Multielement-Detektoren. Häufig kommen die Komponenten in Ausrichtsystemen zum Einsatz, wo die Position eines Referenz-Laserstrahls relativ zum PSD zu messen ist. Dieses Prinzip wird in den verschiedensten Bereichen genutzt – vom Brückenbau bis zu optischen Bänken oder wenn es darum geht, die Bewegung von Membranen in Mikrofonen, Lautsprechern und Drucksensoren oder von optischen Fasern in Wind- oder Beschleunigungssensoren zu erfassen. Auch der Füllstand in Treibstofftanks lässt sich so vermessen. Mit einer einfachen analogen Schaltung resultiert eine Auflösung bis in den Sub-Nanometer-Bereich.

In fast allen Bereichen der Messtechnik schränkt das Rauschen den Nachweis schwacher Signale ein. Dabei ist darauf zu achten, dass das Eigenrauschen des Detektors nicht größer ist als das zu messende Signal. Mithilfe des NEP-Wertes (Noise Equivalent Power) lässt sich das Detektorrauschen quantifizieren. Der NEP-Wert gibt die Lichtenergie an, die nötig ist, um einen dem Rauschstrom des Detektors äquiva-

lenten Photostrom zu erzeugen. Da ein Messsystem für diese NEP nur eine bestimmte Bandbreite erfassen kann, gilt die NEP für eben diese. Sie bezieht sich aufgrund der unterschiedlichen Quantenwirkungsgrade für verschiedene Wellenlängenbereiche auf eine Wellenlänge und berechnet sich als Quotient aus dem Rauschstrom des Detektors und der Detektorempfindlichkeit bei der Wellenlänge λ [1]. Das Rauschen einer Photodiode setzt sich im Wesentlichen aus dem Shot- und dem Johnson-Rauschen zusammen. Bei hohen Sperrvorspannungen überwiegt das Shot-Rauschen, sonst

Winfried Reeb, Laser Components GmbH, Werner-von-Siemens-Str. 15, 82140 Olching

#) Bei einem pin-Übergang befindet sich eine schwach nicht dotierte Schicht zwischen p- und n-Schicht.

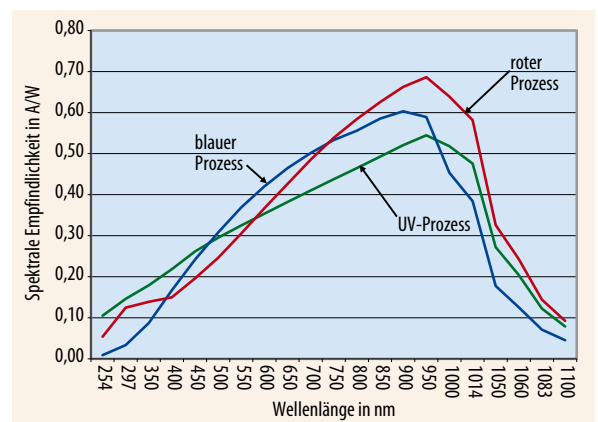


Abb. 1 Die spektrale Empfindlichkeit von Si-PIN-Photodioden hängt vom Herstellungsprozess (rot, blau, UV) ab. Bei einer Wellenlänge von z. B. 655 nm (rot) beträgt sie etwa 0,4 A/W, d. h. bei einer einfallenden Lichtleistung von 1 mW beträgt der Ausgangsstrom 0,4 mA.

das Johnson-Rauschen. Die spektrale Empfindlichkeit einer Si-PIN-Photodiode hängt von der Wellenlänge, vom Herstellungsprozess und vom Material ab (Abb. 1).

Da die Leistung in vielen Anwendungen sehr klein ist, muss ein Vorverstärker häufig erst das Messsignal verstärken. Das Gesamt-rauschen setzt sich in diesem Fall zusammen aus dem Detektor-, dem thermischen und dem Verstärker-rauschen. Letzteres hängt vom Verstärkertyp und von der Frequenz ab und ist oft der limitierende Faktor. Daher ist es wichtig, den Frequenzbereich und den passenden Operationsverstärker zu optimieren.

Die perfekte Lawine

Avalanche-bzw. Lawinenphotodioden (APD) sind hochempfindlich und schnell. Sie unterscheiden sich von PIN-Photodioden darin, dass einfallende Photonen eine interne Ladungslawine auslösen und somit bereits intern eine Verstärkung stattfindet. Voraussetzung hierfür ist, dass an der APD eine Sperrspannung anliegt, um die Verarmungszone aufzuweiten.

Bei konventionellen Photodioden erzeugen einfallende Photonen Elektron-Loch-Paare (Ladungsträger), die einen messbaren Photostrom liefern. APDs gehen einen großen Schritt weiter. Das Bias-Potential ist wesentlich höher als bei normalen Photodioden. In der APD beschleunigt ein elektrisches Feld die vom Licht freigesetzten Ladungsträger derart, dass sie durch Stoßionisation weitere Elektron-Loch-Paare erzeugen. Ist die Sperrspannung kleiner als die

Durchbruchspannung, stirbt die Lawine aufgrund von Reibungsverlusten wieder ab. Ein einzelnes Photon hat bis dahin hunderte oder gar tausende von Elektronen erzeugt. Oberhalb der Durchbruchspannung ist die Beschleunigung der Ladungsträger hoch genug, um die Lawine am Leben zu halten; ein einziges Photon reicht aus, um einen stetigen Strom zu generieren, den eine externe Elektronik messen kann. Der erzeugte Strom berechnet sich wie folgt:

$$I = R_0 \cdot M \cdot P_s$$

wobei R_0 die spektrale Empfindlichkeit der APD, M die interne Verstärkung und P_s die einfallende Lichtleistung ist [2]. Dabei hängt die Verstärkung der APD von der angelegten Sperrspannung ab (Abb. 2).

APD versus PIN

Um das Leistungsvermögen einer APD mit einer PIN-Diode zu vergleichen, reicht es nicht aus, nur das Rauschen der Detektoren zu vergleichen. Entscheidend ist das Signal-Rausch-Verhältnis des gesamten Systems. Bei PIN-Dioden ist also immer der zugehörige Vorverstärker zu berücksichtigen.

Eine APD ist überlegen, wenn sie das Signal deutlich verstärken kann, ohne das Gesamt-rauschen des Systems signifikant zu erhöhen. Dabei ist die interne Verstärkung optimal gewählt, wenn das Detektorrauschen dem Eingangsrauschen des nachfolgenden Verstärkers (oder Lastwiderstandes) gleicht und die APD das Systemrauschen nicht beeinträchtigt. Bei PIN-Dioden und APDs wächst das Rauschen mit der

Bandbreite des Systems, sodass diese möglichst klein sein sollte.

APDs sind die erste Wahl, um kleinste Lichtmengen zu detektieren. Typische Einsatzgebiete sind z. B. LIDAR-Systeme, die als kleine Laserentfernungsmesser in ein Zielfernrohr oder Fernglas integriert sind. Diese Systeme finden ihren Absatz bei Sportlern wie Golfspielern oder Seglern, die den genauen Abstand zu einem Zielpunkt ermitteln möchten. Da nur ein Bruchteil des ausgesendeten Laserlichts zurück zum Sender kommt, sind bei zunehmendem Abstand empfindlichere Detektoren erforderlich. Laser und APD erlauben es der Polizei, Geschwindigkeiten und Sicherheitsabstand sehr präzise zu erfassen. Auch die Automobilindustrie macht sich diese Technologie zunutze: Mittels Abstands- und Relativgeschwindigkeitsmessung bieten Fahrerassistenzsysteme mehr Komfort und Sicherheit, z. B. für Abstandswarner, Spurführungsassistenten oder auch Notbremssysteme für zu dicht auffahrende Fahrzeuge. Zudem ermöglichen Laserscanner es dank der empfindlichen Detektoren, Gefahrenbereiche bis zur Größe eines kleinen Fingers gegen unbefugtes Betreten zu schützen. Medizinische Anwendungen wie die optische Kohärenztomographie (OCT) und Fluoreszenzmessungen verlangen Detektoren mit extrem niedrigen NEP. Hier haben verbesserte Nahinfrarotquellen und APDs den Weg für die OCT-Bildgebung bei stark streuendem Gewebe geebnet. Hohe Auflösung, hohe Durchdringungstiefe und das Potential zur funktionalen Bildgebung ermöglichen der OCT eine Qualität in der optischen Biopsie, mit der sich Gewebe- und Zellfunktionen sowie Morphologie begutachten lassen.

Jedes Photon zählt

Spezielle Si-APDs – Single Photon Avalanche Diode (SPAD) – können als Photonenzähler im „Geiger-Modus“ oberhalb der Durchbruchspannung dienen, wobei ein einzelnes Photoelektron einen Lawinenpuls von ca. 10^8 Ladungsträgern auslöst. Normalerweise würde eine

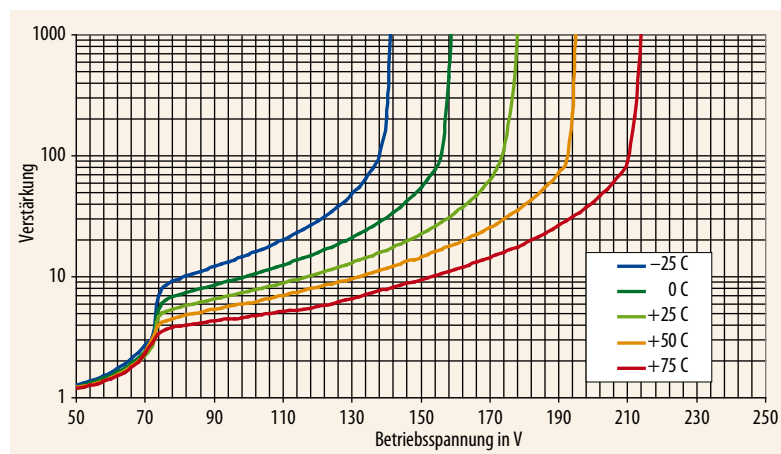


Abb. 2 Die Verstärkung der APD (mit einem Durchmesser von $500 \mu\text{m}$) hängt von der Temperatur ab.

APD oberhalb der Durchbruchspannung einen sehr großen Strom abführen. Eine entsprechende Beschaltung muss verhindern, dass die Diode durch den hohen Strom leitfähig bleibt. Im einfachsten Fall senkt ein Spannungsabfall an einem Vorwiderstand die Sperrspannung über der APD, die dadurch in den gesperrten Zustand übergeht (passives Quenching). Der Vorgang wiederholt sich selbsttätig, und die Stromimpulse lassen sich zählen. Beim aktiven Quenching senkt eine spezielle Elektronik die Sperrspannung beim Erkennen eines Durchbruchstromes innerhalb weniger Nanosekunden aktiv ab. Ein erneutes Anheben der Sperrspannung über die Durchbruchspannung aktiviert die SPAD wieder. Die Signalverarbeitung der Elektronik führt zu Totzeiten von ca. 50 ns, sodass Zählraten bis 10 MHz möglich sind [3, 4]. Komplette Einzelphotonenzählwerke, die in einem kompakten Gehäuse neben der gekühlten SPAD die umfangreiche Elektronik einschließlich stabilisierter Hochspannungsversorgung und Temperaturcontroller beinhalten, ermöglichen die beste Performance.

Häufigste Anwendungsfelder für diese Einzelphotonenzählwerke sind die Biolumineszenz und Fluoreszenz-Korrelations-Spektroskopie (FCS). Die Grundlage für FCS bildet meist ein konfokales Mikroskop. Ein Objektiv fokussiert dabei das Anregungslicht in die Probe, sodass ein möglichst kleines Anregungsvolumen entsteht, in dem Teilchen zur Fluoreszenz angeregt werden. Dabei absorbieren diese Teilchen die Photonen des Anregungslichts und emittieren ihrerseits Photonen größerer Wellenlänge. Die emittierten Photonen können jetzt den (für das Anregungslicht undurchlässigen) Strahlteiler passieren und werden dann detektiert. Eingebaut in ein Fernfeldmikroskop liegt die Auflösung etwa bei der halben Wellenlänge des Anregungslichts. STED-Mikroskope (STED = Stimulated Emission Depletion) erreichen sogar eine Auflösung von 5,8 nm [5].

Diese Technologien helfen, die DNA-Replikation im Zellkern zu erforschen. Für diese Anwen-

Betriebsstrom in V	Überspannung in V	Quanteneffizienz bei			Dunkelzählrate in c/s	Afterpulsing in %	Totzeit in ns
		405 nm in %	670 nm in %	810nm in %			
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

dungen kommen auch preiswerte Photomultiplier infrage. SPADs bieten aber eine sehr hohe Quanteneffizienz und einen großen Messbereich von 300 nm bis ins NIR.

Die Qual der Wahl

Die Quanteneffizienz (QE) ist die tatsächliche Fähigkeit eines Detektors, Photonen in Elektronen oder Löcher umzuwandeln. Sie wird als das Verhältnis der erzeugten Elektronen zu den einfallenden Photonen in Prozent ausgedrückt und hängt von der Wellenlänge ab. Die meisten Hersteller geben die spektrale Empfindlichkeit des Detektors R_0 in Ampere pro Watt an. Der Zusammenhang zwischen beiden Größen ist folgender:

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

mit der Wellenlänge λ . Wenn alle anderen Eigenschaften gleich sind, ist der Detektor mit der größten Quanteneffizienz die beste Wahl. Bei der Einzelphotonenzählung spielt das Rauschen des Detektors eine wichtige Rolle. In diesem Fall wird es in der Dunkelzählrate c/s (counts/second) angegeben.

Die Quanteneffizienz und die Dunkelzählrate hängen von der an den Detektor angelegten Betriebsspannung ab (Tab.). Die Kunst besteht darin, eine spezielle Diode herzustellen, die eine maximale Quanteneffizienz bei möglichst kleiner Dunkelzählrate ermöglicht. Die von der Laser Components Detectors Group entwickelte VLoK-APD (Very Low K-factor) erfüllt diese Anforderungen. Sie ermöglicht Dunkelzählraten unter 10 c/s bei gleichzeitiger Quanteneffizienz von mehr als 80 % im roten Spektralbereich (Tab.).

Für die Einzelphotonenzählung bei kürzeren Wellenlängen führte bislang kein Weg an Photomultipli-

ern vorbei, zumal die Quanteneffizienz der SPADs dort bislang kräftig einbrach. Je nach Kathodenmaterial detektieren Photomultiplier einzelne Photonen bis 115 nm. Die Quanteneffizienz liegt im Bereich von 10 bis 20 %, im blauen Spektralbereich bei ca. 30 % [6]. Mit dem COUNTblue bietet Laser Components nun auch ein UV angehobenes Einzelphotonenzählwerk auf APD-Basis an, das im Vergleich zu Photomultipliern bei 405 nm deutlich höhere Effizienzen von über 50 % aufweist. Neben der Mikroskopie und Spektroskopie finden derartige SPAD-Module ihren Einsatz in der dynamischen Partikelgrößenbestimmung, bei speziellen LIDAR-Systemen, in der Astronomie oder in der Quanten-Kryptographie.

Zusammenfassung

Silizium stellt als Ausgangsmaterial für die Lichtumwandlung das wichtigste Medium dar. Während es bei der Energiegewinnung darum geht, die Zellen immer effektiver zu gestalten, geht es vor allem in der Mess- und Medizintechnik darum, die Dioden effizienter und rauschärmer zu machen. Spezielle Avalanche Photodioden legen hierzu den Grundstein. Neue Einzelphotonendetektoren sind u. a. in der menschlichen Zellforschung bedeutsam.

- [1] P. Webb und N. Bertone, Noise and Stability in PIN Detectors, EG&G Optoelectronics Canada
- [2] D. Grubisic, Silicon Avalanche Photodiodes, Application Note from Laser Components
- [3] G. Kell et al., Proc. of SPIE, 8033, 803303 (2011)
- [4] M. Stipcevic, Characterization of a Novel Avalanche Photodiode for Single Photon Detection in VIS-NIR Range, Institute of Physics, HR-10002 Zagreb, Croatia
- [5] S. W. Hell, Nature Photonics 3, 144 (2009)
- [6] Hamamatsu Photomultiplier Tube Handbook

Tab. Quanteneffizienz und Dunkelzählrate hängen von der Betriebsspannung ab (Beispiel für 300 μm VLoK-APD)