

Avalanche Photodioden

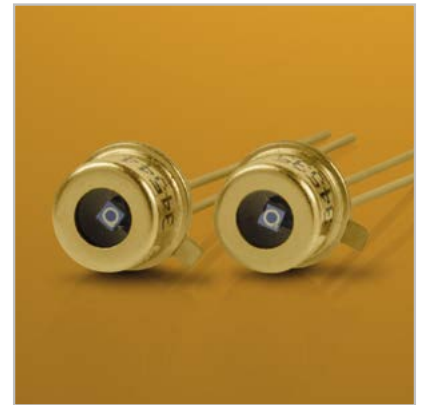
Das ist die perfekte Lawine

Bei der Messung geringster Lichtmengen, in Laserradarsystemen, der optischen Datenübertragung, Strichcodelesern oder in biomedizinischen Geräten sind Avalanche Photodioden (APDs) heutzutage nicht mehr wegzudenken.

Was ist eine APD?

„Avalanche“ heißt ins deutsche übersetzt „Lawine“. Dabei unterscheiden sich APDs von „normalen“ PIN-Photodioden darin, dass intern beim Einfall von Photonen eine Ladungslawine ausgelöst wird. Voraussetzung hierfür ist, dass an der APD eine Sperrspannung angelegt wird, um die Verarmungszone (absorption layer „A“) aufzuweiten.

Bei konventionellen Photodioden erzeugen einfallende Photonen Elektron-Loch Paare, auch als Ladungsträger bezeichnet, die einen messbaren Photostrom liefern. Die Energie der einfallenden Photonen ist also in elektrische Energie umgewandelt worden. APDs gehen hier einen kräftigen Schritt weiter. Das Bias-Potential ist viel höher als bei normalen Photodioden. In der APD werden die vom Licht freigesetzten Ladungsträger im elektrischen Feld derart beschleunigt, dass sie durch Stoßionisation weitere Elektron-Loch Paare erzeugen. Ist die Sperrspannung kleiner als die Durchbruchspannung, so 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 kann ausreichen, um einen stetigen Strom zu generieren, der von einer externen Elektronik gemessen werden kann.



Der erzeugte Strom errechnet sich dabei wie folgt:

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

wobei R_0 (A/W) die spektrale Empfindlichkeit der APD, M die interne Verstärkung und P_s (Watt) die einfallende Lichtleistung ist.

Dabei hängt die Verstärkung der APD von der angelegten Sperrspannung ab (s. Abb. 1).

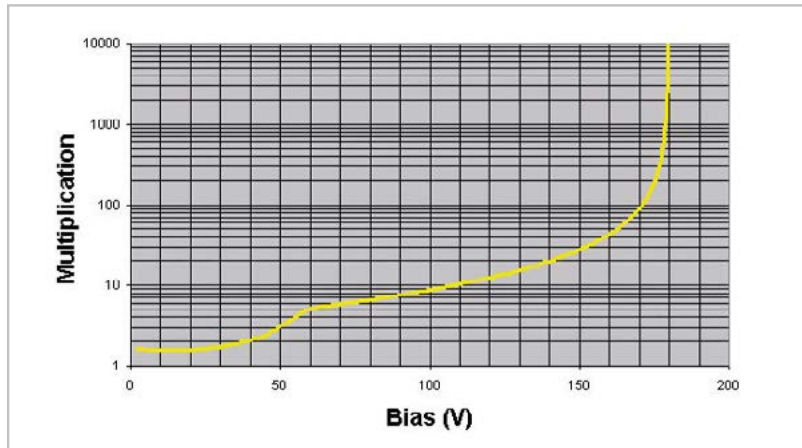


Abb. 1:
Typische Verstärkung vs. Betriebsspannung (0,5 mm APD)

Auswahl der richtigen APD

Der Einsatz von APDs wird generell empfohlen bei Anwendungen mit sehr großer Bandbreite oder bei denen interne Verstärkung benötigt wird, um das Rauschen des nachgeschalteten Verstärkers zu meistern. Bei der Auswahl müssen folgende Faktoren berücksichtigt werden:

Spektraler Arbeitsbereich:

APDs werden im Bereich von 300 nm bis 1700 nm angeboten. Silizium APDs sind je nach Struktur zwischen 300 nm und 1100 nm geeignet, Germanium zwischen 800 nm und 1600 nm, und InGaAs von 900 nm bis 1700 nm.

Silizium bietet das umfangreichste Lieferprogramm an APDs. Je nach Herstellungsprozess erreicht man unterschiedliche Parameter, die für die einzelnen Anwendungen Vorteile mit sich bringen. Eine Übersicht der wichtigsten Spezifikationen ist in Tabelle 1 zu finden.

Im Vergleich zu Germanium APDs haben InGaAs-APDs deutlich kleinere Rauscheigenschaften, bezogen auf die aktive Fläche eine höhere Bandbreite und Vorteile durch die angehobene Empfindlichkeit bis 1700 nm. Nachteil ist, dass InGaAs-APDs teurer sind als Ge-APDs. Germanium wird daher in erster Linie in preissensitiven Anwendungen eingesetzt oder in Systemen, die elektromagnetischer Störung ausgesetzt sind und bei denen der nachgeschaltete Verstärker ein deutlich größeres Rauschen hat.

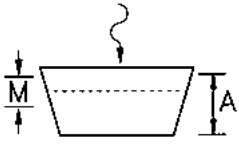
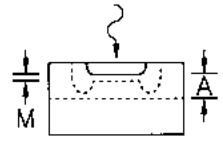
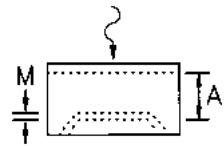
Silizium APD Typen	Beveled Edge	Epitaxial	Reach Through
Struktur			
"Absorption" Region	groß	gering	mittel bis groß
"Multiplication" Region	groß	gering	gering
Typische Größe (Durchmesser)	bis zu 16 mm	bis zu 5 mm	bis zu 5 mm
Verstärkung	50 bis 1000	1 bis 100	15 bis 300
„Excess noise“ Faktor	sehr gut ($k = 0.0015$)	gut ($k = 0.03$)	gut bis sehr gut ($k = 0.02$ bis 0.002)
Betriebsspannung	500 bis 2000 V	80 bis 300 V	150 bis 500 V
Anstiegszeit	langsam	schnell	schnell
Kapazität	klein	groß	klein
Blau Empfindlichkeit (400 nm)	gut	schlecht	schlecht
Rot Empfindlichkeit (650 nm)	gut	gut	gut
NIR Empfindlichkeit (905 nm)	sehr gut	gut	sehr gut

Tabelle 1: Übersicht der verschiedenen Si-APD-Strukturen und ihre Eigenschaften.

Detektorfläche:

Es liegt auf der Hand, dass kleinflächige APDs kostengünstiger sind als größere Detektoren, da pro Wafer mehr Chips gefertigt werden. Man sollte daher vorab bestimmen, welche minimale aktive Fläche man benötigt, um den optische Aufbau zu realisieren. Unter Umständen ist es aber günstiger eine etwas größere APD zu verwenden, da spezielle Optiken zur Fokussierung auf einen kleinen Spot teurer kommen können als der Aufpreis für eine größere APD.

Bandbreite und Rauschen:

Um das Leistungsvermögen einer APD mit einer PIN-Diode zu vergleichen, reicht es nicht aus, alleine das Rauschen der Detektoren zu vergleichen. Entscheidend ist das Signal-Rausch-Verhältnis des gesamten Systems. Bei PIN-Dioden muss also immer auch der zugehörige Vorverstärker in Betracht gezogen werden, dessen Rauscheigenschaften u.a. frequenzabhängig sind. Eine APD ist einer PIN-Diode immer dann überlegen, wenn die APD das Signallevel deutlich verstärken kann, ohne dabei das Gesamttrauschen des Systems signifikant zu erhöhen. So werden APDs dort bevorzugt, wo geringe Lichtintensitäten bei mittleren oder hohen Frequenzen detektiert werden. Dabei ist die interne Verstärkung optimal gewählt, wenn das Detektorrauschen ungefähr gleich dem Eingangrauschen des nachfolgenden Verstärkers (oder Lastwiderstandes) ist, so dass die APD das Systemrauschen nicht beeinträchtigt. Sowohl bei PIN-Dioden als auch bei APDs wächst das Rauschen mit der Bandbreite des Systems. Deswegen sollte sorgfältig geprüft werden, welche Möglichkeiten vorhanden sind um die Bandbreite zu reduzieren.

APD Anwendungen

Wie bereits erwähnt werden APDs dort eingesetzt, wo geringe Lichtintensitäten bei mittleren oder hohen Frequenzen detektiert werden. Zu den gängigsten Anwendungen gehören:

Laser Rangefinder:

Die meisten Abstandsmessungen gibt es in Kombination mit PulsLaserdioden oder cw-Laserdioden, freistrahrend (LIDAR) oder in der Faser (OTDR). Si-APDs werden verwendet, wenn auf der Senderseite z. B. 905 nm Pulse von einigen ns Breite detektiert werden sollen. OTDRs arbeiten bei 1300 oder 1550 nm und fordern daher InGaAs-APDs.

Hochgeschwindigkeits-Receiver:

Anstiegs- und Abfallzeiten von 300 ps bei einer Verstärkung von bis zu 100 machen die Detektoren zur ersten Wahl für den Einsatz in Hochgeschwindigkeitsempfängern – sei es in der Freiraum- und faseroptischen Datenübertragung oder in OTDR-Messsystemen.

Einzelphotonenzählung

Speziell selektierte Si-APDs können auch als Photonenzähler im „Geigermodus“ ($V_R > V_{BR}$) verwendet werden, wobei ein einzelnes Photoelektron einen Lawinenpuls von ca. 10^8 Ladungsträgern auslösen kann. Die Anwendungsfelder für diese APDs finden sich in der Biolumineszenz, Fluoreszenzspektroskopie und Astronomie.