HIGH-SENSITIVITY PHOTODETECTORS
PHOTODETEKTOREN MIT HOHER EMPFINDLICHKEIT

FRANK RUTZ
frank.rutz@iaf.fraunhofer.de

SWIR APD modules

- InGaAs-based avalanche photodiode
- Detection cut-off wavelength: 1.7 µm
- Integrated transimpedance amplifier and thermo-electric cooler
- Compact TO-8 package

Technology Readiness Level: 9, 8, 7, 6, 5, **4**, 3, 2, 1

Extremely sensitive photodetectors in the non-visible spectral range are required for many optical sensing applications, e. g. for high-resolution spectroscopy. At Fraunhofer IAF we strive to continuously increase the signal-to-noise ratio by optimizing the characteristics of the detector material and the device processing. The ultimate sensitivity of the photodetectors can be achieved by employing an internal signal gain by using the avalanche effect for signal enhancement.

Photodetectors for various spectral ranges are required for optical sensing applications, including all formats from single-element devices to large-format focal plane arrays. Beyond the visible spectrum, Fraunhofer IAF addresses several non-visible spectral ranges utilizing dedicated III/V semiconductor materials and process technology. This includes the InGaAs/InP material system for the short-wavelength infrared (SWIR, 0.9 – 1.7 µm), InAs/GaSb type-II superlattices for the mid- and long-wavelength infrared (MWIR, 3 – 5 µm, and LWIR, 8 – 12 µm), and AlGaN as well as InGaN for the ultraviolet (UV, 200 – 400 nm). Some of the sensing applications within these spectral ranges suffer from typically low photon fluxes incident on the photodetectors. Therefore, the photodetectors are required to provide very high sensitivities.

SWIR photodetectors for remote sensing

Light detection and ranging (LIDAR) is a versatile measurement principle utilizing a pulsed laser source and a high-sensitivity

1 *Future satellite-borne LIDAR systems can be equipped with short-wave infrared avalanche photodiodes.*
Künftige LIDAR-Systeme, z. B. in Satelliten, können mit Avalanche-Photodioden für das kurzwellige Infrarot ausgestattet werden.

Viele Anwendungen optischer Sensoren im nicht-sichtbaren Spektralbereich, wie die hochauflösende Spektroskopie, benötigen Photodetektoren höchster Empfindlichkeit. Am Fraunhofer IAF streben wir eine kontinuierliche Steigerung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses durch Optimierung der Detektormaterialeigenschaften und der Bauelementprozessierung an. Die größtmögliche Empfindlichkeit von Photodioden kann durch Ausnutzung einer internen Signalverstärkung über den Avalanche-Effekt erzielt werden.

In optischen Anwendungen werden Photodetektoren für verschiedenste Formate, vom Einzelbauelement bis hin zur großformatigen Bildfeldmatrix, und Spektralbereiche eingesetzt. Für die Spektralbereiche jenseits des Sichtbaren kann das Fraunhofer IAF mit spezialisierter III/V-Halbleitermaterial- und Prozesstechnologie aufwarten. Dies beinhaltet das InGaAs/InP-Materialsystem für das kurzwellige Infrarot (SWIR, 0,9 – 1,7 µm), InAs/GaSb-Typ-II-Übergitter für das mittel- und langwellige Infrarot (MWIR, 3 – 5 µm, bzw. LWIR, 8 – 12 µm) und AlGaN sowie InGaN für den ultravioletten Bereich (UV, 200 – 400 nm). Bei einigen Sensoranwendungen innerhalb dieser Spektralbereiche sind sehr geringe Photonenflüsse zu erfassen, sodass Photodetektoren mit sehr hoher Empfindlichkeit benötigt werden.

SWIR-Photodetektoren für die Fernerkundung

Lichtortung und -abstandsmessung (LIDAR) ist ein vielseitiges Messverfahren, bei dem eine gepulste Laserquelle mit einem hochempfindlichen Detektor kombiniert wird. Die Laufzeit der Lichtpulse erlaubt Rückschlüsse über die Entfernung zu den reflektierenden oder streuenden Objekten, was unter anderem zur Kontraststeigerung in entfernungsabhängiger Bildgebung (range-gated viewing) oder zur abstandsfähigen Spektroskopie eingesetzt wird. Je nach Anwendung können unter Umständen nur als augensicher geltende Laserwellenlängen oder solche, die zu bestimmten Molekülabsorptionslinien passen, eingesetzt werden. Für diese Fälle werden wiederum entsprechende SWIR-Detektoren benötigt.

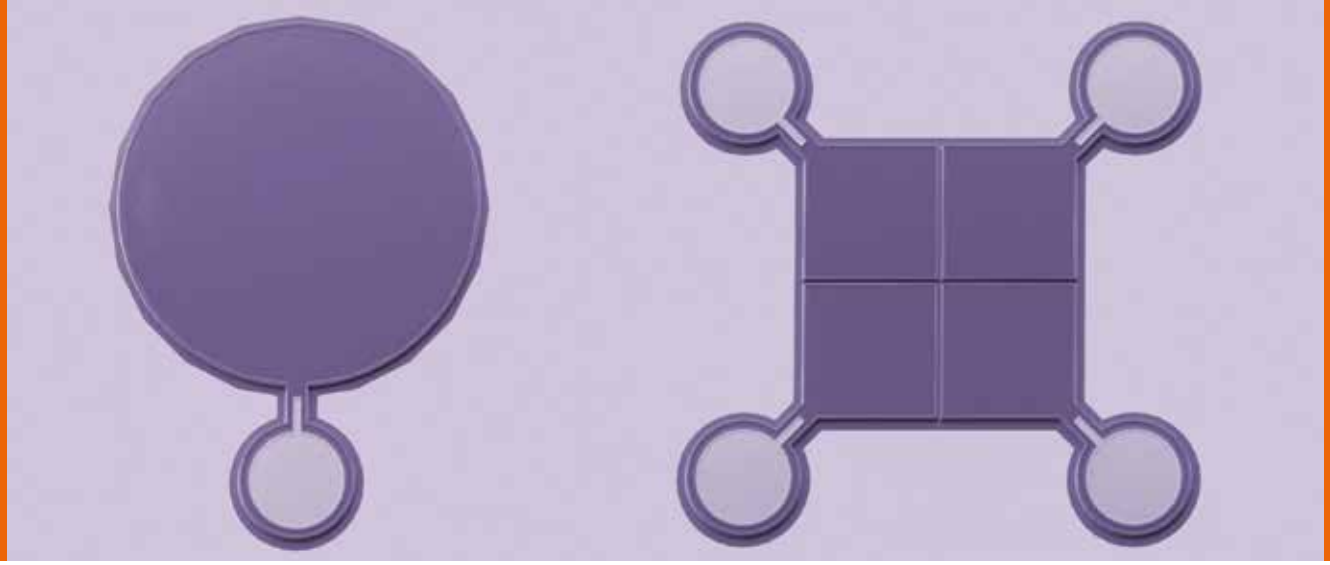
300

GAIN FACTOR /
GEWINNFAKTOR

Maximum gain factor of the avalanche photodiode below breakdown voltage.
Gewinnfaktor der Avalanche-Photodiode unterhalb der Durchbruchspannung.

Am Fraunhofer IAF wurden kürzlich SWIR-Detektormodule entwickelt, die jeweils eine Avalanche-Photodiode (APD), einen Transimpedanzverstärker (TIA), sowie die Spannungsversorgung und Rückkoppelschaltkreise und einen thermoelektrischen Kühler (TEC) mit Temperatursensor zur Stabilisierung der Betriebstemperatur der APD und des Operationsverstärkers des TIA beinhalten. Alle Komponenten wurden in ein TO-8-Gehäuse integriert.

Die SWIR-APD wurde am Fraunhofer IAF entwickelt und hergestellt. Als Material zur Photoabsorption dient InGaAs mit einer Grenzwellenlänge von 1,7 µm, was für zahlreiche LIDAR-Anwendungen sehr gut geeignet ist. In Kombination mit maßgeschneiderten InAlAs-Schichten bildet es eine Heterostruktur-APD mit einem internen Signalgewinnfaktor bis zu 300 nahe der



2

detector. The time of flight of the light pulses yields information on the distance to the reflecting or scattering object, which can be used for contrast enhancement in range-gated viewing or remote spectroscopic applications. Depending on the individual application, the necessity of lasers with emission wavelengths in the eye-safe range or at certain molecular absorption lines calls for appropriate SWIR detectors.

Fraunhofer IAF has recently developed SWIR detector modules, each comprising an avalanche photodiode (APD), a transimpedance amplifier (TIA), the bias supply and feedback circuit, and a thermo-electric cooler (TEC) with thermocouple, which stabilizes the operating temperature of the APD and of the operational amplifier of the TIA. The components are assembled into a TO-8 package.

Particularly for the LWIR, in which a variety of chemical finger prints are located, the configurable InAs/GaSb superlattice photodiodes of the Fraunhofer IAF are an affordable alternative to established CdHgTe detectors. While CdHgTe detectors suffer from low-frequency noise and responsitivities that are not linear to the IR intensity, InAs/GaSb superlattices are superior in that respect and offer comparable performance for other parameters. Individually tailored detector characteristics, geometries, and arrangements allow for customized IR detectors, including single-element detectors with optical apertures exceeding 1 mm, four-quadrant detectors, or even more sophisticated arrangements in one or two dimensions.

» The numerous degrees of freedom in the design of avalanche photodiodes open up a wide range of performance optimization for the individual application.«

Frank Rutz, group »Detector Measurement«.

The SWIR APD has been developed and fabricated in-house. InGaAs as photoabsorber material with a cut-off wavelength around 1.7 µm is well suited for many LIDAR applications. In combination with tailored InAlAs layers, it forms a heterostructure APD providing an internal signal gain factor of 300 close to the breakdown voltage of 23 V. The typical working point of the APD at moderate gain factors between 10 and 20 can be held steady at relatively low reverse bias voltage of approximately 20 V.

LWIR photodetectors for spectroscopy

Photonic integrated circuits, laser-based sensing plattforms as well as infrared and Raman spectrometers rely on highly-sensitive IR detectors as a core component of the system.

Visible-blind UV photodetectors

UV detectors based on the semiconductor materials AlGaN and InGaN display many promising properties; for example, the sensitive spectral region can be tuned by adjusting the composition. Standard UV photodiodes have been assembled into compact TO-18 devices and turned out to be very robust against high-intensity UV radiation. Moreover, Fraunhofer IAF is currently also developing highly sensitive UV APDs. Exploiting the avalanche effect to achieve an internal gain of the signal enables the operation in low-intensity applications, such as characterization of respirable dust, exhaust gas analysis, or missile approach warning systems. In summary, nitride-based UV detectors prove to provide both high sensitivity and radiation hardness at the same time.

3

2 *Scanning electron microscope image of a single and a four element InAs/GaSb superlattice detector for the LWIR.*
Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Einzel- und eines Vierquadranten-InAs/GaSb-Übergitterdetektors für das LWIR.
3 *Narrow-band UV detectors in TO-18 cans.*
Schmalbandige UV-Detektoren in TO-18-Gehäusen.

Durchbruchspannung von etwa 23 V. Der typische Arbeitspunkt dieser APD bei einem moderaten Gewinnfaktor von 10 bis 20 kann bei einer relativ geringen Rückwärtsspannung von 20 V stabil gehalten werden.

LWIR-Photodetektoren für die Spektroskopie

Für integriert-optische Schaltungen, Laser-basierte Sensor-Plattformen sowie Infrarot- und Raman-Spektrometer sind IR-Detektoren mit hoher Empfindlichkeit das Herzstück des Systems. Insbesondere für das LWIR, das eine Vielzahl der chemischen »Fingerabdruck«-Signaturen beinhaltet, stellen die einstellbaren InAs/GaSb-Übergitter-Photodioden des Fraunhofer IAF eine kostengünstige Alternative zu den etablierten Detektoren aus CdHgTe dar. CdHgTe-Detektoren sind anfällig für niederfrequentes Rauschen und eine Signalantwort, die sich nicht linear zur Strahlungsintensität verhält. InAs/GaSb-Übergitter sind diesbezüglich überlegen und bieten ansonsten vergleichbare Leistungswerte. Individuell zugeschnittene Detektoreigenschaften, -geometrien und -anordnungen ermöglichen kundenspezifische IR-Detektoren von Einzelbauelementen mit mehr als 1 mm optischer Apertur über Vier-Quadrant-Detektoren bis hin zu anspruchsvolleren Anordnungen in einer oder zwei Dimensionen.

Gegenüber sichtbarem Licht unempfindliche UV-Photodetektoren

UV-Detektoren, basierend auf dem AlGaN- und InGaN-Materialsystem, bieten vielversprechende Eigenschaften, wie beispielsweise das Einstellen des sensitiven Spektralbereichs über die Materialzusammensetzung. Standard-UV-Photodioden haben sich als robust gegenüber hohen Strahlungsintensitäten erwiesen und wurden bereits für verschiedene Anwendungen in kompakte TO-18-Gehäuse aufgebaut. Darüber hinaus entwickelt das Fraunhofer IAF gegenwärtig auch hochempfindliche UV-APDs. Der Avalanche-Effekt zur internen Signalverstärkung ermöglicht den Einsatz bei sehr geringen Intensitäten, wie sie zum Beispiel bei der Bestimmung von Feinstaub, der Abgasanalyse oder bei Raketenwarnsystemen auftreten. Es hat sich also gezeigt, dass sich aus dem AlGaN/InGaN-Materialsystem äußerst leistungsfähige und zugleich strahlungsresistente UV-Detektoren entwickeln lassen.

20 V
BIAS VOLTAGE /
ARBEITSSPANNUNG

Avalanche photodiode with gain factor of 10 at low bias voltage.
Avalanche-Photodiode mit einem Verstärkungsfaktor von 10 bei geringer Arbeitsspannung.