

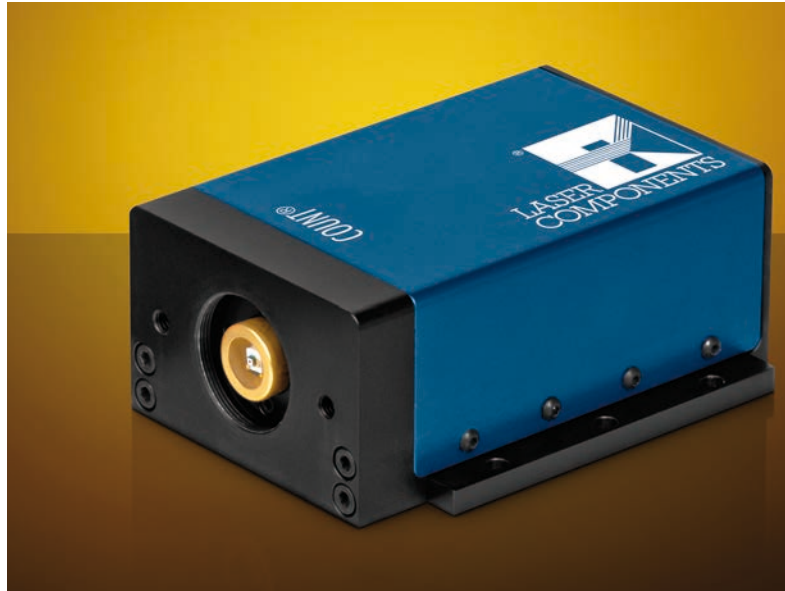
Ein höchst effizienter Photonenjäger

Single Photon Avalanche Dioden können einzelne Photonen nachweisen.

Stephanie Grabher und Michael Kapfhammer

Eine besondere Struktur in Kombination mit einer Antireflexbeschichtung ermöglicht es, das Maximum der Detektionseffizienz von Single Photon Avalanche Dioden (SPAD) in den blau/grünen Spektralbereich zu legen – mit vielfältigen Anwendungen von Biophysik bis Quantenoptik.

Photodioden sind Halbleiterdetektoren, die einfallendes Licht durch den inneren Photoeffekt in elektrischen Strom umwandeln. Avalanche Photodioden (APD) werden mit Sperrspannungen nahe der Durchbruchspannung betrieben und können dadurch um zwei Größenordnungen höhere Verstärkungen erzielen. Sie wurden entwickelt, um kleine Lichtmengen zu detektieren. Noch geringere Lichtmengen bis hin zu einzelnen Photonen lassen sich mit Single Photon Avalanche Dioden (SPAD) detektieren, die oberhalb der Durchbruchspannung im sogenannten Geiger-Modus betrieben werden. Standardmäßig erreichen Silizium SPAD-Module ihre höchste Detektionseffizienz bei ungefähr 700 nm im roten Spektralbereich. Wie verschiebt man die spektrale Empfindlichkeit hin zu kürzeren Wellenlängen? Um hohe Detektionseffizienzen zu erreichen, sind zwei Faktoren ausschlaggebend: Zum einen ist eine vorteilhafte Wahl der SPAD-Struktur und Gestaltung der Dotierlevel innerhalb der Struktur essenziell (Abb. 1a). Diese sind für die Beschleunigung der Photoelektronen verantwortlich und erzeugen den Lawinenprozess im Detektor. Zum anderen lässt sich mit einer geeigneten Antireflex-Beschichtung (AR) auf der Detektorfläche der SPAD die Detektionseffizienz im blau/grünen Spektralbereich optimieren.



Das „COUNT-blue“-Modul der Firma Laser Components zeichnet sich dadurch aus, dass das Maximum der Detektionseffizienz

in den blau/grünen Spektralbereich verschoben wurde – niedrige Dunkelzählraten inklusive.

Dadurch sind selbst in der Region um 405 nm Detektionseffizienzen von mehr als 60 Prozent möglich. Zum Einsatz kommen hier AR-Beschichtungen erster Ordnung mit PECVD-Nitrid.

Randeffekte. Zudem sind innerhalb der Struktur die Anforderungen an die Homogenität der dotierten Bereiche hoch, damit sich keine lokal erhöhten elektrischen Felder bilden können [3].

Die „Reach-through“-Struktur

Je nach Anforderung eignen sich verschiedene Strukturen für SPADs. Um die Detektionseffizienz zu maximieren und die Dunkelzählrate zu minimieren, greift man auf die „Reach-through“-Struktur zurück [1] (Abb. 1a). Eintreffende Photonen werden in der π -Region absorbiert und erzeugen dort Elektron-Loch-Paare. Der Lawinenprozess geschieht dann in der $p-n^+$ -Region mithilfe hoher Feldstärken [2]. Für einen stabilen Betrieb im Geiger-Modus, weisen SPADs strukturelle Besonderheiten auf. So verhindert beispielsweise eine Guard-Ring-Struktur negative

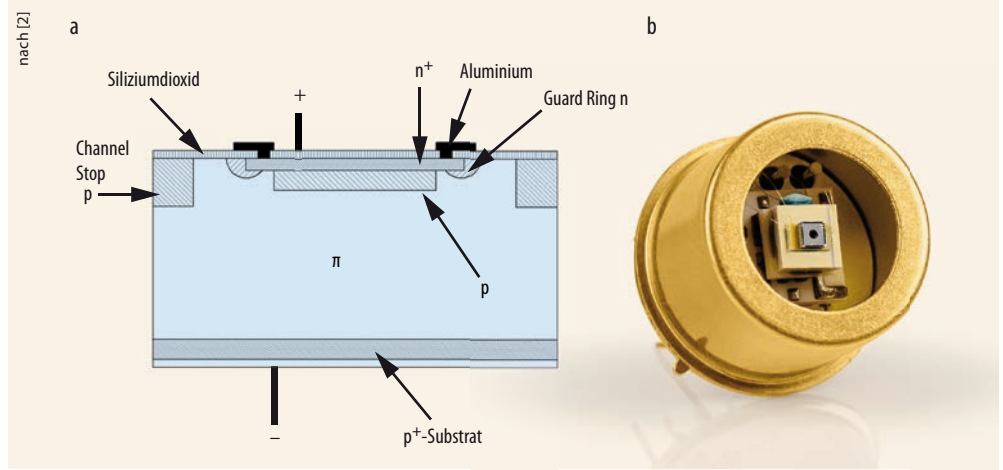
Niedrige Dunkelzählraten bei hoher Effizienz

Die Struktur der „SAV300T8“ von Laser Components, die auf einem Siliziumsubstrat hergestellt wird, zeichnet sich neben hohen Detektionseffizienzen durch ein sehr geringes Rauschen aus. Dies rührt daher, dass gezielt das effektive Verhältnis der Ionisationskoeffizienten für Löcher gegenüber Elektronen (k_{eff}) minimiert wird, sodass k_{eff} äußerst geringe Werte von nur etwa 0,002 annimmt. Gegenüber k_{eff} -Werten von herkömmlichen „Reach-through“-Strukturen [1] ist dies um eine Größenordnung besser.

Stephanie Grabher und Michael Kapfhammer, Laser Components GmbH, Werner-von-Siemens-Str. 15, 82140 Olching

Best of

Abb. 1 Bei der „Reach-through“-Struktur einer SPAD werden die in der π -Region erzeugten Elektron-Loch-Paare in der p_n^+ -Region lawinenartig verstärkt (a). Für die Anwendung werden die SPADs in ein TO-Gehäuse verbaut (b).



Von der SPAD zum Modul

Für den weiteren Gebrauch in Modulen werden die SPADs in ein hermetisches TO-Gehäuse verbaut und mit einem zweistufigen Peltier-Kühler ausgestattet (Abb. 1b). Kombiniert man eine solche SPAD mit einer geeigneten Elektronik, die passiv oder aktiv [4] „gequentscht“ sein kann, ergibt sich ein Plug-and-Play-Modul, das sich bequem mit wenigen Volt Eingangsspannung betreiben lässt. Je nach Art der SPAD unterscheiden sich solche Module hinsichtlich diverser Eigenschaften wie Dunkelzählrate, zeitliche Auflösung, Totzeit, aktive Fläche des Detektors oder auch Detektionseffizienz bei verschiedenen Wellenlängen.

Die Kühlung und die Elektronik können diese Eigenschaften verstärken bzw. optimieren. So hängt beispielsweise die Dunkelzählrate exponentiell von der Betriebstemperatur der SPAD ab (Abb. 2a). Eben-

falls eine Temperaturabhängigkeit zeigt die Durchbruchspannung, was in der dargestellten Messreihe bereits berücksichtigt wurde. Außerdem hängt die Detektionseffizienz von der Überspannung ab (Abb. 2b). Anhand der applizierten Überspannung lässt sich für ein COUNT-Modul spezifisch für jede einzelne SAV-SPAD ein geeigneter und den Kundenwünschen angepasster Arbeitspunkt auswählen. Abbildung 2c zeigt dies exemplarisch anhand zweier SAV300T8-Detektoren. Einem Wert für die Detektionseffizienz, der sich aus dem gewählten Arbeitspunkt mit der applizierten Überspannung ergibt, wird hier ein Wertepaar für Dunkelzählrate und der Wahrscheinlichkeit dafür zugeordnet, dass aufgrund von Störstellen ein zusätzliches verzögertes Signal auftritt (Afterpulsing). Als jeweils geeigneter Arbeitspunkt für die beiden dargestellten COUNT-Module wurden in diesem Fall Überspan-

nungen appliziert, die gleichbedeutend einer gemessenen Detektionseffizienz von etwa 77 ± 10 Prozent bzw. 82 ± 10 Prozent sind.

Von der Biophysik bis hin zur Quantenoptik

Anwendungen für solche Einzelphotonendetektoren finden sich zahlreiche und in vielen verschiedenen Bereichen. So verwendet die Arbeitsgruppe von Don Lamb an der LMU München solche Detektoren für Drei-Farben-FRET-Messungen (Förster Resonance Energy Transfer) an einzelnen Molekülen. Hierbei ist die hohe Detektionseffizienz im grünen Kanal im Bereich von 500 bis 550 nm besonders wichtig, da durch die Anwesenheit zweier Akzeptor-Farbstoffe das blaue Signal stark geschwächt ist. Basierend auf vorherigen Studien [5] gilt es, durch die gleichzeitige Beobachtung von drei Distanzen

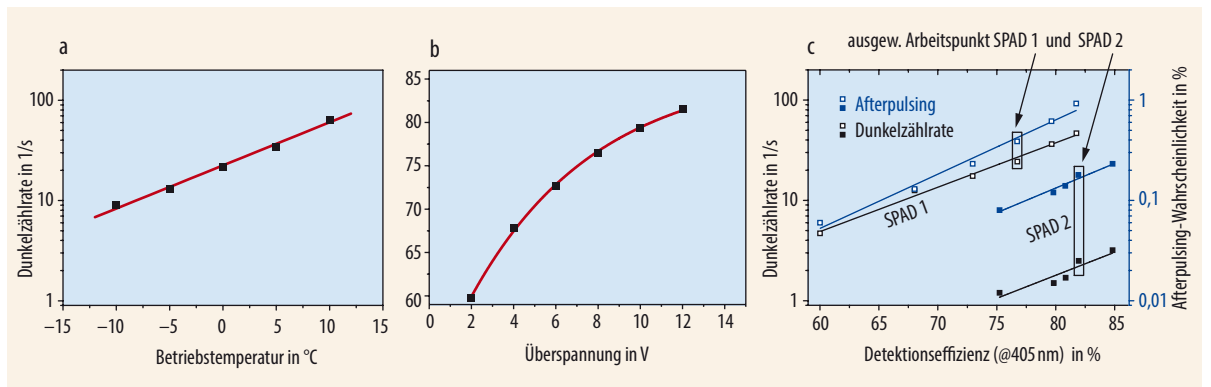


Abb. 2 Bei einer SPAD, hier als Beispiel eine SAV300T8, hängt die Dunkelzählrate exponentiell von der Betriebstemperatur ab (a) und die Detektionseffizienz von der angelegten Überspannung (b). Für jede SPAD lässt sich der Arbeitspunkt je nach

Temperatur (hier: -10 °C) und Spannung wählen (c). Der ausgewählte Arbeitspunkt bei SPAD 1 bzw. 2 entspricht einer Detektionseffizienz von 77 bzw. 82 % bei 405 nm, einer Dunkelzählrate von 24 bzw. 3 cps und einem Afterpulsing von 0,39 bzw. 0,18 %.

die Koordination von Bewegungen in Proteinen zu untersuchen. Ebenso biophysikalischer Natur sind die Messungen, für die das Max-Planck-Institut für Neurobiologie in Martinsried ein COUNT-blue-Modul eingesetzt hat. Mithilfe eines STED-Mikroskops wurden lebende Zellen, genauer dendritische Dornfortsätze, untersucht, deren Ausdehnungen für konventionelle Lichtmikroskope nicht auflösbar sind.

Die Gruppe von Susan Cox am King's College in London verwendet das COUNT-blue-Modul ebenfalls für Fluoreszenzmessungen an einzelnen Molekülen und untersucht derzeit die Eigenschaften der geeigneten Fluoreszenzfarbstoffe.

Auch in der Quantenoptik sind niedrige Dunkelzählraten und hohe Detektionseffizienzen im blau/grünen Spektralbereich nötig. Die Arbeitsgruppe von Roman Schnabel am Institut für Gravitationsphysik in Hannover betreibt für die Quantenkommunikation wichtige Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Frequenzverdopplung von Photonen in nichtlinearen Kristallen. Diese Photonen werden bei 532 nm detektiert und Korrelationsmessungen unterzogen [6].

Im Bereich der Quanteninformation forscht die Gruppe um Stefan Kröll an der Universität Lund in Schweden. Sie arbeitet mit Lanthanoid-Ionen in Kristallen, die als Qubits in einem Quantencomputer zum Ersatz kommen sollen. Als „Read-out“-Ion, welches Aufschluss über den Zustand der Qubits gibt, fungiert Cer, welches in der Spektralregion von 371 bis 500 nm fluoresziert. Auch die Gruppe von Gerd Leuchs am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen erforscht die Licht-Materie-Wechselwirkung anhand der Kopplung von Licht an Ytterbium-Ionen. Um dieses Interface für Quanteninformationsprotokolle interessant zu machen, ist es notwendig, diese Photon-Ion-Kopplung so effizient wie möglich zu machen [7].

Dass Experimente auch exotisch sein können, zeigt eine aktuelle Anwendung des Instituts für Tex-

til- und Verfahrenstechnik in Denkendorf. Dort werden sogenannte Black-out- oder Verdunklungstextilien auf ihre Lichtdurchlässigkeit überprüft. Da die Lichtintensitäten, die durch die Textilien transmittiert werden, äußerst gering sind, kommen auch hier Einzelphotonendetektoren zum Einsatz.

Der Kunde ist König

Die genannten Anwendungen und Experimente zeigen, dass das COUNT-blue-Modul seinen festen Platz in unterschiedlichsten Bereichen der Forschungseinrichtungen und Universitäten gefunden hat. Zahlreiche wissenschaftliche Publikationen, auf die wir an dieser Stelle noch nicht im Detail eingehen konnten, sind derzeit in Arbeit und werden in naher Zukunft erscheinen. Wie auch das COUNT-blue-Modul selbst 2011 aus zahlreichen Kundenanfragen entstanden ist, wird weiterhin sehr viel Wert auf Feedback aus dem Markt gelegt werden, um Neuheiten zu entwickeln und technische Verbesserungen schnell und effizient umzusetzen.

Literatur

- [1] P.P. Webb et al., RCA Rev. **35**, 234 (1974)
- [2] S.P. Sim, IEEE Trans. on electron devices, Vol. ED-**29**, 10 (1982)
- [3] M. Lesniak und D. B. Holt, Journal of Materials Science **22**, 3547 (1987)
- [4] PicoQuant GmbH, Patentschrift DE 10 2010 060 527 B3, „Schaltungsanordnung zum Nachweis einzelner Photonen“ (2012)
- [5] V. Kudryavtsev et al., ChemPhysChem **13**, 1060 (2012)
- [6] R. Schnabel et al., arxiv:1406.1602v1 (2014)
- [7] G. Leuchs et al., arxiv: 1311.1982v1 (2013)