

# **Halbleitertechnologie von A bis Z**

Optoelektronik & Photonik

|                                                                          |                 |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Photodioden &amp; Photodetektoren .....</b>                           | <b>3</b>        |
| <i><b>Funktionsprinzip: pn- und pin-Photodiode .....</b></i>             | <i><b>3</b></i> |
| <i><b>Kenngößen: Quantenausbeute und Responsivität .....</b></i>         | <i><b>3</b></i> |
| <i><b>Avalanche-Photodiode (APD) .....</b></i>                           | <i><b>4</b></i> |
| <i><b>Materialwahl je Wellenlängenbereich .....</b></i>                  | <i><b>5</b></i> |
| <i><b>Anwendungen: Glasfaserkommunikation und Bildsensorik .....</b></i> | <i><b>5</b></i> |

# Photodioden & Photodetektoren

---

## Funktionsprinzip: pn- und pin-Photodiode

Eine Photodiode kehrt das LED-Prinzip um: Statt Ladungsträger zu injizieren und Licht zu erzeugen, wird einfallendes Licht absorbiert und in einen elektrischen Strom umgewandelt. Trifft ein Photon mit ausreichender Energie ( $E \geq E_g$ ) auf den Halbleiter, wird ein Elektron aus dem Valenzband ins Leitungsband gehoben und erzeugt so ein Elektron-Loch-Paar. In der Raumladungszone eines in Sperrrichtung betriebenen pn-Übergangs trennt das dort vorhandene elektrische Feld dieses Paar sofort, bevor es rekombinieren kann – Elektron und Loch driften zu den jeweiligen Kontakten und erzeugen einen messbaren Photostrom, proportional zur einfallenden Lichtleistung.

In der einfachen pn-Diode ist die Raumladungszone jedoch sehr dünn (typisch  $< 1 \mu\text{m}$ ), sodass der Großteil des Lichts erst tiefer im feldfreien Bulk-Material absorbiert wird, wo erzeugte Ladungsträgerpaare durch langsame Diffusion statt schnelle Drift zu den Kontakten gelangen müssen – das begrenzt sowohl Empfindlichkeit als auch Schaltgeschwindigkeit. Die pin-Photodiode löst dieses Problem, indem zwischen p- und n-Schicht eine dicke, intrinsische (undotierte) i-Schicht eingefügt wird. Das elektrische Feld liegt dadurch über eine deutlich größere Distanz (oft  $10\text{--}50 \mu\text{m}$ ) an, praktisch das gesamte einfallende Licht wird im feldstarken Bereich absorbiert, und die Ladungsträger driften statt zu diffundieren – das erhöht die Quantenausbeute erheblich und ermöglicht Bandbreiten im Gigahertz-Bereich.

## Kenngößen: Quantenausbeute und Responsivität

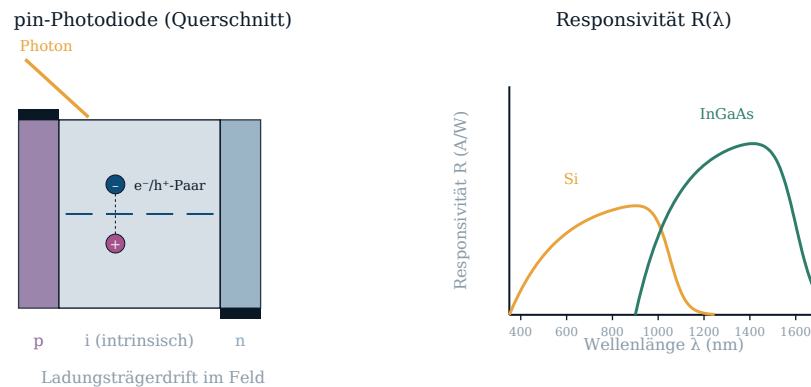
Zwei Größen beschreiben, wie effizient eine Photodiode Licht in Strom umsetzt. Die Quantenausbeute  $\eta$  gibt an, welcher Anteil der einfallenden Photonen tatsächlich ein detektierbares Elektron-Loch-Paar erzeugt (Werte nahe 1 bei gut designten Bauelementen). Die praktisch relevantere Größe ist die Responsivität  $R = I_{ph}/P_{opt}$  in A/W, die den erzeugten Photostrom direkt zur eingestrahnten optischen Leistung ins Verhältnis setzt:  $R = \eta \cdot e/(h \cdot f) = \eta \cdot \lambda/1240 \text{ nm}$  (mit  $R$  in A/W und  $\lambda$  in nm). Eine Silicium-Photodiode erreicht bei 850 nm typischerweise  $R \approx 0,5\text{--}0,6 \text{ A/W}$ , eine InGaAs-Photodiode bei 1550 nm etwa  $R \approx 0,9\text{--}1,0 \text{ A/W}$ .

Die Responsivität ist wellenlängenabhängig und fällt oberhalb einer materialspezifischen Grenzwellenlänge (bestimmt durch die Bandlücke,  $\lambda_g \approx 1240 \text{ nm}/E_g$ ) steil ab, da Photonen unterhalb der Bandlückenenergie nicht mehr absorbiert werden können. Zu kurzen Wellenlängen hin sinkt die Responsivität ebenfalls, da hochenergetische Photonen bereits sehr oberflächennah absorbiert

werden, wo Oberflächenrekombination einen Teil der erzeugten Ladungsträger vor der Trennung wieder vernichtet. Jedes Material hat daher ein charakteristisches Responsivitätsfenster, das die nutzbare Detektionsbandbreite definiert.

#### pin-Photodiode und spektrale Responsivität

Aufbau der pin-Photodiode und materialabhängige Empfindlichkeit über der Wellenlänge



In der i-Schicht liegt das elektrische Feld über die gesamte Dicke an – Ladungsträger driften statt zu diffundieren, das erhöht Ausbeute und Bandbreite.

## Avalanche-Photodiode (APD)

Für Anwendungen mit sehr schwachen Lichtsignalen – etwa Langstrecken-Glasfaserempfänger oder Einzelphotonendetektion – reicht die Empfindlichkeit einer einfachen pin-Photodiode oft nicht aus, da das erzeugte Signal im elektronischen Rauschen der nachfolgenden Verstärkerstufe untergeht. Die Avalanche-Photodiode (APD) löst dieses Problem durch interne Verstärkung: Sie wird mit einer deutlich höheren Sperrspannung betrieben (typisch 20–200 V, materialabhängig), wodurch in einem hochfeldigen Multiplikationsbereich der Photodiode ein sehr starkes elektrisches Feld entsteht.

Photogenerierte Ladungsträger werden in diesem Feld so stark beschleunigt, dass sie beim Stoß mit Gitteratomen genug Energie besitzen, um durch Stoßionisation weitere Elektron-Loch-Paare zu erzeugen – diese wiederum werden beschleunigt und erzeugen ihrerseits neue Paare. Der resultierende Lawineneffekt (daher "Avalanche") liefert einen internen Multiplikationsfaktor  $M$  von typischerweise 10 bis über 100, bevor das Signal überhaupt den externen Verstärker erreicht. Der Multiplikationsfaktor lässt sich über die angelegte Sperrspannung fein einstellen, muss aber sorgfältig gegen zusätzliches Multiplikationsrauschen (Excess Noise, durch die statistische Natur des Lawinenprozesses) abgewogen werden – ein zu hoher Verstärkungsfaktor

verschlechtert das Signal-Rausch-Verhältnis wieder, statt es zu verbessern.

## Materialwahl je Wellenlängenbereich

Wie bei LED und Laserdiode bestimmt die Bandlücke, welches Material für welchen Spektralbereich geeignet ist – allerdings mit einer wichtigen Umkehrung der Logik: Für die Absorption ist keine direkte Bandlücke zwingend erforderlich, da anders als bei der strahlenden Rekombination kein Photon emittiert werden muss. Silicium (indirekte Bandlücke,  $E_g \approx 1,12$  eV) ist deshalb trotz seiner Ungeeignetheit als Lichtquelle ein exzellenter, kostengünstiger Photodetektor im sichtbaren und nahen Infrarot bis etwa 1000–1100 nm – der Wellenlängenbereich, den auch CMOS-Bildsensoren in Digitalkameras und Smartphones nutzen.

Für Telekommunikationswellenlängen (1,3  $\mu\text{m}$  und 1,55  $\mu\text{m}$ ), oberhalb der Grenzwellenlänge von Silicium, kommt  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  (gitterangepasst auf InP-Substrat) zum Einsatz – dasselbe Materialsystem, das auch bei den zugehörigen DFB-Laserdioden verwendet wird, was Sender und Empfänger einer Glasfaserstrecke materialtechnisch eng verwandt macht. Germanium deckt einen ähnlichen Infrarotbereich ab und gewinnt durch seine CMOS-Kompatibilität an Bedeutung für monolithisch integrierte Silicium-Photonik-Schaltkreise. Für UV- und tiefblaue Detektion kommen breitbandige Materialien wie GaN oder SiC zum Einsatz, deren große Bandlücke sichtbares und infrarotes Licht praktisch transparent durchlässt und damit eine intrinsische Blindheit gegenüber Störlicht bietet – vorteilhaft etwa bei UV-Flammendetektoren.

## Anwendungen: Glasfaserkommunikation und Bildsensorik

Die wirtschaftlich bedeutendste Anwendung von Photodioden ist der Empfänger in der Glasfaserkommunikation: Am Ende jeder Glasfaserstrecke wandelt eine InGaAs-pin- oder -APD-Photodiode das optische Signal zurück in ein elektrisches, das dann elektronisch weiterverarbeitet wird – die Empfängerempfindlichkeit (minimale detektierbare optische Leistung bei gegebener Bitfehlerrate) ist dabei neben der Senderleistung die zentrale Kenngröße, die die maximale Reichweite eines Glasfasersystems ohne Zwischenverstärkung bestimmt.

Die zweite große Anwendungsdomäne ist die Bildsensorik: CMOS-Bildsensoren in Kameras nutzen Millionen einzelner Silicium-Photodioden (Pixel), jede mit vorgeschalteten Farbfiltern (Bayer-Muster aus Rot-, Grün- und Blaufiltern) für die Farbauflösung, kombiniert mit integrierter Ausleseelektronik direkt am Pixel. Photodioden dienen darüber hinaus als einfache Lichtsensoren in unzähligen Alltagsanwendungen – automatische Bildschirmhelligkeit,

Belichtungsmessung, Rauchmelder – sowie als Grundlage der Photovoltaik, wo dieselbe pn-Übergangsphysik statt für Signaldetektion für die großflächige Energiegewinnung genutzt wird, allerdings ohne Sperrspannung und mit auf Leistungsausbeute statt Geschwindigkeit optimierter Geometrie.