



1

Infrared Detectors for Single Photons

Frank Rutz – frank.rutz@iaf.fraunhofer.de

Single-photon detection is a challenging and important task for the upcoming use of quantum technologies and can be achieved by operating avalanche photodiodes above the breakdown voltage. In this so-called Geiger mode, the absorption of a single photon can trigger an avalanche multiplication process, resulting in a macroscopic current pulse that is easy to measure. Detectors for single infrared photons can be used in quantum communication or for range-gated viewing over large distances.

1 *Fiber-based telecommunication systems with quantum encryption benefit from single-photon detectors.*

Lichtleitfaser basiertes

Telekommunikationssystem:

Einzelphotonen-Detektoren für die quantenkryptographische Verschlüsselung.

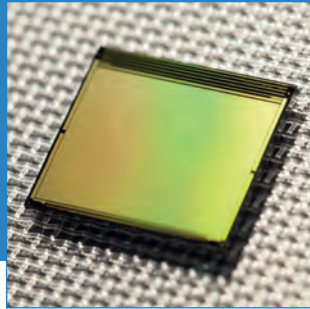
The straight forward method of detecting light is to convert light energy into a voltage output using a photodiode together with a transimpedance amplifier. In such a configuration, the voltage output is directly proportional to the light intensity and the lowest light level detectable is equal to the output from the amplifier corresponding to the noise of the detector/amplifier combination. At high bandwidths, the amplifier noise is the dominant source.

Avalanche Photodetectors

One way to mitigate the noise contribution of the amplifier is by utilizing the internal gain provided by avalanche photodiodes (APDs). An APD is a semiconductor junction diode where the internal electric field caused by a relatively high bias voltage leads to an avalanche multiplication process due to the impact ionization of charge carriers. Ordinary APDs are biased slightly below the breakdown

voltage. This kind of operation is called linear mode since the input power produces an output that is directly proportional to the input light intensity. In photon counting mode (Geiger mode), one photon detected generates a macroscopic output pulse that is counted. In contrast with standard APDs, such a single photon avalanche diode (SPAD) is biased above the breakdown voltage.

At a defined overvoltage, i. e. voltage above the breakdown voltage, the electric field within the depleted region of the device is extremely high. This means that the absorption of a single photon and subsequent injection of the charge carrier into the junction triggers a self-sustaining multiplication process, where an avalanche current of several mA flows through the junction. The avalanche current must be quenched before a subsequent photon can be detected. This is accomplished by lowering the SPAD bias



- Short-wave infrared
- Single-photon avalanche diodes
- Geiger mode
- Quantum communication
- Gated viewing, time of flight

Infrarot-Detektoren für einzelne Photonen

Die Detektion einzelner Photonen ist eine herausfordernde und doch wichtige Aufgabe für die zukünftige Nutzung von Quantentechnologien. Beim Betrieb einer Avalanche-Photodiode oberhalb ihrer Durchbruchspannung löst die Absorption eines einzelnen Photons einen Lawinenverstärkungsprozess aus, was in Form eines makroskopischen Stromimpulses gemessen werden kann. Detektoren für einzelne Photonen im Infraroten eröffnen Anwendungsfelder wie beispielsweise die Quantenkommunikation oder die entfernungsabhängige Bildgebung über große Distanzen.

3.8

*Gain factor for
640 x 512 pixel SWIR*

APD camera in linear mode.

*Linearer Verstärkungsfaktor
einer SWIR-APD-Kamera mit
640 x 512 Bildpunkten.*

Die einfachste Methode zur Licht-Detektion besteht in der Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Spannung durch Verwendung einer Photodiode zusammen mit einem Transimpedanz-Verstärker. Die geringste nachweisbare Lichtintensität entspricht einem Ausgangssignal, das genauso groß ist, wie das Rauschen des Detektor-Verstärker-Systems.

Avalanche-Photodetektoren

Eine Möglichkeit, den Rauschbeitrag des Verstärkers zu minimieren, ist die Nutzung des internen Verstärkungseffekts einer Avalanche-Photodiode (APD). Eine APD besteht aus einer Halbleiterdiode, in der das elektrische Feld resultierend von den relativ hohen angelegten Sperrspannungen mittels Stoßionisation zu einer Lawinenmultiplikation von beweglichen Ladungsträgern führt. Üblicherweise werden APDs etwas unterhalb der Durchbruchspannung betrieben. Diese Betriebsart wird auch

als linearer Modus bezeichnet, weil sich das Ausgangssignal direkt proportional zur einfallenden Eingangsintensität verhält. Im Gegensatz dazu wird eine Einzelphotonen-Avalanche-Diode (Single Photon Avalanche Diode, SPAD) im sogenannten Geiger-Modus, d. h. oberhalb der Durchbruchspannung betrieben. Dabei ist das elektrische Feld innerhalb der Verarmungszone der APD derart hoch, dass die Absorption eines einzelnen Photons und die anschließende Injektion des generierten Ladungsträgers in den pn-Übergang einen sich selbsterhaltenden Lawinen-Vervielfältigungsprozess auslöst, aufgrund dessen Stromstärken im Bereich einiger mA fließen. Der Durchbruchstrom muss zuerst wieder unterbunden werden (Quenching), bevor ein weiteres Photon detektiert werden kann. Dies wird durch ein kurzzeitiges Absenken der an der SPAD angelegten Spannung unterhalb der Durchbruchspannung und das anschließende



2

2 Live image of a 640 x 512 InGaAs APD camera operated at a linear gain factor of 3.8.

Aufnahme mit einer InGaAs-APD-Kamera im Format 640 x 512, betrieben bei einem linearen Verstärkungsfaktor von 3,8.

voltage below breakdown and then resetting it to its overvoltage using passive or active electronic feedback circuits. The time it takes to reset the SPAD to its overvoltage is known as the »dead time«, since during this period the SPAD cannot detect any incoming photon.

Quantum Communication

A lot of effort has been made to develop InGaAs APDs for telecommunication applications in the short-wave infrared (SWIR) range between 0.9 and 1.7 μm . Over the last couple of years, developments in low-noise InGaAs

APDs have been presented for both linear-mode and Geiger-mode operation. Passive quenching methods lead to long dead times of more than 200 ns, which is undesirable given the demand for high data rates in telecommunication applications. SPADs are nevertheless essential

for quantum-encrypted communication systems, which call for high photon detection efficiencies, low dark count rates, and fast active quenching circuits with low dead times.

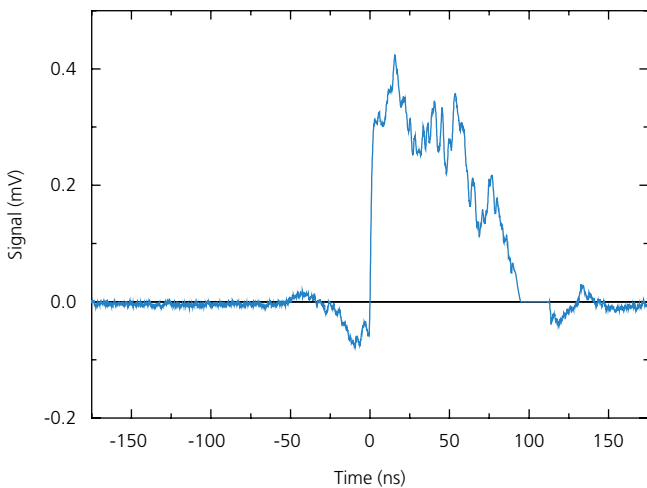
Gated Viewing

Another application for SPADs is range-gated viewing, an imaging technique that makes use of the time of flight of emitted SWIR photons that are scattered back from the

illuminated scene and captured by a suitable camera. Due to the typically high attenuation losses along the light path, the photon flux incident on the camera detector might be so low that the use of SPADs becomes mandatory. Here, the rather low repetition rates of the illuminating pulsed laser system allow for passive quenching with long dead times far above 1 μs or – instead – gating techniques, i. e. operating the SPAD for defined time periods above and below breakdown voltage in a repetitive way. Two-dimensional SWIR SPAD arrays with between 32 x 32 and 128 x 32 pixels are already available in the USA.

Current Research at Fraunhofer IAF

Over the last year, we have developed InGaAs APD detector arrays with 640 x 512 pixels with a pitch of 15 μm . Together with our industrial partner AIM Infrarot-Module GmbH, we were able to successfully demonstrate high-resolution SWIR imaging in the linear mode with a gain factor of 3.8 (Fig. 2). The SWIR APD camera features a high homogeneity without blooming or dead row/column artifacts, a relatively low operating voltage of 21 V, and an operating temperature of up to 260 K. To date, the characterization setup in our lab is capable of detecting pulses comprising roughly 2000 photons when the InGaAs APD is operated in gated mode. Fig. 3 shows an example of a transient photo signal of a sub-ns laser pulse containing approximately 5500 photons within a 150 ns gate interval. We are currently in the process of expanding our ability to characterize InGaAs SPADs.



3 Measured transient photo signal of a sub-ns laser pulse containing approx. 5500 photons within a 150 ns gate interval.

Gemessenes Photosignal eines Sub-ns-Laserimpulses mit etwa 5500 Photonen innerhalb eines Zeitfensters von 150 ns.

2000 photons/ pulse

*Minimum photon flux
detectable to date.*

*Bislang minimaler nach-
weisbarer Photonenfluss.*

Wiederanlegen der Überspannung oberhalb des Durchbruchs mittels passiver oder aktiver elektronischer Rückkoppelschaltkreise bewerkstelligt. Die nötige Zeit bis zur Wiederherstellung der Überspannung an der SPAD wird als Totzeit bezeichnet, da innerhalb dieser Zeitspanne keine eingestrahelten Photonen in der SPAD detektiert werden können.

Quantenkommunikation

Viele Bestrebungen zielten bereits auf die Entwicklung von InGaAs-APDs für Anwendungen in der Telekommunikation im Wellenlängenbereich des kurzwelligen Infrarot (SWIR) zwischen 0,9 und 1,7 μm . In den vergangenen Jahren wurden InGaAs-APDs mit geringem Rauschen sowohl für den Betrieb im linearen wie auch im Geiger-Modus gezeigt. Methoden zum passiven Quenching bewirken relativ lange Totzeiten von über 200 ns, was für den Bedarf hoher Datenübertragungsraten bei der Telekommunikation unerwünscht ist. Jedoch sind SPADs unentbehrlich für quantenkryptographisch gesicherte Kommunikationssysteme, bei denen großer Wert auf eine hohe Photodetektionseffizienz, eine geringe Dunkelzählrate und kurze Totzeiten gelegt wird.

Entfernungsaufgelöste Bildgebung

Eine weitere Anwendung von SPADs stellt die entfernungsaufgelöste Bildgebung dar. Dieses Bildgebungsverfahren nutzt die Laufzeit der Photonen zwischen der Emission von einer gepulsten SWIR-Strahlungsquelle, der Reflexion, bzw. Streuung in der beobachteten Szene und der Erfassung mit einer geeigneten Kamera. Aufgrund der typischen hohen Dämpfungsverluste entlang des Strahlengangs ist der mit

der Kamera zu erfassende Photonenfluss mitunter so gering, dass hierfür die Verwendung von SPADs unerlässlich ist. Dabei tolerieren die eher geringen Puls wiederholraten des Laser-Beleuchtungssystems auch passives Quenching oder – stattdessen – Gating-Verfahren (Gated Viewing), d. h. der sich periodisch wiederholende Betrieb der SPAD ober- und unterhalb der Durchbruchspannung für jeweils definierte Zeitspannen. In den USA sind SPAD-Bildfeldmatrizen für das SWIR mit 32 x 32 und 128 x 32 Bildpunkten verfügbar.

Aktuelle Forschung am Fraunhofer IAF

Im vorigen Jahr wurden am IAF InGaAs-APD Bildfeldmatrizen mit 640 x 512 Bildpunkten entwickelt. Zusammen mit unserem Industriepartner AIM Infrarot-Module GmbH wurde die hochauflösende Bildgebung im SWIR im linearen Modus mit einem Verstärkungsfaktor von 3,8 erfolgreich demonstriert, siehe Abb. 2. Die SWIR-APD-Kamera zeichnet sich durch eine hohe Bildhomogenität ohne Anzeichen eines Überbelichtungseffekts (Blooming) oder Zeilen-/Spaltenausfällen, eine relativ geringe Betriebsspannung von 21 V und eine Betriebstemperatur von bis zu 260 K aus. Bislang ist die messtechnische Ausstattung unseres Labors dazu geeignet, SWIR-Impulse mit etwa 2000 Photonen mittels InGaAs-APDs im Gating-Betrieb nachzuweisen. Abb. 3 zeigt die beispielhafte Messung des Photosignaltransienten eines sub-ns-Laserimpulses mit etwa 5.500 Photonen innerhalb eines Gatterintervalls von 150 ns. Die Fähigkeiten zur messtechnischen Charakterisierung von InGaAs-SPADs werden derzeit ausgebaut.