



Sami Gasnjani

**Untersuchung von Photodioden für hohe Datenraten in optischen
Empfängerschaltungen**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik-Wirtschaft

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dr. Erich Leitgeb

Institut für Hochfrequenztechnik

Graz, April 2015

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden die charakteristischen Eigenschaften von verschiedenen Photodioden und die Möglichkeiten deren Anwendungen untersucht. Zunächst werden die wichtigsten Teile eines optischen Übertragungssystems vorgestellt. Im Prinzip besteht ein optisches Übertragungssystem aus einem Sender, der das elektrische Signal in ein optisches Signal umwandeln muss, wofür hauptsächlich Laserdioden verwendet werden. Danach wird das Übertragungsmedium, durch welches das Signal übermittelt wird, betrachtet, wobei sowohl Lichtwellenleiter also auch der Freiraum (Luft) genutzt werden können. Um das optische Signal wieder in die elektrische Domäne umwandeln zu können, benötigt man am Empfangsort des optischen Übertragungssystems einen optischen Detektor. Die am häufigsten verwendeten optischen Empfänger sind Photodioden.

Im folgenden Kapitel werden die Eigenschaften und die Charakteristik verschiedener Photodiodentypen (PIN, APD, MSM) analysiert. Hierbei werden vor allem die Aufbauformen und Materialien, sowie die wichtigsten Parameter von Photodioden untersucht. Es wird im Detail auf die Empfindlichkeit, die Kapazität und das Frequenzverhalten eingegangen. Zu einem der wichtigsten Merkmale der Photodiode gehört das Rauschen. Beim Betrieb der Photodioden muss man verschiedene Rauschquellen, wie z.B. das thermische Rauschen oder Schrotrauschen berücksichtigen und analysieren.

Zum besseren Verständnis der Funktionsweise verschiedener Photodiodentypen werden in einem eigenem Kapitel die unterschiedlichen Photodioden von diversen Herstellern untersucht und evaluiert. Dabei werden die wichtigsten Parameter und die relevanten Eigenschaften verglichen und eine Empfehlung zur Auswahl der Photodiode für die Anwendung in optischen Übertragungssystemen gegeben. Nach den abschließenden Betrachtungen zum Einsatz von Photodioden für hohe Datenraten in der modernen Kommunikationstechnik werden im Anhang die Datenblätter der wichtigsten untersuchten Empfängerbauelemente dargestellt.

Abstract

Throughout this Thesis, characteristic properties of different photodiodes and their potential for application have been examined. In the continuation the most important parts of optical transmission system will be outlined. In principle, one optical transmission system is consisted out of transmitter that must convert electrical signal into the optical, for which mainly laser diodes are used. After that the transmitting channel, through which the signal is transmitted, is mostly made out of optics fiber or the free space (air). In order to transform the optical signal into the electrical, at the point of optical receiving system there needs to be an optical decoder. The most used optical receivers are photodiodes.

In the next chapter the properties and characteristics of different types of photodiodes (PIN, APD, MSM) have been examined. Different structural forms and materials have been examined foremost, as were the most important parameters of photodiodes. Sensitivity details, capacity and frequencies have been detailed. One of the most important properties of photodiodes is the noise. During the application of photo diodes different noises must be analyzed and taken into the account, such as thermal noise or shot-noise.

For a better understanding of functions of different types of photodiodes in the separate chapter different photodiodes from different manufacturers have been compared. The most important parameters and relevant properties have been compared and the recommendation for which photodiodes to be used in the optical transmission systems have been made. After the conclusion remarks about applications of photodiodes in a high data bandwidth transfers in modern communication systems, the most important receiving elements in Appendix the Datasheets have been presented.

Inhaltverzeichnis

Inhaltverzeichnis	ii
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele der Arbeit	1
1.3 Gliederung der Arbeit	2
2 Optische Übertragungssysteme	3
2.1 Prinzip des optischen Übertragungssystems	3
2.2 Historische Entwicklung	4
2.3 Vor- und Nachteile	4
2.4 Übertragungsmedium	5
2.4.1 Aufbau	5
2.4.2 Prinzip der Lichtführung	6
2.4.3 Typen der Wellenleiter	7
2.4.3.1 Stufenindexfaser	8
2.4.3.2 Gradientenindexfaser	8
2.4.3.3 Monomodefaser	9
2.4.4 Dispersion	9
2.4.5 Verluste, Dämpfung	10
2.5 Optische Sender	11
2.5.1 Aufbau und Eigenschaften	11
2.5.2 Rekombination	13
2.5.2.1 Stimulierte Absorption	13
2.5.2.2 Stimulierte Emission	14
2.5.2.3 Spontane Emission	15
2.6 Optische Empfänger	16
3 Photodioden	17
3.1 Aufbau und Eigenschaften	17
3.2 Materialien	19
3.3 Typen von Empfangsdioden	20
3.3.1 PIN-Photodiode	21
3.3.2 Lawinen-Photodiode	22

3.3.3	MSM-Photodiode	26
3.4	Empfindlichkeit	27
3.5	Kapazität	28
3.6	Frequenzverhalten	29
4	Rauschen	31
4.1	Rauschen in Empfängern	31
4.1.1	Thermisches Rauschen	33
4.1.2	Schrotrauschen	34
4.2	Signal-Rausch-Verhältnis von Photodioden	35
4.3	Minimal detektierbare Leistung	36
4.4	Multiplikationsrauschen	37
4.5	Bitfehlerwahrscheinlichkeit	37
5	Auswahl von Photodioden	39
5.1	Pin-Photodioden	39
5.1.1	BPW 34 S (Osram)	39
5.1.2	PD 15-21B (Everlight)	43
5.1.3	BPV 23 NF (Vishay)	46
5.1.4	QSE773 (Fairchild)	49
5.2	Lawinen Photodioden	52
5.2.1	InGaAs APD-G8931-20 (Hamamatsu)	52
5.2.2	SAE 500 NX (Laser Components)	55
5.2.3	SPM1-T (Newport)	57
5.2.4	DSC-R402 (Discovery Semiconductors,Inc.)	59
5.2.5	InGaAs APD-7510 (Analog Modules,Inc.)	61
5.3	MSM-G4276-03 (Hamamatsu)	63
5.4	Vergleich der Eigenschaften von Photodioden	65
6	Schlussfolgerungen	67
	Literaturverzeichnis	69
	Anhang	71

Abbildungsverzeichnis

2.1:	Prinzip des optisches Übertragungssystems	3
2.2:	Aufbau einer Glasfaser	5
2.3:	Einfallswinkel größer als Brechungswinkel	6
2.4:	Einfallswinkel kleiner als Brechungswinkel	7
2.5:	Stufenindexfaser	8
2.6:	Gradientenindexfaser	9
2.7:	Monomodefaser	9
2.8:	Dispersion	10
2.9:	Krümmungsverluste	11
2.10:	Schematische Darstellung der Laserdiode	12
2.11:	Symbol und Rückkopplungsprinzip der Laserdiode	12
2.12:	Spontane Emission	14
2.13:	Stimulierte Emission	15
2.14:	Absorption	15
3.1:	Symbol und schematischer Aufbau der Photodiode	17
3.2:	Kennlinien einer Photodiode	18
3.3:	Ersatzschaltbild der Photodiode	19
3.4:	a) Aufbau und b) Bandverlauf der pn-Photodiode	21
3.5:	Querschnitt einer p-i-n-Photodiode	21
3.6:	Querschnitt einer Si-APD	22
3.7:	a)Aufbau und b)Verlauf der elektrischen Feldstärke eines Lawinenphotodiode...	23
3.8:	Schematische Darstellung des Multiplikationsprozesses in einer APD	23
3.9:	Verstärkung der Lawinendiode	25
3.10:	Querschnitt einer einfachen Struktur der MSM-Photodiode	26
3.11:	Prinzipielle Fingerstruktur einer MSM-Photodiode	27
3.12:	Empfindlichkeit einer Si-Photodiode in idealen und Typischen Fall	28
3.13:	Kapazität einer Photodiode	29
4.1:	Zusammenhang zwischen Lichtleistung und Photostrom	31
4.2:	Schematische Darstellung des photoelektrischer Effekts	33
4.3:	Rauschersatzschaltbild eines Widerstands	34
4.4:	Rauschersatzschaltbild einer Stromquelle	35
4.5:	Abhängigkeit der erforderlichen Lichtleistung von der Signalbandbreite	36
4.6:	Zusammenhang zwischen BER und SNR	38

5.1: BPW 34 S Photodiode	39
5.2: Relative Empfindlichkeit	41
5.3: Photostrom / Leerlaufspannung	41
5.4: Verlustleistung	42
5.5: Dunkelstrom	42
5.6: Kapazität	42
5.7: PD15-21B/TR8 Photodiode	43
5.8: Verlustleistung	45
5.9: Spektrale Empfindlichkeit	45
5.10: Dunkelstrom	45
5.11: Kapazität	45
5.12: BPV23NF Photodiode	46
5.13: Dunkelstrom	48
5.14: Photostrom	48
5.15: Empfindlichkeit	48
5.16: Kapazität	48
5.17: QSE773-PIN-Photodiode	49
5.18: Empfindlichkeit	51
5.19: Dunkelstrom	51
5.20: Kurzschlussstrom	51
5.21: Kapazität	51
5.22: G8931-20 Lawinen-Photodiode	52
5.23: Empfindlichkeit	54
5.24: Dunkelstrom, Photostrom	54
5.25: Kapazität	54
5.26: SAE500NX Lawinen-Photodiode	55
5.27: SPM1-T Lawinen Photodiode	57
5.28: DSC-R402 Lawinen-Photodiode	59
5.29: 7510-Lawinen Photodiode	61
5.30: G4176-MSM-Photodiode	63
5.31: Optischer Impulsantwort	65
5.32: Empfindlichkeit	65

Tabellenverzeichnis

5.1:	Elektro/optische Eigenschaften der BPW 34 S PIN-Photodiode	40
5.2:	Grenzwerte der BPW 34 S PIN-Photodiode	41
5.3:	Grenzwerte der PD15-21B/TR8 PIN-Photodiode	43
5.4:	Elektro/optische Eigenschaften der PD15-21B/TR PIN-Photodiode	44
5.5:	Grenzwerte der BPV23NF PIN-Photodiode	47
5.6:	Elektro/optische Eigenschaften der BPV23NF PIN-Photodiode	47
5.7:	Grenzwerte der QSE773 PIN-Photodiode	50
5.8:	Elektro/optische Eigenschaften der QSE773 PIN-Photodiode	50
5.9:	Grenzwerte der G8931-20 APD-Photodiode	53
5.10:	Elektro/optische Eigenschaften der G8931-20 APD-Photodiode	53
5.11:	Grenzwerte der SAE500NX APD-Photodiode	56
5.12:	Elektro/optische Eigenschaften der SAE500NX APD-Photodiode	56
5.13:	Grenzwerte der SPM1-T APD-Photodiode	58
5.14:	Elektro/optische Eigenschaften der SPM1-T APD-Photodiode	58
5.15:	Grenzwerte der DSC-R402 APD-Photodiode	60
5.16:	Elektro/optische Eigenschaften der DSC-R402 APD-Photodiode	60
5.17:	Grenzwerte der 7510 APD-Photodiode	62
5.18:	Elektro/optische Eigenschaften der 7510 APD-Photodiode	62
5.19:	Grenzwerte der G4176 MSM-Photodiode	64
5.20:	Elektro/optische Eigenschaften der G4176 MSM-Photodiode	64
5.21:	Vergleich der Eigenschaften von Photodioden	66
5.22:	Parametervergleich	66

1 Einleitung

In Zeiten, wo immer mehr Daten produziert, übertragen und gespeichert werden, sind Kommunikationstechnologien für höchste Datenraten ein Hauptbestandteil unseres Lebens geworden. Vor allem die Nutzung von Internet (inklusive sozialer Netzwerke) treibt dabei die notwendige Übertragungskapazität immer weiter nach oben. Dabei kommt der optischen Nachrichtentechnik eine wesentliche Rolle zu, da durch die hohe Trägerfrequenz (im THz-Bereich) eine große nutzbare Bandbreite verfügbar ist, weshalb Übertragungsraten von 10 und 100Gbit/s zum Standard gehören.

1.1 Motivation

Stetig steigende Anforderungen in Kommunikations- und Informationstechnik verlangen hochqualitative optische Komponenten, die in der Lage sind große Datenmengen mit hoher Qualität über größere Entfernungen sicher und verlustfrei zu übertragen. Deswegen müssen auch schnelle Empfängerschaltungen für hohe Datenraten eingesetzt werden.

Besondere Anforderungen an das Empfängermodul sind die hohe Bandbreite, die hohe Empfindlichkeit sowie ein niedriges Rauschen. Hierbei kommen verschiedene Photodioden zum Einsatz, die unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Die Avalanche-Photodioden sind zwar sehr empfindliche Empfänger aber haben dafür eine geringe Bandbreite. Sie weisen auch eine hohe Betriebsspannung und ein niedriges Signalrauschverhältnis auf. Die p-i-n- und MSM(Metall-Halbleiter-Metall)-Photodioden benötigen hingegen nur eine kleine Betriebsspannung und verfügen über eine sehr hohe Bandbreite.

1.2 Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit soll untersucht werden, welche Photodioden die besten Eigenschaften für den Empfang von hohen Datenraten in optischen Empfängerschaltungen besitzen. Der Schwerpunkt liegt auf die drei wichtigsten Photodioden Typen (p-i-n-, Avalanche- und MSM-Photodioden) und auf deren Eigenschaften. Dazu werden die bekannten theoretischen Zusammenhänge vorgestellt.

1.3 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit ist in fünf Kapiteln gegliedert. Nach der Einleitung in Kapitel 2 werden Übertragungskonzepte erläutert und die für optische Übertragungssysteme notwendigen Komponenten vorgestellt sowie deren Eigenschaften diskutiert. In Kapitel 3 wurde ein theoretischer Vergleich zwischen verschiedenen Typen von Photodioden angestellt. Das Kapitel enthält außerdem eine Übersicht über Bauformen, Materialien und Eigenschaften von Photodioden. Im gleichen Kapitel wird zusätzlich die Empfindlichkeit, Grenzfrequenz und Kapazität von Photodioden beschrieben. In Kapitel 4 wurde über das Rauschverhältnis diskutiert. Anschließend wird eine Auswahl von Photodioden für hohe Datenraten in Kapitel 5 dargeboten.

2 Optische Übertragungssysteme

In einem optischen Übertragungssystem werden die Informationen in der optischen Domäne gesendet, übertragen und empfangen, d.h. die so vermittelten Daten wären auch optisch verarbeitbar.

2.1 Prinzip des optischen Übertragungssystems

Am Eingang und Ausgang des Systems liegt ein elektrisches Signal an, wobei es am Eingang eingekoppelt und am Ausgang ausgekoppelt wird. Ein optisches Signal breitet sich vom Sender zum Empfänger aus. Das Prinzip des optischen Übertragungssystems wird in Abbildung 2.1 dargestellt:

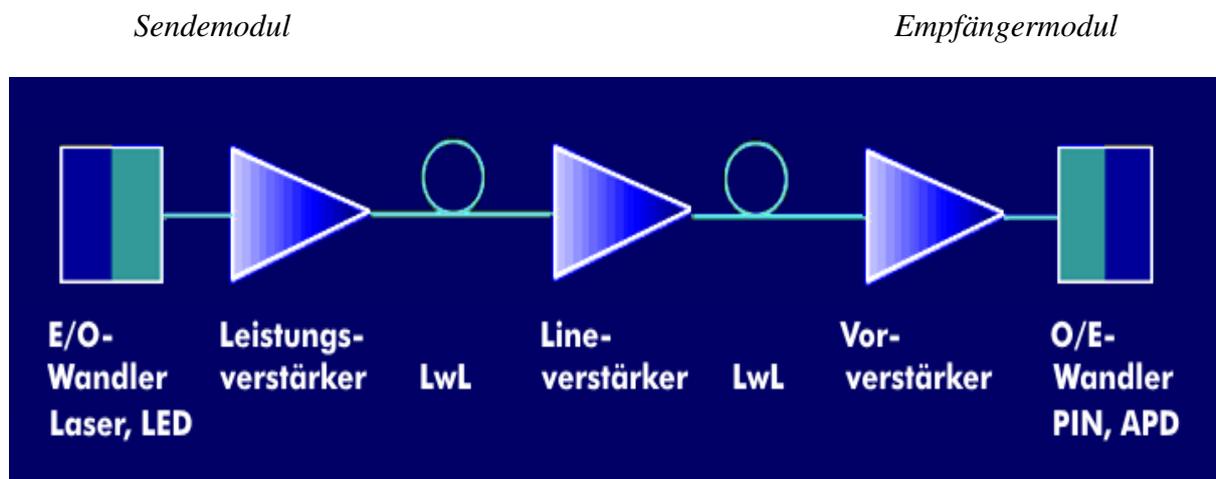


Abb. 2.1: Prinzip des optischen Übertragungssystems [27]

Mit Hilfe vom Sender wird aus einem elektrischen Signal ein optisches Signal erzeugt. Dieses Signal wird dann über das optische Übertragungsmedium, meist eine Glasfaser, gesendet. Mit einem Empfänger wird das optische Signal wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt. Falls nötig wird das Signal über einen Verstärker intensiviert [14].

2.2 Historische Entwicklung

Die Überlegungen, wie man Daten von einem Ort zu einem anderen übermitteln könnte, gab es schon sehr früh in der Geschichte.

Im Jahre 1870 hat John Tyndall demonstriert, wie sich Licht durch einen Wasserstrahl führen lässt. Die Nutzung der optischen Übertragungssysteme im heutigen Sinn hat mit der Realisierung vom Laser im Jahr 1960 (Maiman, Rubinlaser), des Halbleiterlasers im Jahr 1963 und ein paar Jahre später mit dem ersten optischen Wellenleiter begonnen.

Die ersten Wellenleiter haben die Problematik gehabt, dass sie einen sehr großen Dämpfungswert hatten, der rund 1000 dB/km betrug.

Im Jahre 1966 haben Charles Kuen Kao und Georges Hockham festgestellt, dass die Verluste im Wellenleiter durch die Unreinheit im Glas verursacht wurde und durch deren Vermeidung eine viel geringere Dämpfung von wenig als 20 dB/km erzielt werden kann [1]. In den drauf folgenden Jahren wurde sowohl die Leistung von Lichtwellenleiter als auch die Leistung von Sendern und Empfängern deutlich verbessert.

2.3 Vor- und Nachteile

Die optischen Übertragungssysteme weisen gegenüber den elektrischen Übertragungssystemen entscheidende Vorteile auf. Diese sind die erheblich höheren Übertragungsraten, sowie geringere Verluste. Weitere Vorteile sind:

- Glasfaser sind leichter, flexibler und kleiner als Kupferkabel
- Keine Beeinflussung durch elektrische und magnetische Felder
- Hohen Übertragungreichweiten
- Material für Wellenleiter unbegrenzt verfügbar
- Keine Potentialübertragung

Der erhebliche Nachteil von optischen Übertragungssystemen liegt in den hohen Installationskosten. Weitere Nachteile sind:

- Empfindliche Kabel
- Keine Energieübertragung (notwendig für Verstärker etc.)

2.4 Übertragungsmedium

Die Daten werden vom Sender zum Empfänger durch ein Übertragungsmedium übertragen.

2.4.1 Aufbau

In der optischen Nachrichtenübertragungstechnik können als Übertragungsmedium Wellenleiter oder Freiraum (Luft) genutzt werden. Die meisten verwendeten Wellenleiter sind Glasfaser. Materialien zur Herstellung von Glasfasern sind:

- Mineralglas (Kieselglas, Quarzglas)
- Kunststoff

Glasfaser, die von Mineralglas also aus Quarzglas hergestellt sind, weisen eine hohe Qualität auf und haben eine geringe Dämpfung. Hingegen verfügen Glasfasern, die aus Kunststoff hergestellt sind, über eine große Dämpfung, jedoch sind sie viel billiger herzustellen. Eine Glasfaser besteht grundsätzlich aus drei Komponenten:

- Kern
- Mantel
- Schutzbeschichtung

Das Lichtsignal wird innerhalb des Kerns übertragen, der eine höhere Brechzahl als den umgebenden Mantel besitzt. Sowohl der Kern als auch der Mantel besteht aus Kunststoff oder Quarzglas. Jedoch wird durch Dotierung des Kerns oder Mantels ein geringerer Brechindex des Mantels im Vergleich zum Kern realisiert. Das ist wichtig, da so der Mantel mit dem geringeren Brechindex eine Totalreflexion bewirkt. Die Schutzbeschichtung besteht ausschließlich aus Kunststoff und hat gegenüber dem Mantel und dem Kern eine höhere Brechzahl. Ihre Hauptfunktion ist der Schutz der Glasfaser vor äußeren Einflüssen. In Abbildung 2.2 ist zu sehen, wie eine Glasfaser aussieht.

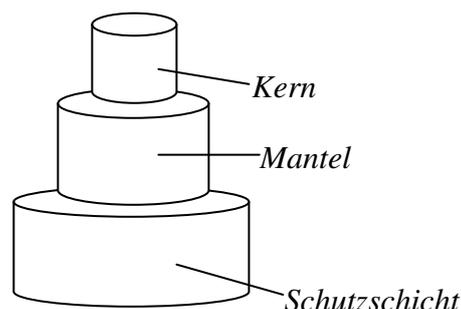


Abb. 2.2: Aufbau einer Glasfaser

2.4.2 Prinzip der Lichtführung

Wenn ein Lichtstrahl von einem Medium in ein anderes übertritt, dann wird der Strahl an der Grenzfläche der beiden Medien gebrochen.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{1,2} \quad (2.1)$$

$n_{1,2}$... Brechzahl der Medien (Materialkonstante)

α ... Einfallswinkel

β ... Brechungswinkel

Man unterscheidet hierbei zwei Fälle:

1) Der **Einfallswinkel ist größer als der Brechungswinkel.**

$$\sin \alpha > \sin \beta$$

Beim Übergang von einem optisch dünnen zu einem optisch dichten Medium wird ein Lichtstrahl zum Einfallslot hin gebrochen.

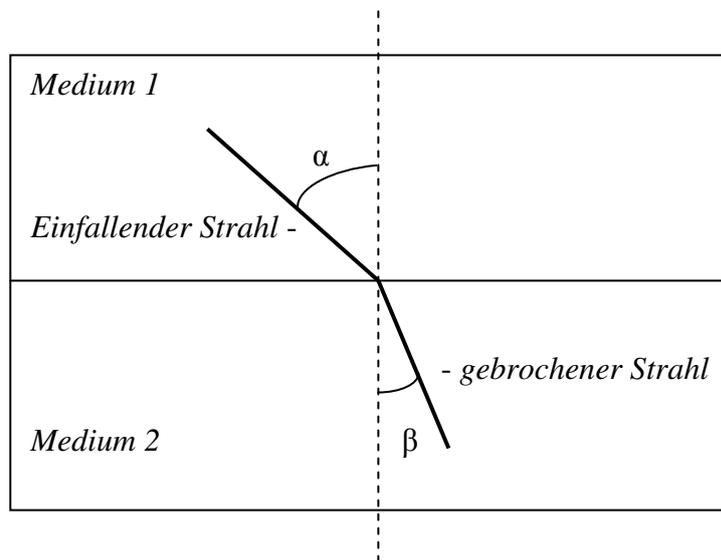


Abb. 2.3: Einfallswinkel größer als Brechungswinkel

2) Der **Einfallswinkel ist kleiner als der Brechungswinkel.**

$$\sin \alpha < \sin \beta$$

Beim Übergang von einem optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres Medium, wird ein Lichtstrahl vom Einfallslot weg gebrochen.

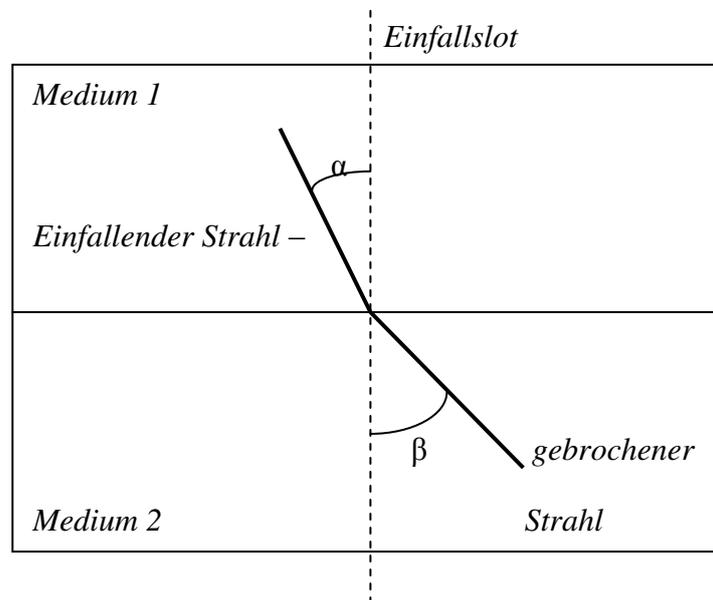


Abb. 2.4: Einfallswinkel kleiner als Brechungswinkel

Der einfallende Strahl, das Einfallslot und der gebrochene Strahl (bzw. reflektierte Strahl) liegen immer in einer Ebene. Diese Ebene, die von der Einfallsrichtung und dem Lot aufgespannt wird, bezeichnet man als Einfallsebene.

Beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium ist der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel. Wenn man den Einfallswinkel gegenüber dem Grenzwinkel vergrößert und der Einfallswinkel einen bestimmten Wert übersteigt ($\sin\beta = \frac{n_1}{n_2} \sin\alpha > 1$) dann wird das Licht nicht mehr gebrochen, sondern reflektiert. Man spricht in diesem Fall von einer Totalreflexion und der Grenzwinkel der Totalreflexion beträgt $\sin\beta_g = \frac{n_1}{n_2}$. Die Brechzahl des Kerns muss größer als die Brechzahl des Mantels sein, um eine Lichtwelle in einem Wellenleiter mithilfe der Totalreflexion führen zu können.

2.4.3 Typen von Wellenleitern

Die am meisten verwendeten Wellenleiter sind Glasfasern. Die Glasfasern kann man wie folgt unterscheiden:

- Multimodefaser (Stufenindexfaser, Gradientenindexfaser)
- Monomodefaser

Die Entwicklung der Glasfasertechnik ist sehr wichtig zur Übertragung der Daten für weite Strecken. Heutzutage ist es möglich Daten bis zu 10 – 120 km ohne Verstärker und über 1000 km mit Verstärker zu übertragen. Selbstverständlich spielt neben den Glasfasern auch die Wahl von Sendern bzw. Empfängern für hohe Datenraten eine wichtige Rolle.

Die Übertragungskapazität von Glasfasern wächst von Jahr zu Jahr. Es ist heute möglich bis zu 10 Gbit/s zu übertragen.

2.4.3.1 Stufenindexfaser

Bei der Stufenindexfaser hat der Kern eine höhere Brechzahl als der Mantel, ist aber dabei über den Radius konstant. Der Lichtstrahl bewegt sich durch die Totalreflexion vorwärts, wenn er innerhalb des Aperturkegels eingekoppelt wird. Dieser Fasertyp ist nicht für größere Entfernungen geeignet, weil bei ihm die übertragbare Bandbreite beschränkt ist. Ein Vorteil von der Stufenindexfaser sind jedoch die niedrigen Herstellungskosten.

In Abbildung 2.5 ist einer Stufenindexfaser aufgezeigt.

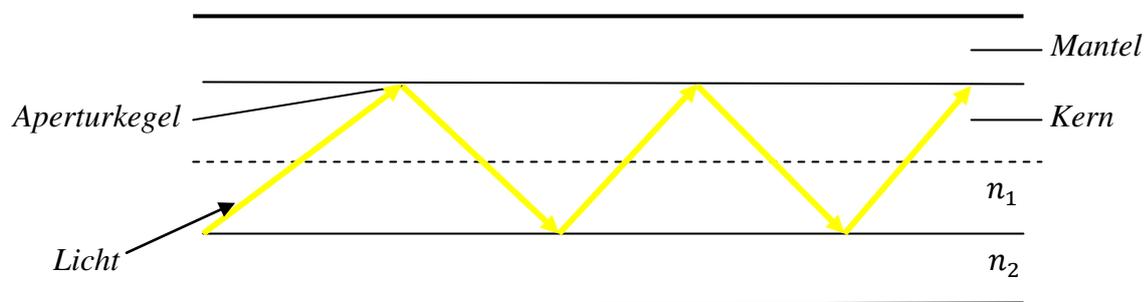


Abb. 2.5: Lichtausbreitung in einer Stufenindexfaser

2.4.3.2 Gradientenindexfaser

Bei den Gradientenindexfasern wird der Brechungsindex des Kerns nach außen immer größer. Der Mantel besitzt einen festen Brechungsindex. Hierbei wird das Licht Stufenweise gebrochen, wodurch eine wellenförmige Linie, anstelle einer Zickzacklinie wie beim Stufenprofil entsteht.

Mit der Gradientenindexfaser können deutlich größere Entfernungen realisiert werden. In Abbildung 2.6 ist einer Gradientenindexfaser schematisch dargestellt.



Abb. 2.6: Lichtausbreitung in einer Gradientenindexfaser

2.4.3.3 Monomodefaser

Bei der Monomodefaser hat der Kern einen sehr kleinen Durchmesser, der normalerweise 9 μm beträgt. Das führt zur Ausbreitung von einer Mode der Wellenlänge und hat einen geringen Dämpfungswert. Gegenüber anderen Fasertypen sind die Herstellungsverfahren komplizierter. In Abbildung 2.7 ist eine Monomodefaser dargestellt.

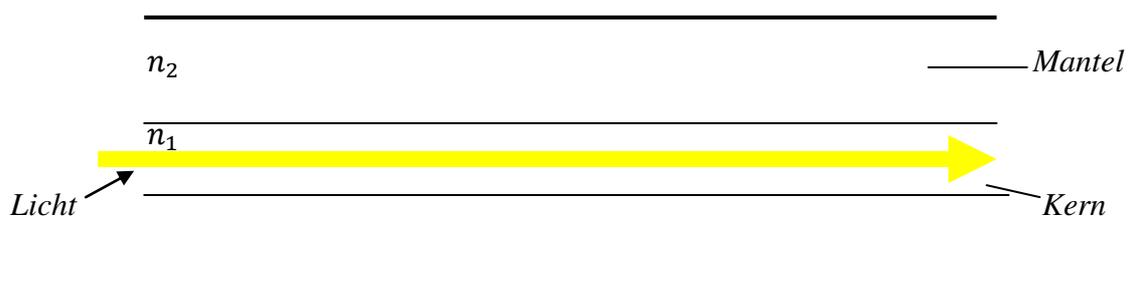


Abb. 2.7: Lichtausbreitung in einer Monomodefaser

2.4.4 Dispersion

Unter Dispersion versteht man ein Effekt, bei der es zur einen Impulsverbreiterung beim Transport durch Fasern kommt. Der am Fasernende austretende Impuls hat eine größere Halbwertbreite als der am Fasernanfang eintretende Impuls.

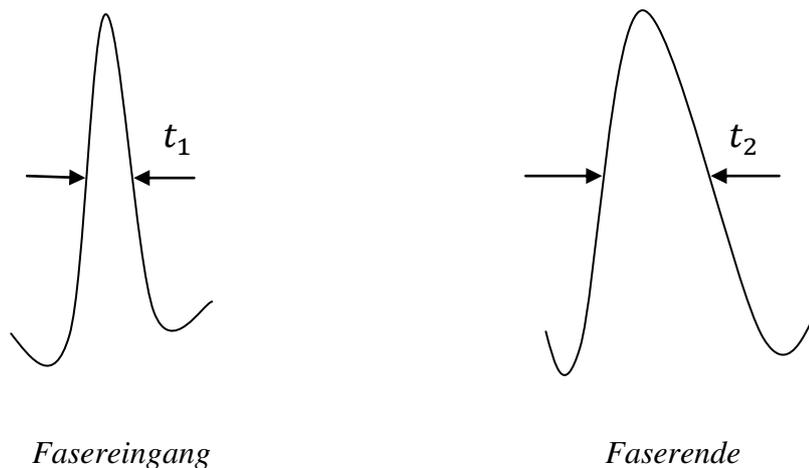


Abb. 2.8: Dispersion

Man unterscheidet zwischen Modendispersion und chromatische Dispersion. Es gibt auch die Polarisationsmodendispersion, die bei sehr schnellen Übertragungssystemen hinzukommt. Natürlich gelten nicht für alle Fasertypen auch die gleichen Auswirkungsarten von Dispersionen. Die Materialdispersion tritt bei allen Typen von Wellenleitern auf. Hingegen spielt die Modendispersion in erste Linie bei Multimode-Wellenleiter eine Rolle. Die Profildispersion tritt hauptsächlich bei Gradientenindexprofil-Wellenleiter auf. Die chromatische Dispersion und Polarisationsmoden Dispersion treten meist bei Monomode-Wellenleiter auf.

2.4.5 Verluste, Dämpfung

Die Leistungsfähigkeit optischer Nachrichtenübertragungssysteme wird durch die Dämpfung begrenzt. Infolge der Modenkonzersion wird die Dämpfung durch Absorption, Streuung und Strahlungsverluste verursacht. Durch folgende Verluste kommt es zu Leistungsminderung in Glasfasern.

- Bei der Rayleigh-Streuung wird die elektromagnetische Welle an Material-Inhomogenitäten und die daraus resultierenden Inhomogenitäten des Brechungsindex und der Dichte gestreut. Die Dämpfung ist proportional zu $1/\lambda^4$
- IR-Absorption entsteht aufgrund von Molekülschwingungen im langwelligen Spektralbereich.

- UV-Absorption entsteht im kurzwelligen Spektralbereich aufgrund von Wechselwirkung des Lichts mit den Elektronen im Fasermaterial.
- OH-Absorption entsteht im IR-Bereich bei etwa 950 nm, 1230 nm und 1370 nm.

Neben den genannten Verlusten in optischen Fasern gibt es auch die Krümmungsverluste. Wenn eine Faser gekrümmt ist, kann sie nicht mehr die gesamte Leitung übertragen. Es ist bekannt, dass die Krümmungsverluste mit sinkendem Krümmungsradius R_k steigen. Die Krümmungsverluste kann man in Makrokrümmungen und Mikrokrümmungen unterteilen. Der Krümmungsradius R_k ist bei Makrokrümmungen konstant oder nur langsam veränderlich, wobei die Krümmungen durch eine Biegung der Fasern verursacht werden. Die Mikrokrümmungen entstehen bei der Herstellung der Faser, wenn die Fasergeometrie eine mikroskopische Abweichung von idealem Design hat.

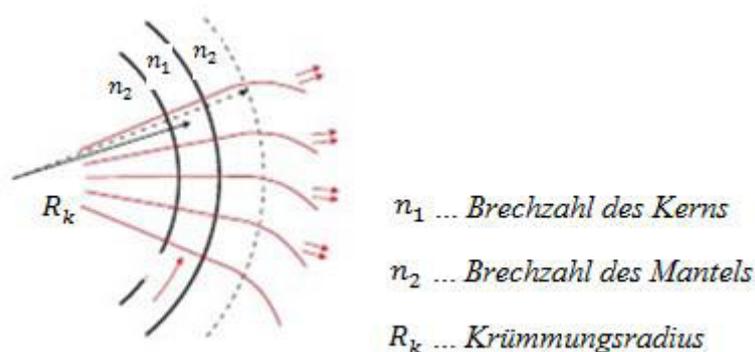


Abb.2.9: Aufweitung und Krümmung der Phasenfronten in einer gekrümmten Faser [8]

2.5 Optische Sender

Als erstes Bauelement in einem optischen Übertragungssystem kommt ein optischer Sender, für den ausschließlich Halbleiter verwendet werden.

2.5.1 Aufbau und Eigenschaften

Um die optischen Signale übertragen zu können, benötigt man am Anfang des optischen Übertragungssystems einen Sender, der das elektrische Signal in ein optisches Signal umwandelt. Dazu werden in der Regel LEDs oder Laserdioden verwendet [15]. Grundsätzlich besteht ein Laser aus:

- Einem aktiven Medium
(durch stimulierte Emission wird im aktiven Medium eine Lichtwelle verstärkt)

- Einem Pumpmechanismus
(um die Besetzungsinversion erzielen zu können, wird mit Hilfe eines Pumpmechanismus dem aktiven Medium die Energie selektiv zugeführt)
- Einem optischen Resonator
(mit dem optischen Resonator wird die emittierte Lichtwelle in das optisch aktive Medium zurückgekoppelt)

In Abbildung 2.10 ist eine schematische Darstellung einer Laserdiode aufgezeigt.

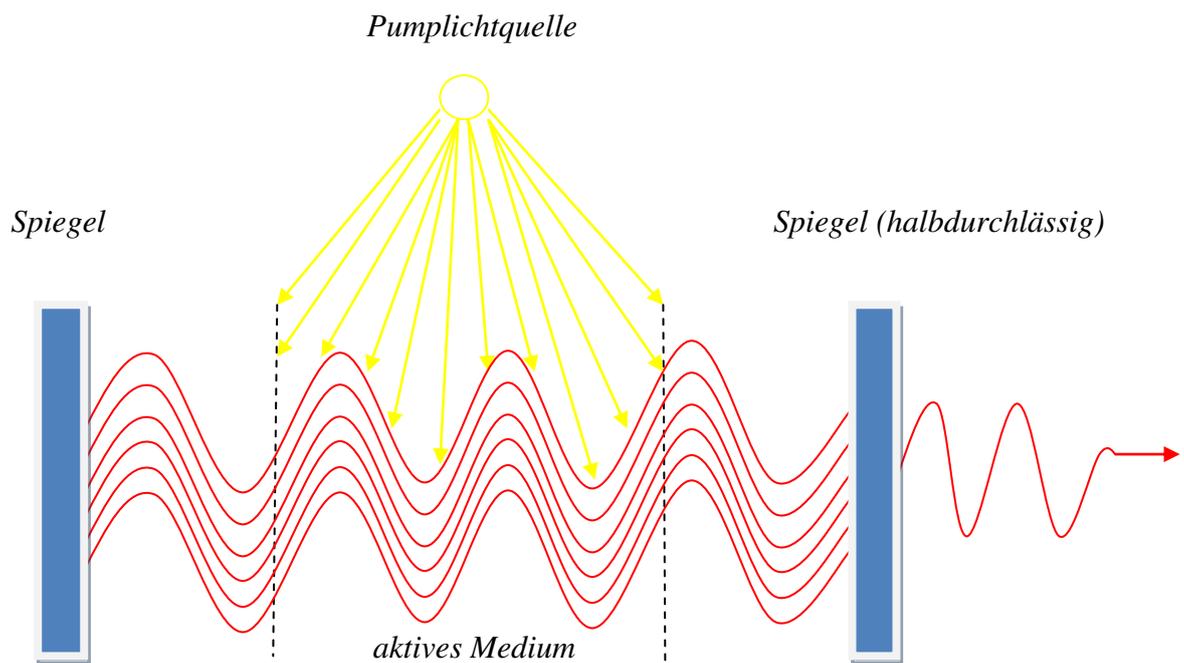


Abb. 2.10: Schematische Darstellung der Laserdiode

In Abbildung 2.11 ist das Symbol und Rückkopplungsprinzip einer Laserdiode dargestellt.

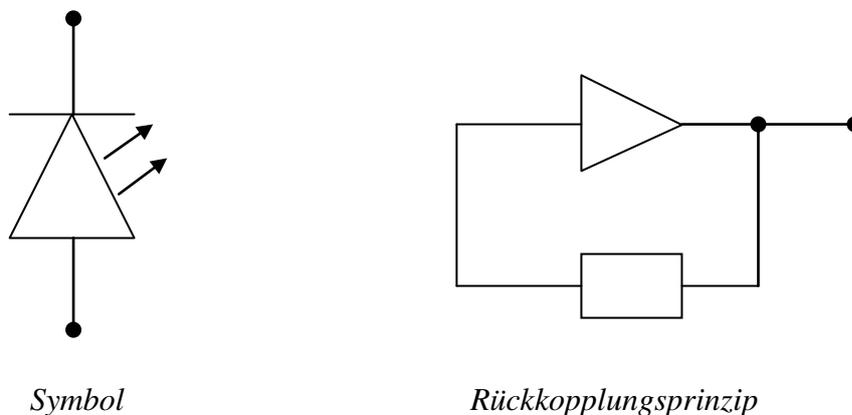


Abb. 2.11: Symbol und Rückkopplungsprinzip der Laserdiode

Folgende Bedingungen sind wichtig, um einen Laser zu realisieren:

- Die stimulierte Emission muss gegenüber der spontanen Emission groß sein. Das wird dann erfüllt, wenn im aktiven Medium die Energiedichte des Strahlungsfeldes groß genug ist.

$$u_{(\omega)} \gg \frac{\hbar \omega^3}{c^3 \pi^2} \quad (2.2)$$

$u_{(\omega)}$... *Energiedichte*

- Die Besetzungsinversion muss groß genug sein. Das wird dann erfüllt, wenn die Laserbandbreite gering und die Resonatorverluste klein sind.

$$n_2 - n_1 > \frac{d \omega}{t_0 \hbar \omega B} = \frac{\omega^2 d\omega}{t_0 C^3 \pi^2 A} \quad (2.3)$$

$d\omega$... *Laserbandbreite*

$1/t_0$... *Resonatorverluste*

2.5.2 Rekombination

Rekombinationsprozesse kann man in zwei Anteile aufgliedern:

- Strahlende Rekombination
- Nichtstrahlende Rekombination

Die strahlende Rekombination kann man weiterunterteilen [2] in:

- Spontane Emission
- Stimulierte Emission und
- Absorption

2.5.2.1 Spontane Emission

Befindet sich das Atom im angeregten Zustand mit der Energie E_2 und geht in einem weniger angeregten Zustand mit der Energie E_1 über, was durch Wechselwirkung mit dem Vakuumfeld geschieht, dann spricht man von einer spontanen Emission. Die Energieabgabe erfolgt völlig zufällig und ist nicht zeitlich und räumlich vorhersagbar.

In Abbildung 2.12 ist dies schematisch aufgezeigt.

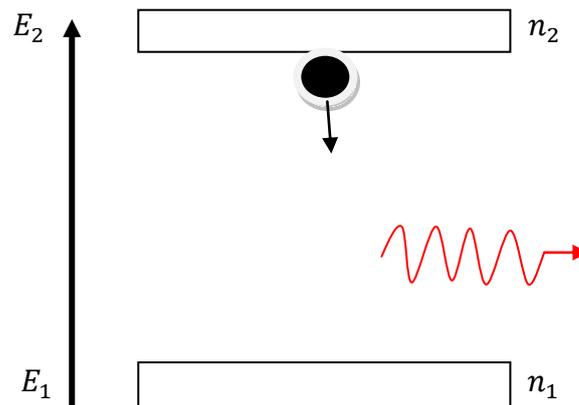


Abb. 2.12: Spontane Emission

$$\text{Spontane Emission} = \left(\frac{d n_2}{dt} \right) = - A_{2i} n_2 \quad (2.4)$$

A_{2i} ... Proportionalitätsfaktor

n_2 ... Besetzungszahldichte

2.5.2.2 Stimulierte Emission

Die Emission kann auch durch ein Photon induziert werden, wenn sich ein Elektron im angeregten Zustand mit der Energie E_2 befindet. Diesen Prozess nennt man stimulierte Emission. Das angeregte Elektron wird durch ein Photon zur Emission eines weiteren Photons stimuliert, das die gleiche Energie bzw. Frequenz und Phase besitzt und dabei in den Zustand E_1 übergeht.

Übergangsrate:

$$\left(\frac{d n_2}{dt} \right) = - B_{2i} n_2 u(\omega) \quad (2.5)$$

B_{2i} ... Proportionalitätsfaktor

n_2 ... Besetzungszahldichte

$u(\omega)$... Energiedichte

In Abbildung 2.13 ist die schematische Darstellung der stimulierten Emission aufgezeigt.

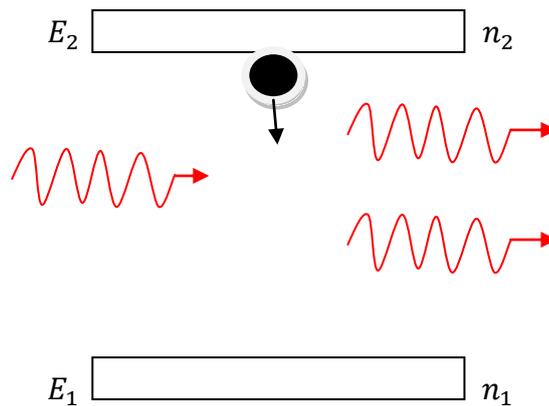


Abb. 2.13: Stimulierte Emission

2.5.2.3 Absorption

Wenn die Energiedifferenz $E_2 - E_1 = \Delta E$ die Energie des Lichts entspricht, dann geht das Atom vom Energiezustand E_1 durch Zufuhr der Photonenenergie in den Energiezustand E_2 über.

Übergangsrate:

$$\left(\frac{d n_i}{dt}\right) = - B_{i2} n_i u(\omega) \quad (2.6)$$

B_{i2} ... Proportionalitätsfaktor

n_i ... Besetzungszahldichte

$u(\omega)$... Energiedichte

In Abbildung 2.14 ist die schematische Darstellung der Absorption aufgezeigt.

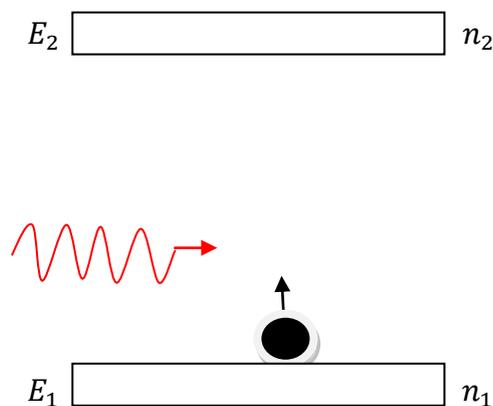


Abb. 2.14: Absorption

2.6 Optische Empfänger

Um die optischen Signale wieder in elektrische Signale umwandeln zu können, benötigt man optische Empfänger am Ende des optischen Übertragungssystems. Die häufigsten verwendeten optischen Empfänger sind die Photodiode, Photo-Pin-Diode und die Lawinen-Photo-Diode [3]. Alle Typen von Photodioden werden in Sperrrichtung betrieben. Einfallendes Licht erzeugt in der Raumladungszone des p-n-Übergangs freie Ladungsträgerpaare (Elektronen und Löcher). Niedriges Rauschen und hohe Empfindlichkeit sind die wichtigsten Anforderungen an Photodioden [16].

Nach der Photodiode, falls nötig, kommt die erste elektronische Verstärkerstufe. Dieser Verstärker muss eine hohe Bandbreite detektieren können und zwar nur mit wenigen Photonen. Er muss auch in der Lage sein, unterschiedliche Arten von Rauschen zu unterdrücken.

Die Umwandlung vom optischen Signal in ein elektrisches Signal kann wie folgt mathematisch hergeleitet werden.

$$I_{photo} = R \cdot P_{opt} \quad (2.7)$$

dabei sind:

I_{photo} ... Photostrom

R ... Konversionsfaktor

P_{opt} ... Lichtleistung

$$R_{ideal} = \frac{e}{h\nu} \quad (2.8)$$

3 Photodioden

Die Photodiode ist eine Halbleiterdiode, die aus Silizium, Germanium oder Verbindungshalbleiter hergestellt wird.

3.1 Aufbau und Eigenschaften

Bei Photodioden wird das einfallende Licht an einem p-n-Übergang direkt in ein elektrisches Signal umgewandelt. Dies ist durch den Photoeffekt möglich, der im Inneren der Diode abläuft. Das ist der sogenannte innere Photoeffekt [1]. Durch diesen Effekt wird ein Elektron aus dem Valenzband in das energetisch höher gelegene Leitungsband angeregt, d.h. die Elektron-Loch-Paare werden über diesen Effekt erzeugt und durch die angelegte Spannung getrennt. Neben den inneren Photoeffekt bei Photodioden kommt es auch zu einem sogenannten äußeren Photoeffekt. Durch diesen Effekt werden Elektronen aus einer metallischen Oberfläche, die vom Licht bestrahlt wird, herausgelöst. Um die Elektronen herauszulösen, muss ausreichend Energie vorhanden sein. Da die Energie eines Photons proportional zu dessen Frequenz ist ($E_{\text{photon}} = h\nu$) muss eine bestimmte Mindestfrequenz überschritten werden. In Abbildung 3.1 sind das Symbol und der schematische Aufbau der Photodiode aufgezeigt.

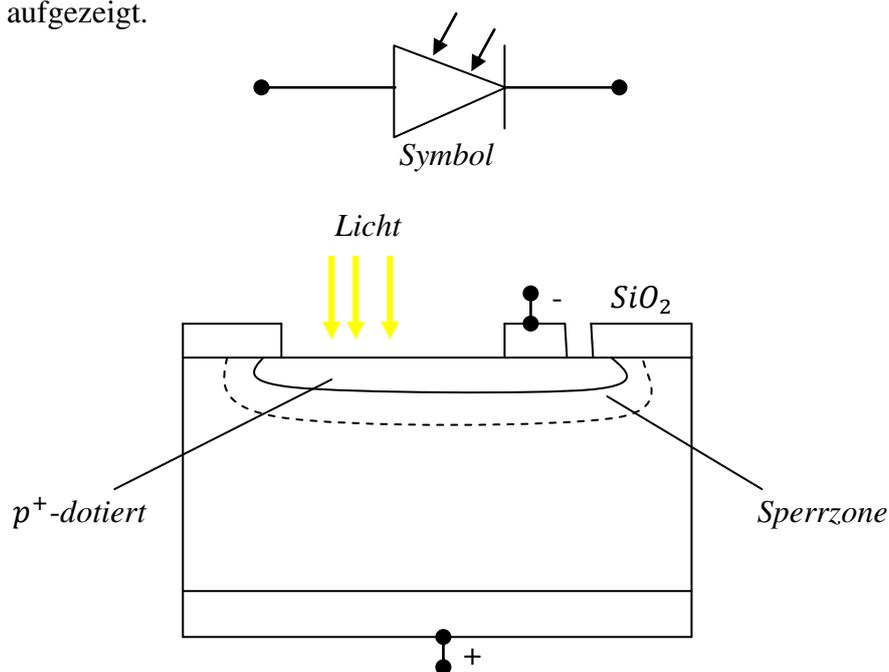


Abb. 3.1: Symbol und schematischer Aufbau der Photodiode

Wenn kein Licht auf die Photodiode fällt, dann fließt bei Sperrpolung nur ein geringer Strom, der als Dunkelstrom bezeichnet wird. Wenn Licht auf die Photodiode fällt, dann fließt ein sogenannter Photostrom, der von der Spannung U unabhängig ist. Da der Strom in Sperrichtung fließt, verschiebt sich die U/I Kennlinie nach unten (siehe Abbildung 3.2).

In Abbildung 3.2 ist die Kennlinie einer Photodiode dargestellt.

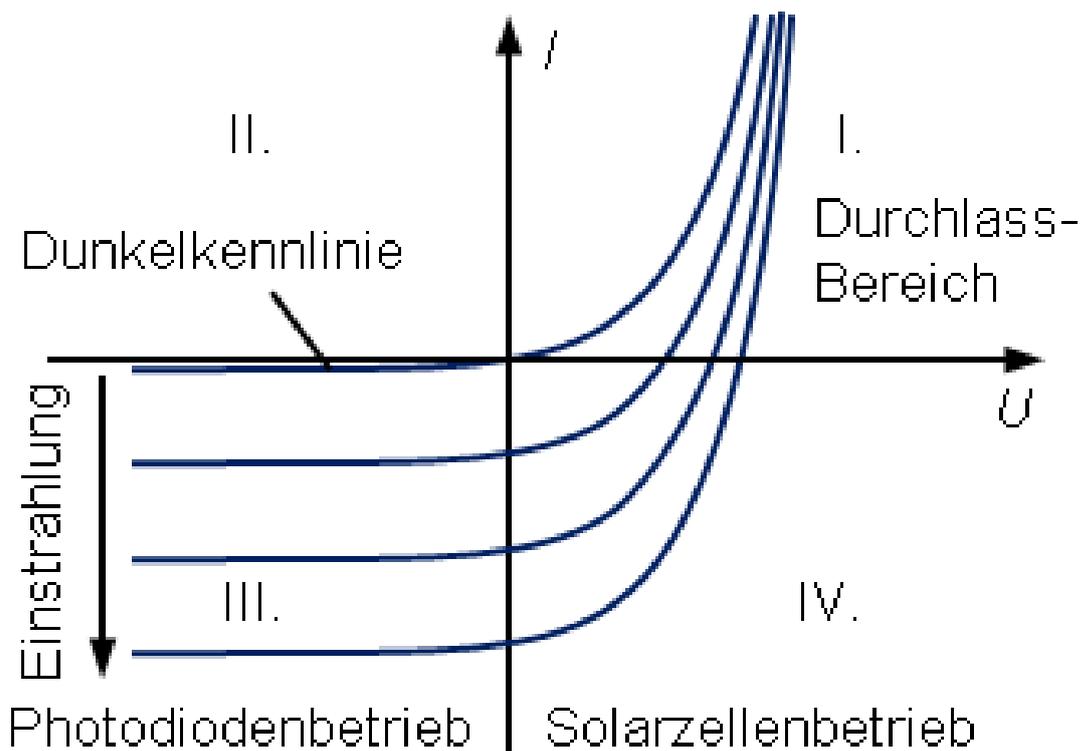


Abb. 3.2: Kennlinien einer Photodiode [28]

Durch die Shockley-Gleichung lässt sich das elektrische Verhalten der Photodiode folgendermaßen ausdrücken:

$$I = I_D - I_{PH} = I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) - I_{PH} \quad (3.1)$$

dabei sind:

I ... Diodenstrom

I_D ... Dunkelstrom

I_{PH} ... Photostrom

I_S ... Sättigungsstrom

U_T ... Temperaturspannung (ca. 25mV bei 300 K)

Der Sättigungsstrom ist gegeben zu:

$$I_S = A \cdot q \cdot n_i^2 \left(\frac{D_N}{L_N \cdot N_A} + \frac{D_P}{L_P \cdot N_D} \right) \quad (3.2)$$

In Abbildung 3.3 ist ein Ersatzschaltbild der Photodiode dargestellt.

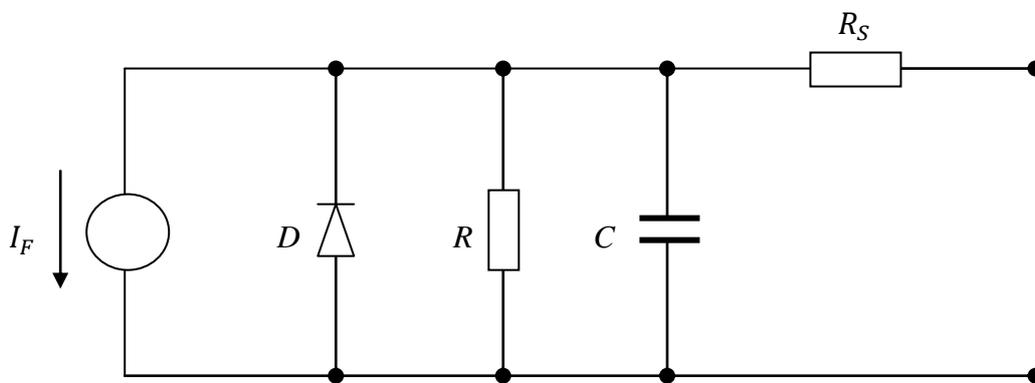


Abb. 3.3: Ersatzschaltbild der Photodiode

3.2 Materialien

Zur Realisierung von Photodioden können verschiedene Materialien verwendet werden. Die häufigst verwendeten Materialien sind Silizium (Si), Germanium (Ge), Indiumgalliumarsenid (InGaAs), Indiumantimonid (InSb). Die Materialauswahl ist durch die Eigenschaften wie Empfindlichkeit, Grenzfrequenz, Dunkelstrom usw. bestimmt. Die Photodioden müssen im gewünschten Wellenlängenbereich diese Anforderungen ausführen. Für den Wellenlängenbereich von 0.2 bis 1.1 μm eignen sich Silizium-Photodioden. Oberhalb 0.9 μm weisen sie sehr gute Eigenschaften auf [9]. Ge-Photodioden sind für den Bereich von ca. 0.8 bis 1.8 μm geeignet. Im Bereich von 1.3 bis 1.6 μm weisen InGaAs-Photodioden gute Empfindlichkeitswerte auf.

3.3 Typen von Empfangsdioden

Die drei wichtigsten Photodiodyentypen sind:

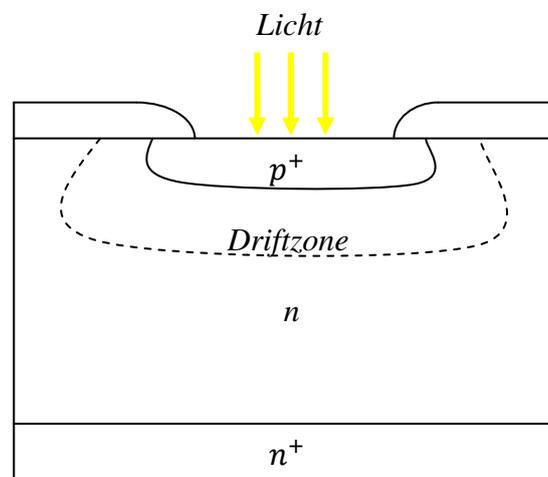
- p-i-n Photodiode
- Lawinen-Photodiode (APD, Avalanche-Photodiode)
- MSM-Photodiode (Metall-Halbleiter-Metall)

Um die Funktion von Photodioden besser verstehen zu können, wird in dieser Arbeit der p-n-Übergang und sein Funktionsprinzip kurz erklärt.

Die Photodiode, die nur aus einem p-n-Halbleiterübergang besteht, wird als p-n-Photodiode bezeichnet. Sie stellt die einfachste Form von Photodioden dar. Die Diode hat zwei Anschlüsse. Der Anschluss an der p-Zone ist die Anode (A) und der Anschluss an der n-Zone ist die Kathode (K). Der Strom fließt von der p-Zone zur n-Zone oder von der Anode zur Kathode. Im Allgemeinen besteht bei p-n-Dioden die p- und n-Zone aus Silizium. Sie können aber auch aus anderen Halbleitermaterialien bestehen wie z.B. aus Germanium.

Die Elektronen dringen durch Diffusion aus der n-Schicht in die p-Schicht ein und die Löcher diffundieren aus der p-Schicht in die n-Schicht. Die Erzeugung von Elektron-Loch-Paare kann durch Absorption in der Sperrschicht und auch in den p- oder n-leitenden Gebieten ausgelöst werden. Die Dicke der Sperrschicht kann nicht beliebig vergrößert werden. Aus diesem Grund haben die p-n-Dioden eine geringe Empfindlichkeit. Was ein Nachteil der p-n-Photodiode ist.

In der nächsten Abbildung sind der Aufbau und Bandverlauf der p-n-Photodiode schematisch dargestellt.



a)

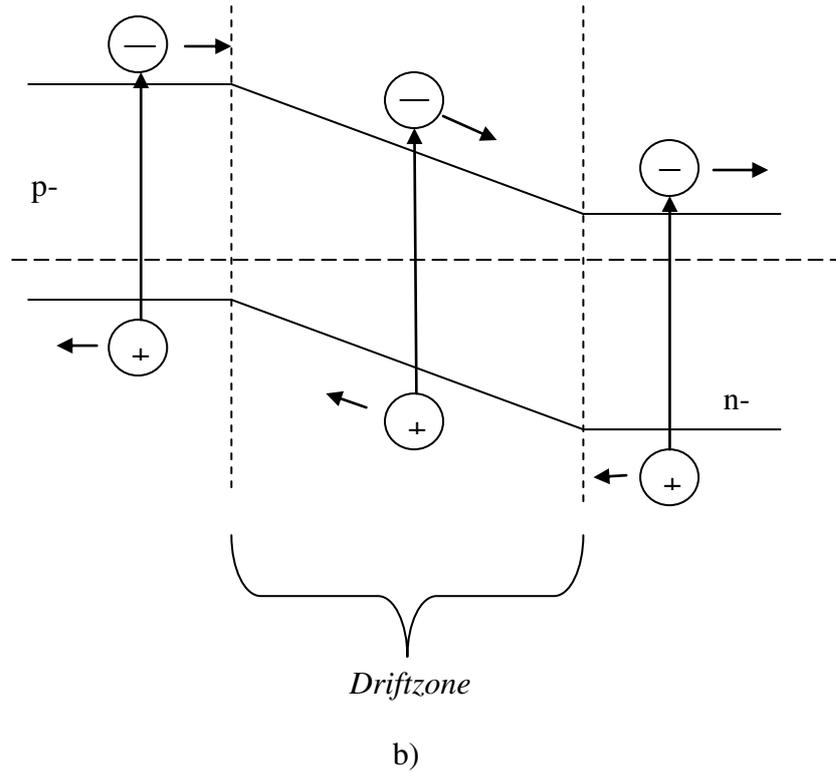


Abb. 3.4: a) Aufbau und b) Bandverlauf der p-n-Photodiode

3.3.1 p-i-n Photodiode

Durch die Verlängerung der Driftzone um eine intrinsische Zone wird die Empfindlichkeit der Photodiode erhöht. In Abbildung 3.5 ist der Aufbau der p-i-n-Photodiode zu sehen.

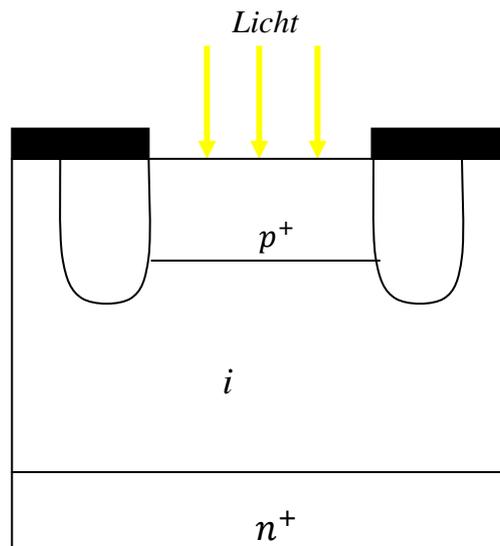


Abb.3.5: Querschnitt einer p-i-n-Photodiode

Bei einer p-i-n-Photodiode können die Elektron-Loch-Paare in der Verarmungszone durch Photonen erzeugt werden, die eine Energie größer als die Bandlücke des Halbleitermaterials der Diode besitzen.

Die p-i-n-Photodiode hat gegenüber p-n-Photodiode eine geringe Kapazität, höhere Bandbreite, geringe Driftzeiten, keine Ladungsträgerverluste usw. [10].

3.3.2 APD-Lawinen Photodiode

Bei der Lawinen (Avalanche)-Photodiode wird eine sehr große Sperrspannung verwendet, die im Bereich des p-n-Übergangs eine sehr hohe Feldstärke erzeugt. Mit deren Hilfe werden die Elektronen und die Löcher stark beschleunigt und durch Stoßionisation jedes Photoelektrons eine Lawine von weiteren Elektronen ausgelöst, wodurch es zu einer Ladungsträgermultiplikation kommt. Der Multiplikationsprozess hängt von der angelegten Sperrspannung und der Anzahl der eingestrahelten Photonen ab. In Abbildung 3.6 ist ein Querschnitt einer Silizium-Lawinen Photodiode dargestellt.

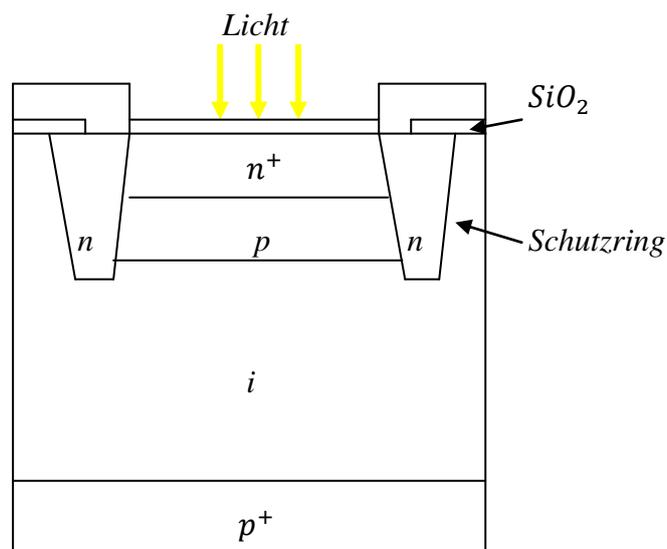


Abb. 3.6: Querschnitt einer Si-APD

Die ausgelösten Elektronen bewegen sich vom p- zum n-Bereich und die Löcher bewegen sich vom n- zum p-Bereich. Für praktische Zwecke ist es erwünscht, dass nur Elektronen zur Ladungserzeugung beitragen.

In Abbildung 3.7 ist der Aufbau und Verlauf der elektrischen Feldstärken einer Lawinenphotodiode abgebildet. Abbildung 3.8 zeigt eine schematische Darstellung des Multiplikationsprozesses in einer APD .

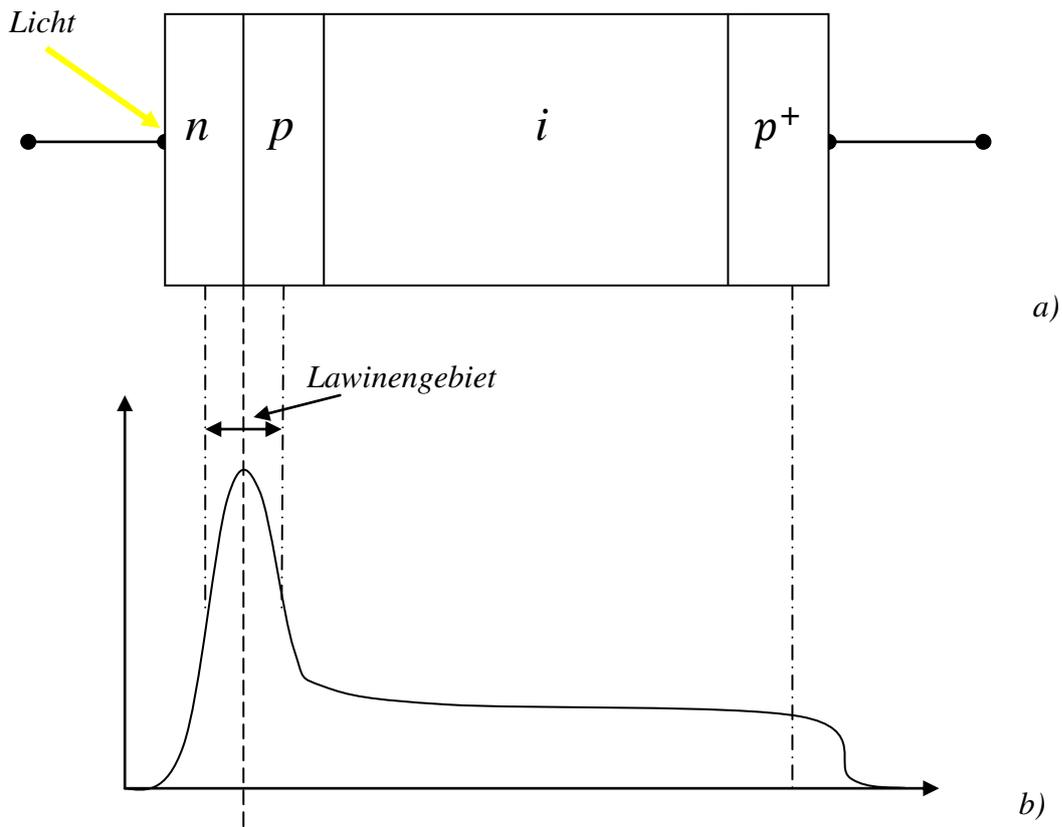


Abb. 3.7: a) Aufbau und b) Verlauf der elektrischen Feldstärke einer Lawinenphotodiode

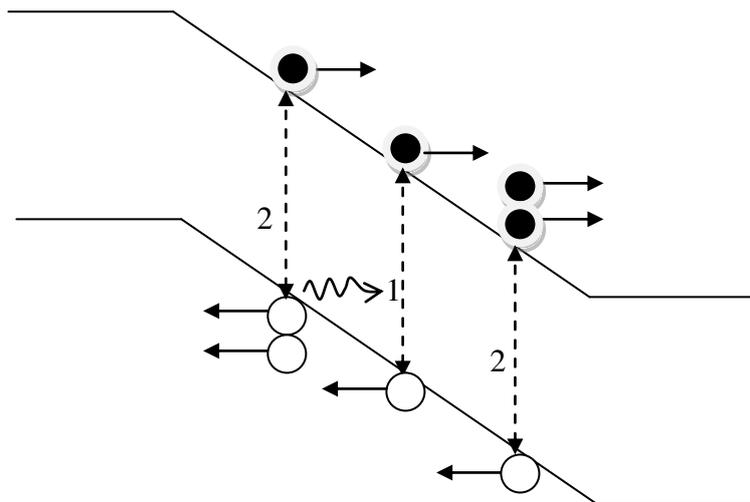


Abb. 3.8: Schematische Darstellung des Multiplikationsprozesses in einer APD

Die Verstärkung des primären Photostroms einer APD wird quantitativ durch Multiplikationsfaktor M beschrieben.

$$M = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_R - IR_S}{U_B}\right)^n} \quad (3.3)$$

dabei sind:

I_1 ... Primärphotostrom

I_2 ... Sekundärphotostrom

Auf die Verstärkung M haben die Versorgungsspannung und die Temperatur einen starken Einfluss. Neben diesen Parametern hängt der Multiplikationsfaktor M noch von Ionisierungskoeffizienten, Demodulationsfrequenz, Lichtleistung und weiteren Einflüssen ab. Der Lawinenexponent n wird von verwendeten Materialien sowie von der Reinheit und der Diodenstruktur bestimmt.

Zur Herstellung von APD können verschiedenen Materialien verwendet werden. Besonders gut eignet sich Silizium, weil es über einen geringen Ionisationsverhältnis verfügt.

Die Anzahl der von einem Ladungsträger pro Weglängen erzeugten Elektron-Loch-Paare wird als Ionisierungskoeffizient bezeichnet. Dabei haben Elektronen und Löcher verschiedene Ionisierungskoeffizienten, die von der Temperatur und der elektrischen Feldstärke abhängen.

$$k = \frac{\beta_i}{\alpha_i} \quad (3.4)$$

dabei sind:

k ... Ionisationsverhältnis

β_i ... Ionisationskoeffizient der Löcher

α_i ... Ionisationskoeffizient der Elektronen

In Abbildung 3.9 ist die Abhängigkeit des Multiplikationsfaktors von der Betriebsspannung grafisch dargestellt.

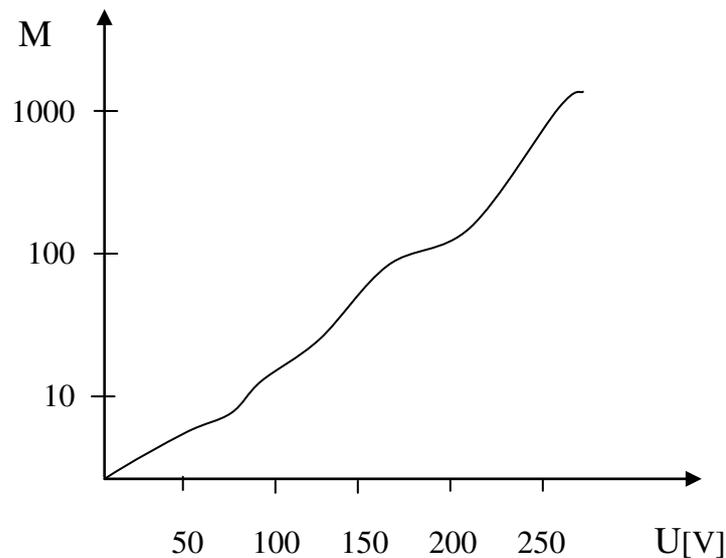


Abb. 3.9: Verstärkung der Lawinendiode. M ist der Multiplikationsfaktor und U die Betriebsspannung

Bei der APD entsteht ein zusätzliches Rauschen, das mit dem Multiplikationsprozess verbunden ist. Es ist durch einen Rauschfaktor F_{noise} gekennzeichnet. Um eine stabile Lawinenverstärkung zu haben, soll man versuchen dieses Rauschen so niedrig wie möglich zu halten. Um das zu erreichen, soll sich das Multiplikationsgebiet möglichst wenig mit dem Absorptionsbereich überdeckt werden.

$$F_{noise}(M) = kM + (1 - k)\left(2 - \frac{1}{M}\right) \quad (3.5)$$

dabei sind:

$F_{noise}(M)$... Rauschfaktor

k ... Ionisationsverhältnis

M ... Multiplikationsfaktor

Ein Vorteil der Lawinenphotodiode gegenüber der p-i-n-Photodiode ist ihre deutlich größere intrinsische Verstärkung. Weitere Vorteile sind höchste Empfindlichkeit und große Schnelligkeit [11].

Nachteile von Lawinen-Photodioden sind: Sie benötigen hohe Versorgungsspannung, hat einen mit dem Multiplikationsfaktor verbundenen Zusatzrauschen, verfügt über einen geringen Dynamikbereich usw.

3.3.3 MSM-Photodioden

Die MSM (**Metal-Semiconductor-Metal**)-Photodiode weist gute dynamische Eigenschaften auf, weil sie eine sehr kleine Sperrschichtkapazität besitzt. Aus diesem Grund ermöglichen MSM-Photodioden auch sehr hohe Datenraten. Abbildung 3.10 zeigt zwei horizontal angeordnete Metall-Halbleiter-Übergänge bei einfacher Struktur einer MSM-Photodiode.

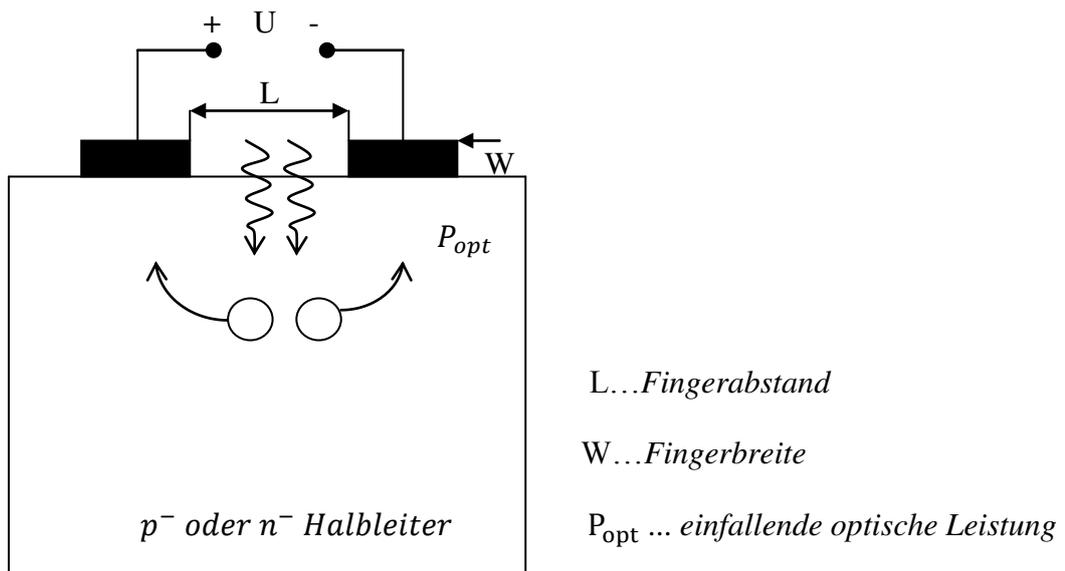


Abb.3.10: Querschnitt einer einfachen Struktur der MSM-Photodiode

Bei der MSM-Photodiode werden die Elektroden zur Ladungsträgerkolektion in Form einer Fingerstruktur realisiert. Die MSM-Photodioden bestehen aus zwei solcher fingerförmigen Elemente, die als Metall-Halbleiter Schottky Dioden ausgeführt sind und in Reihe geschaltet werden. Zwischen den Fingern sind die Abstände im Mikrometerbereich. Dies ist wichtig, um höchste Geschwindigkeiten zu erzeugen [12].

Abbildung 3.11 zeigt eine Draufsicht einer prinzipiellen Elektrodenstruktur einer MSM-Photodiode.

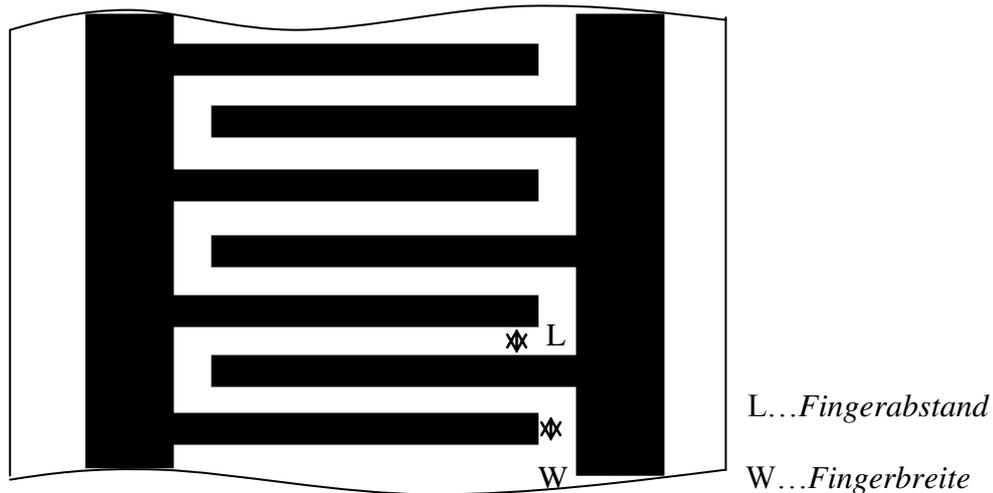


Abb.3.11: Prinzipielle Fingerstruktur einer MSM-Photodiode

3.4 Empfindlichkeit der Photodiode

Die Empfindlichkeit ist ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung von Photodioden und wird als Verhältnis von strahlungsbedingtem Photostrom zur einfallenden optischen Leistung definiert. Man kann sie durch folgende Formel bestimmen:

$$S = \frac{I}{P_{opt}} \left[\frac{A}{W} \right] \quad (3.6)$$

dabei sind:

S ... Empfindlichkeit

I ... Photostrom

P_{opt} ... optische Leistung

Die Empfindlichkeit wird gemessen in Ampere pro Watt einfallender Lichtleistung[13]. Im Idealfall steigt die Empfindlichkeit einer Photodiode linear mit der Wellenlänge des einfallenden Lichts. Im realen Fall steigt sie linear bis zur Wellenlänge λ_g an, die der Bandlückenenergie E_g entspricht und danach sinkt die Empfindlichkeit stark ab [1]. Das bedeutet, mit abnehmender Wellenlänge sinkt die Empfindlichkeit, da die Energie zur

Erzeugung eines Ladungsträgers nicht mehr ausreicht, um den Bandlückenabstand zu überwinden.

Im Bereich von 0.3 bis 0.5 A/W liegen typische Werte der Empfindlichkeit für Si-Photodioden. Für unterschiedliche Materialien erhält man, in Abhängigkeit der Bandlückenenergie, verschiedene spektrale Kennlinien.

In Abbildung 3.12 ist eine Empfindlichkeit einer Si-Photodiode im idealen und realen Fall aufgezeigt.

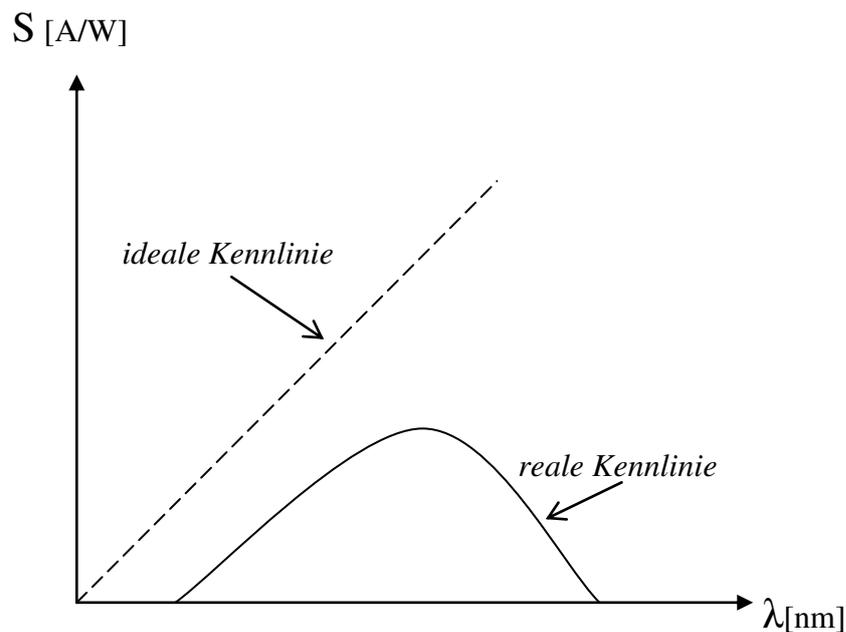


Abb.3.12: Empfindlichkeit S in Abhängigkeit der Wellenlänge λ einer Si-Photodiode im idealen und realen Fall

Um eine hohe Empfindlichkeit erreichen zu können, muss man die Reflexionen an der Diodenoberfläche minimieren, die Materialien mit größter Absorption wählen sowie den p-Halbleiter-Bereich so dünn wie möglich halten.

3.5 Kapazität der Photodiode

Die Kapazität einer Photodiode ist von der angelegten Vorspannung abhängig. Um eine hohe Empfindlichkeit der Photodiode erreichen zu können, soll die Diodenkapazität möglichst klein sein. Mit steigender Detektorfläche steigt die Kapazität der Photodioden. Abbildung 3.13 zeigt die Abhängigkeit der Diodenkapazität von Sperrspannung.

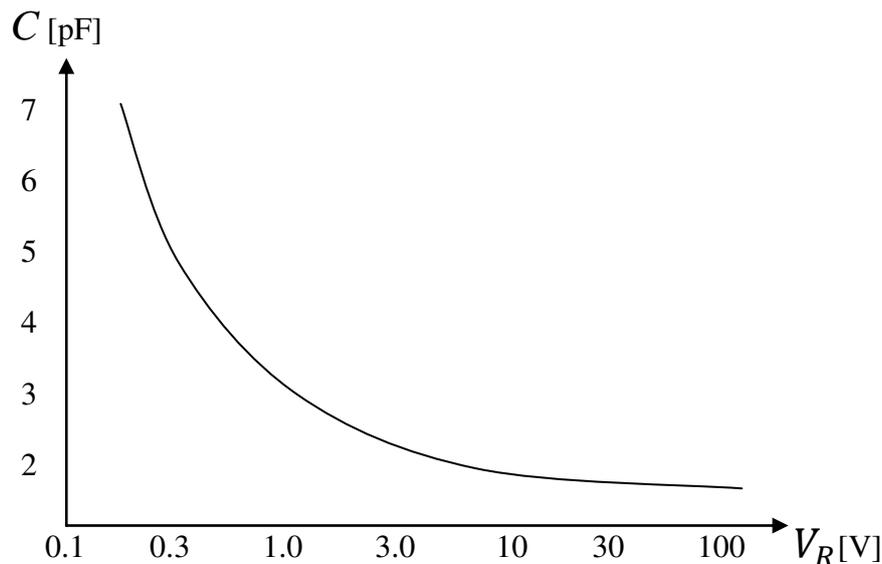


Abb.3.13: Kapazität C einer Photodiode in Abhängigkeit der Sperrspannung V_R

3.6 Frequenzverhalten einer Photodiode

Das Frequenzverhalten einer Photodiode wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Ladungsträgerdriftzeiten in der Verarmungszone
- Diffusionszeitkonstante von Ladungsträgern außerhalb der Driftzone
- RC-Zeitkonstante

Die Driftzeit der Ladungsträger und die Zeitkonstante haben einen dominante Einfluss auf das Frequenzverhalten einer Photodiode. Die Bandbreite von Photodioden wird auch durch die Ladungsträgerlaufzeiten begrenzt.

Die **Ladungsträgerdriftzeit** t_{drif} bei einer Photodiode ist das Verhältnis zwischen der Dicke der i-Schicht d und die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger V_{drif} und wird wie folgt definiert.

$$t_{drif} = \frac{d}{V_{drif}} \quad (3.7)$$

In der i-Schicht wird ein Elektron-Loch-Paar durch Absorption eines Photons erzeugt. Die Ladungsträger werden durch den Einfluss des elektrischen Feldes getrennt. Die dafür benötigte Zeit wird als Ladungsträgerdriftzeit bezeichnet. Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger wird durch das verwendete Material und das elektrische Feld in der i-Schicht bestimmt.

Das Frequenzverhalten einer Photodiode wird durch **Diffusion von Ladungsträgern**, die außerhalb der Raumladungszone erzeugt werden, beeinflusst. Die Diffusionszeit t_{diff} ist das Verhältnis zwischen dem Quadrat Diffusionslänge L und die Diffusionskonstante D .

$$t_{diff} = \frac{L^2}{D} \quad (3.8)$$

Der Abstand vom Absorptionsort bis zur Raumladungszone wird als die Diffusionslänge L bezeichnet und kann maximal die Dicke der n- bzw. p-Schicht sein. Üblicherweise ist die Dicke der p-Schicht viel kleiner als die Diffusionslänge der Ladungsträger. Die Diffusionskonstante D kann man folgendermaßen berechnen:

$$D_{p,n} = \frac{kT}{e} \mu_{p,n} \quad (3.9)$$

dabei sind:

k ... Boltzmann-Konstante

T ... Temperatur

e ... Elementarladung

$\mu_{p,n}$... Beweglichkeit der Löcher bzw. Elektronen

Die **RC-Zeitkonstante** t_{RC} entsteht durch das Umladen der Sperrschichtkapazität C_o mit dem Lastwiderstand R_L . Für diese gilt:

$$t_{RC} \approx C_o \cdot R_L \quad (3.10)$$

Die Sperrschichtkapazität mit dem Lastwiderstand und Bahnwiderstand R_s bildet die Zeitkonstante des Tiefpasses. Das Zeitverhalten der Photodiode wird durch diese Faktoren bestimmt.

Die Antwortzeit t_A (response time) einer Photodiode kann wie folgt beschrieben werden:

$$t_A = \sqrt{t_{RC}^2 + t_{drif}^2 + t_{diff}^2} \quad (3.11)$$

Eine große Sperrschichtkapazität haben meistens Photodioden mit einer großen aktiven Fläche. Das führt zu einem starken Abfall der Geschwindigkeit der Photodiode sowie zu einer starken Begrenzung der Bandbreite der Photodiode.

4 Rauschen

Das Rauschen kann man durch die messtechnische Größe zur Charakterisierung des Rauschens (spektrale Leistungsdichte, Rauschstrom bzw. Rauschspannung) sowie über die Parameter eines stochastischen Prozesses beschreiben.

4.1 Rauschen in Empfängern

Durch das Rauschen wird die Empfindlichkeit des Empfängers bestimmt und die Detektierbarkeit kleiner Signale wird durch das Rauschen limitiert. Aus diesen Gründen soll das Rauschen möglichst niedrig gehalten werden.

Wegen der Quantisierung der elektromagnetischen Strahlung im optischen Frequenzbereich tritt ein sogenanntes Quantenrauschen auf. Durch dieses Rauschen wird für die empfangende Signalleistung die untere Grenze festgelegt.

Der photoelektrische Effekt einer Photodiode ist in Abbildung 4.1 schematisch abgebildet.

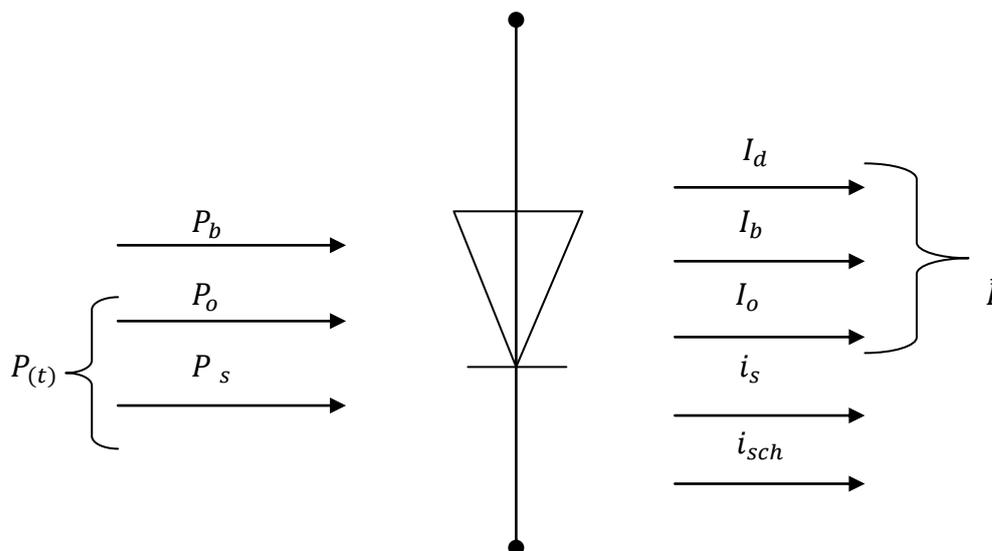


Abb.4.1: Zusammenhang zwischen Lichtleistung und Photostrom [5]

Dabei sind:

$P_{(t)}$... <i>Lichtleistung vom Lichtsender</i>	\bar{I} ... <i>gesamte Gleichstrom der Diode</i>
P_o ... <i>Gleichanteil des optischen Signales</i>	I_o ... <i>Strom als Folge von P_o</i>
P_s ... <i>Wechselanteil des optischen Signales</i>	i_s ... <i>Strom als Folge von P_s</i>
P_b ... <i>Hintergrundlicht</i>	I_b ... <i>Strom als Folge von P_b</i>
	I_d ... <i>Dunkelstrom</i>
	i_{sch} ... <i>Schrotstrom</i>

Auf die Photodiode trifft die Lichtleistung von Lichtsender $P_{(t)}$, die aus Gleichanteil des optischen Signals P_o und Wechselanteil des optischen Signals P_s besteht. Dabei kann noch ein sogenanntes Hintergrundlicht P_b auftreten. Als Folge von diesen Lichtleistungen werden am Ausgang der Photodiode die entsprechenden Ströme hervorgerufen. Durch P_o und P_s entstehen I_o und I_s . Durch P_b wird I_b verursacht. Hierbei wird auch ein sogenannter Dunkelstrom I_d fließen. Der Schrotstrom i_{sch} wird durch alle diese Ströme verursacht [5].

Bei der Photodiode gibt es verschiedene Rauschquellen, wie z.B.:

- Thermisches Rauschen
- Rauschen des Verstärkungsprozesses
- Schrotrauschen, Dunkelrauschen

In der Photodiode wird die Lichtleistung vom Sender, die wegen das sogenannte Quantenrauschen reduziert wird, durch den photoelektrischen Effekt in ein elektrisches Signal umgewandelt. Das Signal besteht aus einem um Quantenrauschen reduzierten Teil und das Schrotrauschen. Nach der Verstärkung des Photostroms in der Diode kommt es zu einem zusätzlichen Rauschen, nämlich das sogenannte Rauschen des Verstärkungsprozesses. Durch den Lastwiderstand wird das thermische Rauschen erzeugt. Mit zunehmendem Rauschen verringert sich das Signal-Rausch-Verhältnis [5].

Eine schematische Entwicklung des Signal-Rauschen-Verhältnisses in einer Photodiode ist in Abbildung 4.2 aufgezeigt.

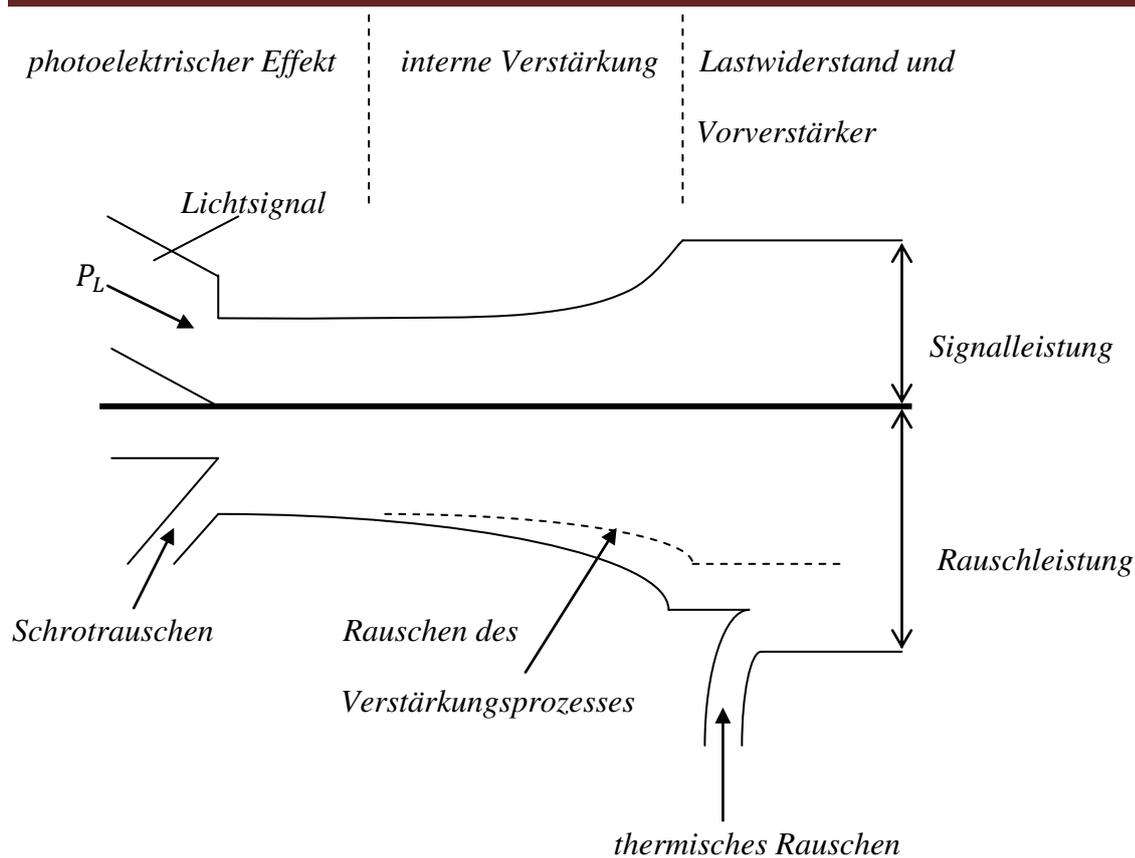


Abb.4.2: Schematische Darstellung des photoelektrischen Effekts [5]

4.1.1 Thermisches Rauschen der Photodiode

Das thermische Rauschen wird durch den Lastwiderstand erzeugt. Dieses Rauschen tritt infolge der thermischen Bewegung der Ladungsträger in der Photodiode auf. Es hängt nicht von der Leistung des einfallenden Lichtes ab.

Der Kurzschluss-Rauschstrom kann sich nach folgender Formel berechnen lassen:

$$\langle i_{therm}^2 \rangle = 4kT \frac{1}{R} \Delta f \quad (4.1)$$

dabei sind:

K ... Boltzmann-Konstante = $1.38 \cdot 10^{-23}$ VAs/K

T ... absolute Temperatur

Δf ... Rauschbandbreite

R ... Lastwiderstand

Abbildung 4.3 zeigt ein Rauschersatzschaltbild eines Widerstandes [6].

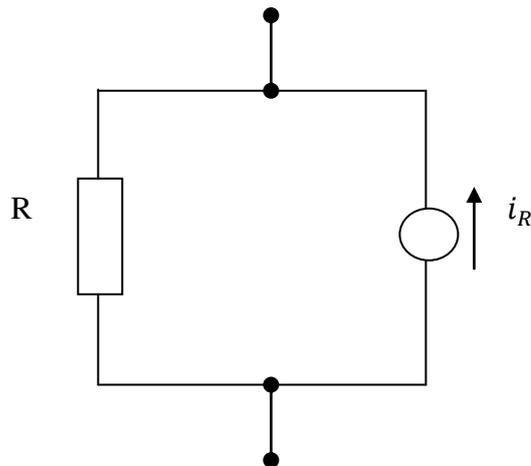


Abb.4.3: Rauschersatzschaltbild eines Widerstandes

Die Leerlauf-Rauschspannung ist an den Enden eines Widerstandes messbar und beträgt:

$$\langle u_{therm}^2 \rangle = 4kTR\Delta f \quad (4.2)$$

Die thermische Rauschleistung beträgt:

$$P_{therm} = 4kT\Delta f \quad (4.3)$$

Durch Kühlen der Diode kann diese thermische Rauschleistung verringert werden.

4.1.2 Schrotrauschen der Photodiode

Das Schrotrauschen entsteht dadurch, dass der Ladungstransport über p-n-Übergang einer Photodiode nicht gleichmäßig, sondern in Einheiten der Elementarladung e erfolgt. Die Ladungsträgeranzahl, die den p-n-Übergang überschreitet, ist nur im zeitlichen Mittel konstant, aber im momentanen Fluss den statischen Schwankungen unterworfen.

Die Leistungsdichte des Schrotrauschens beträgt:

$$\langle i_{shot}^2 \rangle = 2eI\Delta f \quad (4.4)$$

dabei sind:

e ... Elektronen-(Elementar)-ladung = $1,6 \cdot 10^{-19}$ As

Δf ... Einheitsbandbreite (häufig wird 1 Hz genommen, innerhalb derer das Rauschen bewertet wird)

Gemäß der Gleichung ist das Schrotrauschen nicht temperaturabhängig, der Strom I ist jedoch temperaturabhängig. Aus diesem Grund ist durch Kühlung eine Rauschverringern möglich.

Abbildung 4.4 zeigt ein Rauschersatzschaltbild einer Stromquelle [6].

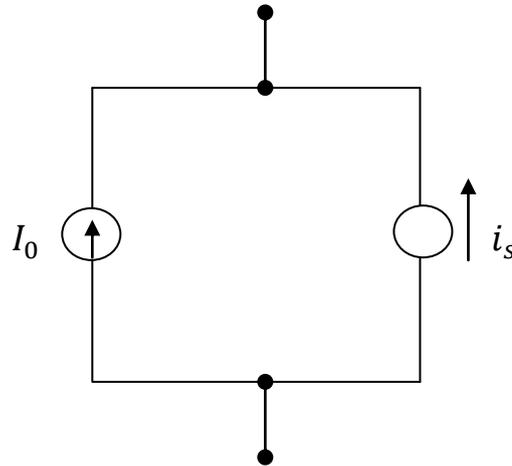


Abb.4.4: Rauschersatzschaltbild einer Stromquelle

Der Dunkelstrom trägt zum Schrotrauschen bei. Um das Schrotrauschen zu reduzieren, soll der Dunkelstrom verringert werden.

4.2 Signal-Rausch-Verhältnis von Photodioden

Das Signal-Rausch-Verhältnis gibt an, um welchen Faktor das Ausgangssignal bei einer bestimmten Lichtleistungsstärke über dem Gesamtrauschen liegt.

$$SNR = \frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}} = \frac{P_s}{P_N} \quad (4.5)$$

Das Verhältnis wird oft logarithmisch und in der Einheit Dezibel(dB) angegeben.

$$SNR_{[dB]} = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_N} \quad (4.6)$$

Mit zunehmendem thermischen Rauschen und Dunkelstrom verringert sich das Signal-Rausch-Verhältnis. Durch Lichtleistungsverlust auf der Übertragungsstrecke und Signalverzerrungen durch Laufzeiteffekte, nimmt das Signal-Rausch-Verhältnis ab.

4.3 Minimal detektierbare Leistung

Die in eine Photodiode minimal detektierbare Leistung ist durch Rauschen begrenzt und aus dem zu forderndes Verhältnis $SNR=1$ ergibt sich [8]:

$$P_{min} = 4h\nu\Delta f \quad (4.7)$$

dabei sind:

h ... Plancksche Konstante

ν ... optische Frequenz

Δf ... Bandbreite der Photodiode

Unter der Voraussetzung, dass die Wirkung vom Schrotrauschen limitiert wird, kann die minimal detektierbare Leistung abgeschätzt werden. Abbildung 4.5 zeigt die Abhängigkeit den minimalen optischen Empfängerleistung von der Bandbreite im Logarithmischen Maßstab für $SNR=1$.

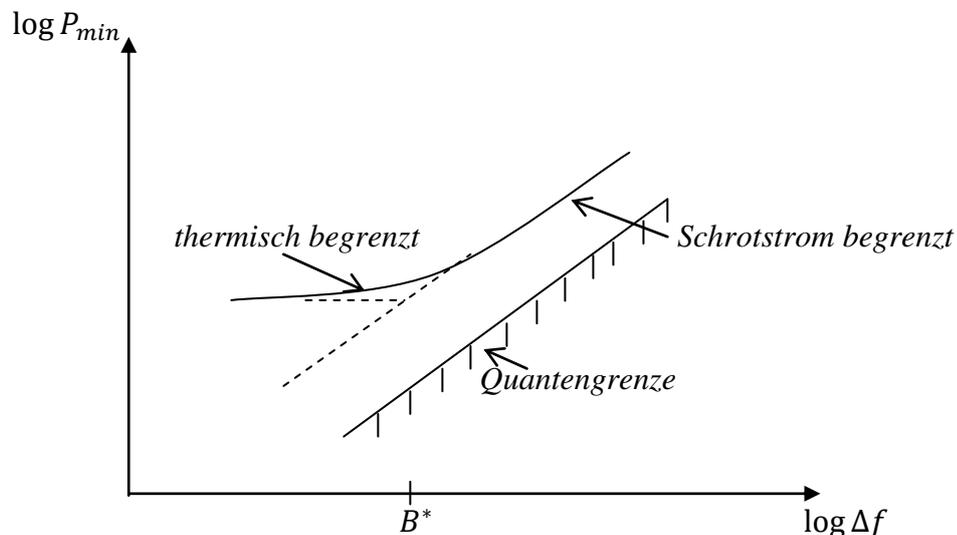


Abb.4.5: Abhängigkeit der erforderlichen Lichtleistung von der Signalbandbreite [5][8]

Wie Abbildung 4.5 zeigt, ab einem gewissen Wert B^* ergibt das Schrotrauschen eine höhere minimale Leistung als das thermische Rauschen. Unterhalb dessen Werte dominiert das thermische Rauschen, d.h. die minimale detektierbare Leistung grenzt Werte, die größer als B^* sind, durch Schrotrauschen ab.

Wenn Δf genügend klein ist und die Frequenzabhängigkeit von benutzten Parametern berücksichtigt wird, kann die minimal detektierbare Leistung bestimmt werden.

4.4 Multiplikationsrauschen

In einer Lawinen-Photodiode wird parallel zum generierten Photostrom noch eine zusätzliche Rauschquelle entstehen. Dieses Rauschen wird Wesentlichen durch das Schrotrauschen bestimmt. Es wird ein Teil des zusätzlichen Rauschens durch den Dunkelstrom verursacht, aber dieser wird vernachlässigt.

Der Zusatzrauschfaktor $F_{noise}(M)$ wird durch die folgende Beziehung beschrieben:

$$F_{noise}(M) = kM + (1 - k)(2 - \frac{1}{M}) \quad (4.8)$$

dabei sind:

M ... Multiplikationsfaktor

k ... Ionisierungsverhältnis

Um einen geringen Zusatzrauschfaktor erreichen zu können, muss das Ionisierungskoeffizientenverhältnis möglichst klein sein.

4.5 Bitfehlerwahrscheinlichkeit (BER)

Das Verhältnis der falsch empfangenen Bits zur Anzahl der gesendeten Bits wird als Bitfehlerwahrscheinlichkeit (BER) bezeichnet und kann folgendermaßen geschrieben werden.

$$BER = \frac{\text{Anzahl der fehlerhaften bits}}{\text{Anzahl der übertragenen bits}} \quad (4.9)$$

BER-Wert wird häufig von $< 10^{-9}$ genommen [8].

Der Zusammenhang zwischen der Bitfehlerwahrscheinlichkeit (BER) und dem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) kann als Formel wie folgt beschrieben werden [7]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{8} \frac{P_s}{NEP}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{8} 10^{\frac{SNR_{db}}{10}}} \right) \quad (4.10)$$

wobei $\operatorname{erfc}(x)$ die sogenannte error function ist:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (4.11)$$

In Abbildung 4.6 ist dieser Zusammenhang aufgezeigt.

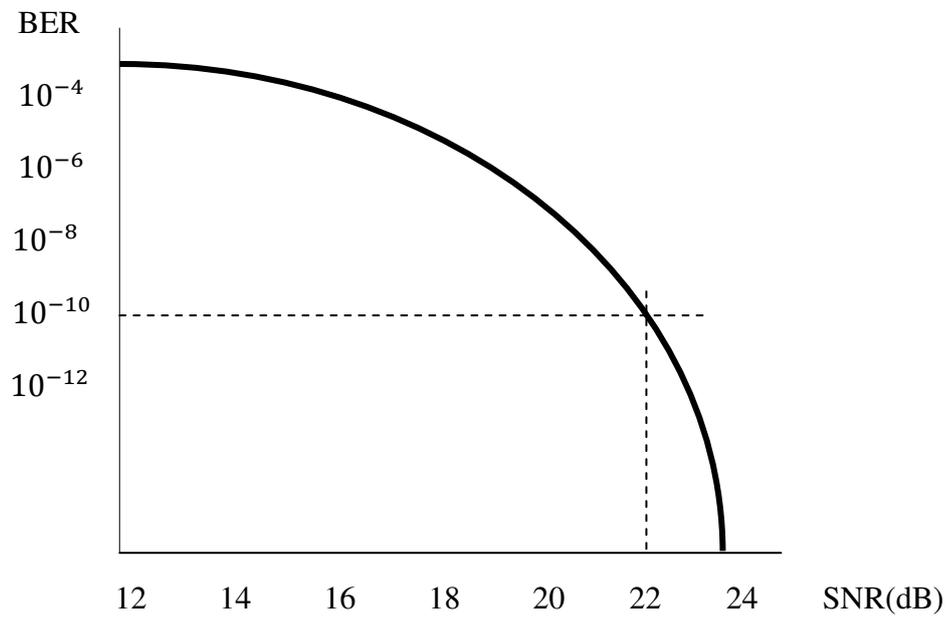


Abb.4.6: Zusammenhang zwischen BER und SNR [4]

Mit wachsender SNR wird BER geringer. Für beispielsweise BER von 10^{-10} ergibt sich SNR von 22 dB.

5 Auswahl von Photodioden

In den folgenden Abschnitten werden unterschiedliche Photodioden von verschiedenen Herstellern vorgestellt.

5.1 PIN-Photodioden

5.1.1 BPW 34 S

Die BPW 34 S ist eine Silizium-PIN-Photodiode, die von der Firma OSRAM (Opto Semiconductors)-Deutschland hergestellt wird. In Abbildung 5.1 ist eine BPW 34 S Photodiode dargestellt.

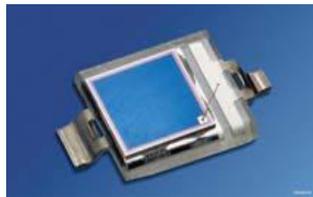


Abb.5.1: BPW 34 S Photodiode [17]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 400 ... 1100 nm
- Kurze Schaltzeit (typ. 20 ns)
- Geeignet für Reflow Löten
- DIL-Plastikbauformen mit hoher Packungsdichte

Anwendungen:

- Lichtschranken
- Industrieelektronik
- Messen / Steuern / Regeln
- IR-Fernsteuerung

Kennwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

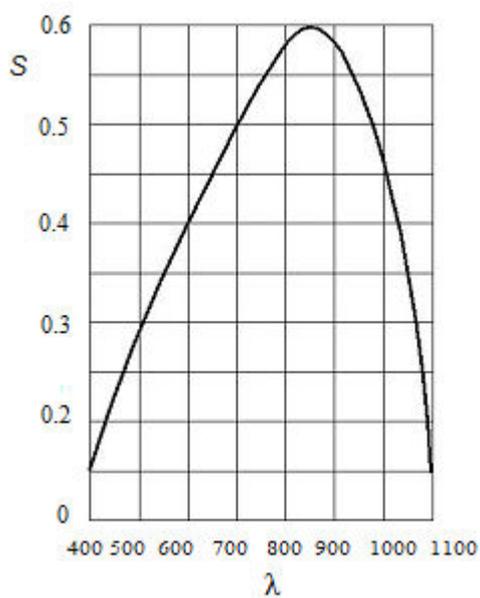
Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Photoempfindlichkeit ($V_R = 5\text{ V}$, standard licht A, $T = 2856\text{ K}$)	S_{ph}	80 (≥ 50)	nA/lx
Photostrom ($E_v = 1000\text{ lx}$, Std. Licht A, $V_R = 5\text{ V}$)	I_{ph}	80 (≥ 50)	μA
Wellenlänge der max. Empfindlichkeit	$\lambda_p\text{ max}$	850	nm
Spektraler Bereich der Empfindlichkeit	λ	400...1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche	A	7.02	mm^2
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche	$L \times W$	2.65x2.65	$mm \times mm$
Halbwinkel	ϕ	± 60	$^\circ$
Dunkelstrom ($V_R = 10\text{ V}$)	I_R	2 (≤ 30)	nA
Spektrale Empfindlichkeit ($\lambda = 850\text{ nm}$)	S	0.6	A/W
Leerlaufspannung $E_e = 1mW/cm^2$	V_{oc}	365	mV
Kurzschlussstrom $E_e = 1mW/cm^2$	I_{sc}	80	μA
Kapazität $E_e = 0mW/cm^2$, $f = 1MHz$, $V_R = 0V$	C_t	72	pF
Anstiegszeit	t_r	0.02	μS
Abfallzeit $V_R = 5V$, $R_L = 50\Omega$	t_f	0.02	μS

Tabelle 5.1: Elektro/optische Eigenschaften der BPW 34 S PIN-Photodiode

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

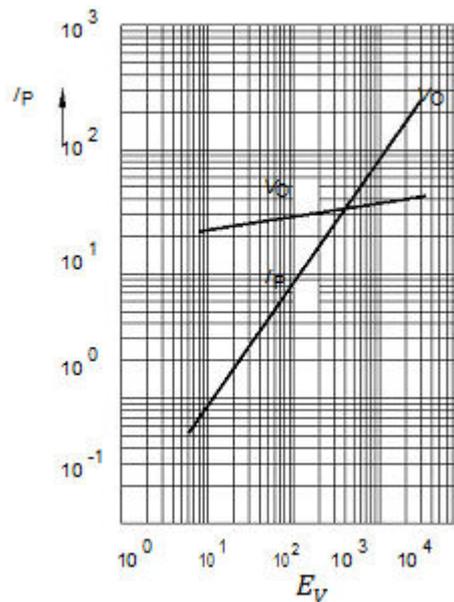
Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	-40 ... +100	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-40 ... +100	$^\circ\text{C}$
Sperrspannung	V_R	32	V
Verlustleistung	P_{tot}	150	mW

Tabelle 5.2: Grenzwerte der BPW 34 S PIN-Photodiode



S (A/W)... Empfindlichkeit

λ (nm)... Wellenlänge

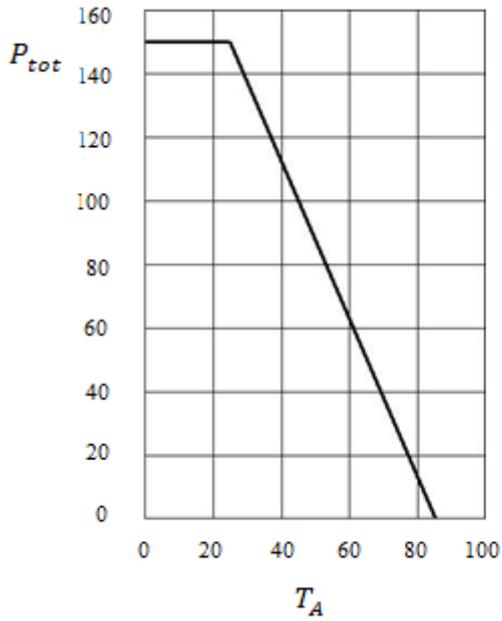


I_p (μA)... Photostrom

E_v (V)... Leerlaufspannung

Abb.5.2: Relative Empfindlichkeit [17]

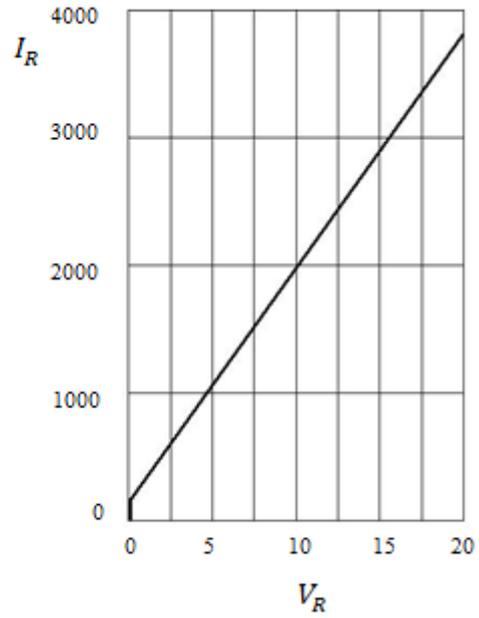
Abb.5.3: Photostrom / Leerlaufspannung [17]



P_{tot} (mW)... Verlustleistung

T_A (°C)... Temperatur

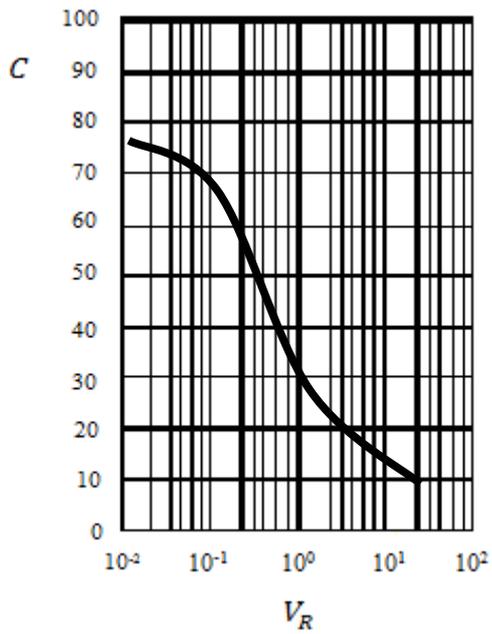
Abb.5.4: Verlustleistung [17]



I_R (nA)... Dunkelstrom

V_R (V)... Sperrspannung

Abb.5.5: Dunkelstrom [17]



C (pF)... Kapazität

V_R (V)... Sperrspannung

Abb.5.6: Kapazität [17]

5.1.2 PD15-21B/TR8

Die PD15-21B/TR8 ist eine Hochgeschwindigkeit und hoch sensible Silizium-PIN-Photodiode in einem Miniatur Flachdraufsicht SMD-Gehäuse. Die wird in der Firma Everlight Electronics (Taiwan) hergestellt. Abbildung 5.7 zeigt eine PD15-21B/TR8 Photodiode.



Abb.5.7: PD15-21B/TR8 Photodiode [18]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 730 ... 1100 nm
- Kurze Reaktionszeit
- Hohe Lichtempfindlichkeit
- Kleine Übergangskapazität

Anwendungen:

- Hochgeschwindigkeit Photodetektor
- Kopierer
- Spielgeräte

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

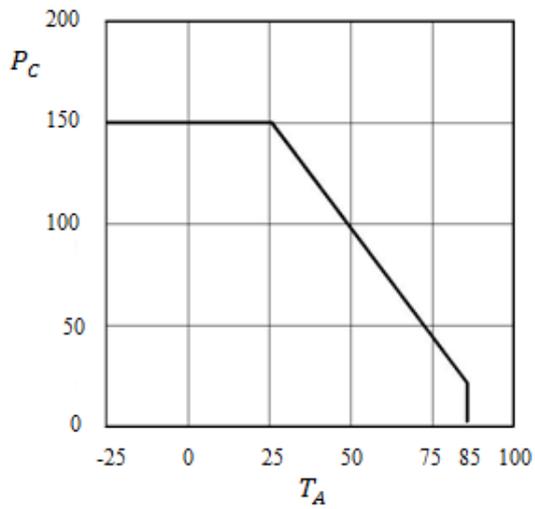
Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	-25 ... +85	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-40 ... +100	$^\circ\text{C}$
Sperrspannung	V_R	32	V
Verlustleistung	P_C	150	mW

Tabelle 5.3: Grenzwerte der PD15-21B/TR8 PIN-Photodiode

Kennwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Spektrale Wellenlänge	$\lambda_{0,5}$	730...1100	nm
Wellenlänge der Empfindlichkeit	λ_p	940	nm
Leerlaufspannung $E_e = 5\text{mW/cm}^2, \lambda_p = 940\text{nm}$	V_{oc}	0.42	V
Kurzschlussstrom $E_e = 1\text{mW/cm}^2, \lambda_p = 875\text{nm}$	I_{sc}	0.8	μA
Dunkelstrom $E_e = 0\text{mW/cm}^2, V_R = 10\text{V}$	I_D	10	nA
Durchbruchspannung $E_e = 0\text{mW/cm}^2, I_R = 100\mu\text{A}$	B_{VR}	170	V
Kapazität $E_e = 0\text{mW/cm}^2, f = 1\text{MHz}, V_R = 5\text{V}$	C_t	5	pF
Anstiegszeit	t_r	6	nS
Abfallzeit $V_R = 5\text{V}, R_L = 1000\Omega$	t_f	6	nS

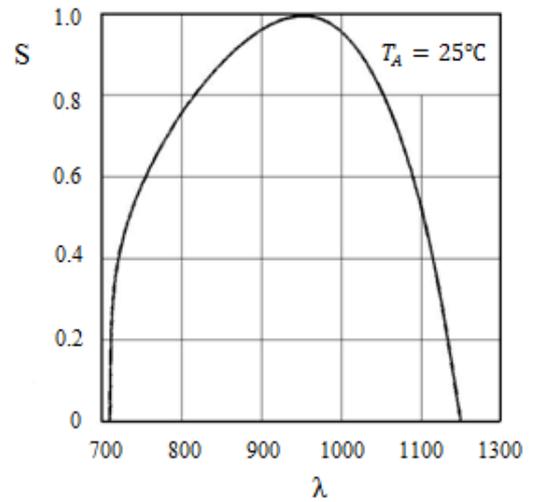
Tabelle 5.4: Elektro/optische Eigenschaften der PD15-21B/TR8 PIN-Photodiode



P_C (mW) ... Verlustleistung

T_A (°C) ... Temperatur

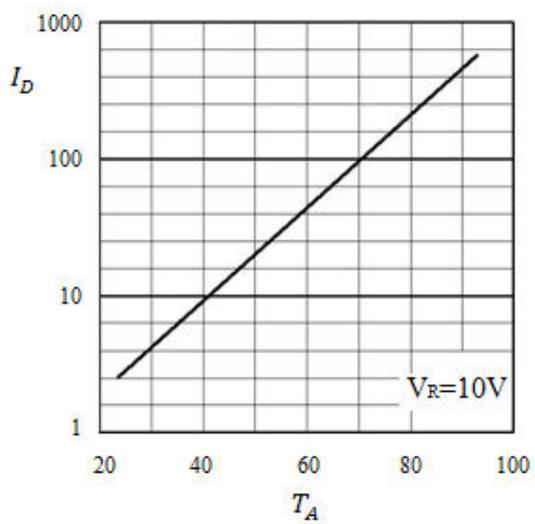
Abb.5.8: Verlustleistung [18]



S (A/W) ... Empfindlichkeit

λ (nm) ... Wellenlänge

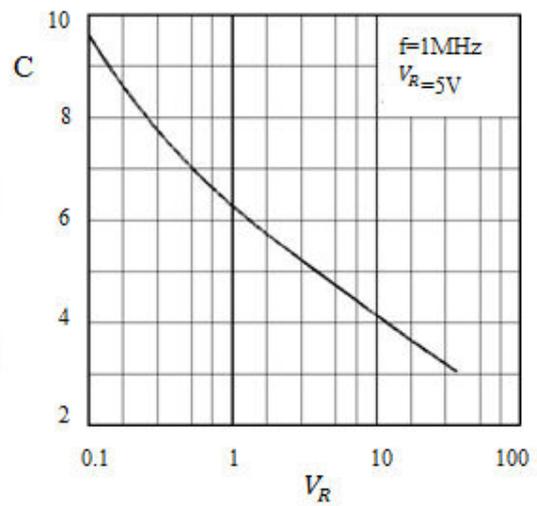
Abb.5.9: Spektrale Empfindlichkeit [18]



I_D (nA) ... Dunkelstrom

T_A (°C) ... Temperatur

Abb.5.10: Dunkelstrom [18]



C (pF) ... Kapazität

V_R (V) ... Sperrspannung

Abb.5.11: Kapazität [18]

5.1.3 BPV23NF

Die BPV23NF ist eine Silizium-PIN-Photodiode mit hoher Geschwindigkeit und hoher Strahlungsempfindlichkeit in einem schwarzen Kunststoffgehäuse mit Seitenansicht und Tageslichtsperrfilter. Die wird von der Firma Vishay (United States) hergestellt. In Abbildung 5.12 ist eine BPV23NF Photodiode aufgezeigt.

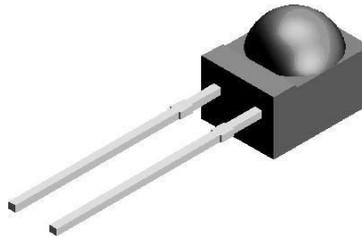


Abb.5.12: BPV23NF Photodiode [19]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 790 ... 1100 nm
- Pakettyp: verbleit
- Dimensionen (in nm): 4.5x5x6
- Bereich der Strahlungsempfindlichkeit (in nm): 4.4
- Hohe Strahlungsempfindlichkeit
- Schnelle Reaktionszeiten
- Halbwinkel der Empfindlichkeit: $\varnothing = \pm 60^\circ$

Anwendungen:

- Hochgeschwindigkeits-Detektor für Infrarotstrahlung
- Infrarot-Fernbedienungen und freie Luftdatenübertragungssysteme

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

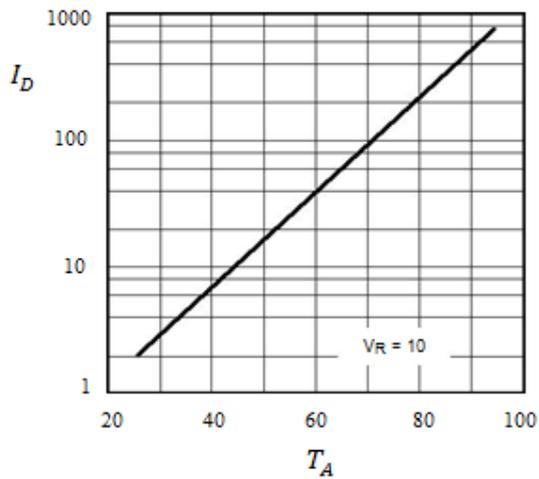
Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	-40 ... +100	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-40 ... +100	$^\circ\text{C}$
Sperrspannung	V_R	60	V
Verlustleistung	P_C	215	mW

Tabelle 5.5: Grenzwerte der BPV23NF PIN-Photodiode

Kennwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Spektrale Wellenlänge	$\lambda_{0.5}$	790...1050	nm
Wellenlänge der Empfindlichkeit	λ_p	940	nm
Leerlaufspannung	V_{oc}	390	mV
$E_e=1\text{mW}/\text{cm}^2, \lambda_p=950\text{nm}$			
Kurzschlussstrom	I_{sc}	65	μA
$E_e=1\text{mW}/\text{cm}^2, \lambda_p=950\text{nm}$			
Dunkelstrom	I_D	2	nA
$E_e=0\text{mW}/\text{cm}^2, V_R=10\text{V}$			
Durchbruchspannung	B_{VR}	60	V
$E_e=0\text{mW}/\text{cm}^2, I_R=100\mu\text{A}$			
Kapazität	C_t	48	pF
$E_e=0\text{mW}/\text{cm}^2, f=1\text{MHz}, V_R=0\text{V}$			
Anstiegszeit	t_r	70	nS
Abfallzeit	t_f	70	nS
$V_R=10\text{V}, R_L=1000\Omega$			

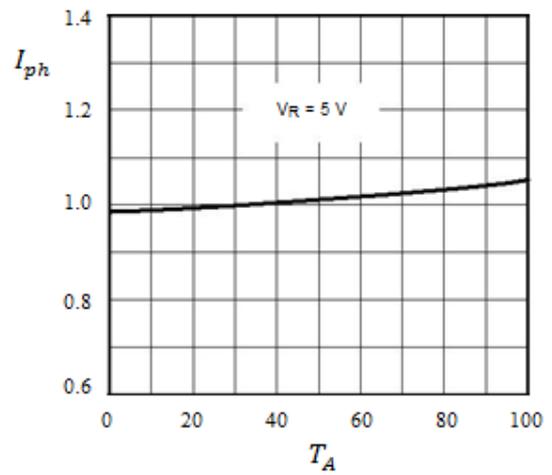
Tabelle 5.6: Elektro/optische Eigenschaften der BPV23NF PIN-Photodiode



I_D (nA)... Dunkelstrom

T_A (°C)... Temperatur

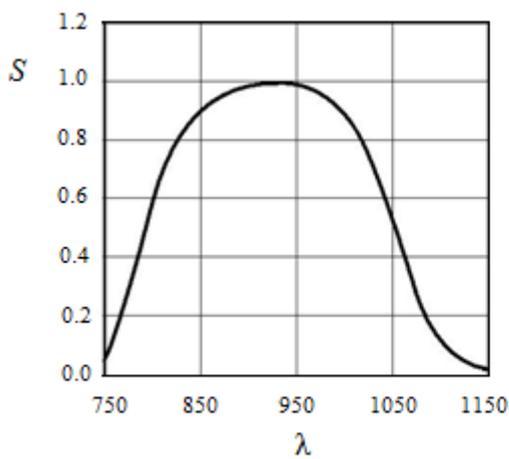
Abb.5.13: Dunkelstrom [19]



I_{ph} (µA)... Photostrom

T_A (°C)... Temperatur

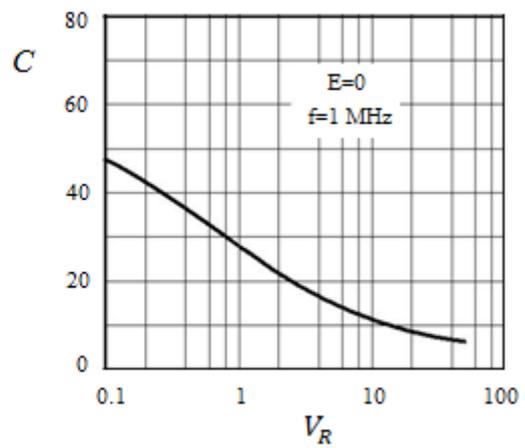
Abb.5.14: Photostrom [19]



S (A/W)... Empfindlichkeit

λ (nm)... Wellenlänge

Abb.5.15: Empfindlichkeit [19]



C (pF)... Kapazität

V_R (V)... Sperrspannung

Abb.5.16: Kapazität [19]

5.1.4 QSE773

Die QSE773 ist eine Kunststoff Silizium PIN-Photodiode in einem Seitenansicht Gehäuse, die von der Firma Fairchild (United States) hergestellt wird. Abbildung 5.17 zeigt QSE773 PIN-Photodiode.



Abb.5.17: QSE773-PIN-Photodiode [20]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 750 ... 1100 nm
- Tageslichtsperrfilter
- Schnelle PIN-Photodiode
- Breite Empfangswinkel: 120°
- Chipgröße: 2.71mm x 2.71mm
- Hohe Empfindlichkeit
- Kleine Kapazität

Anwendungen:

- Hochgeschwindigkeit Detektoren
- Position- oder Bewegungssensor

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

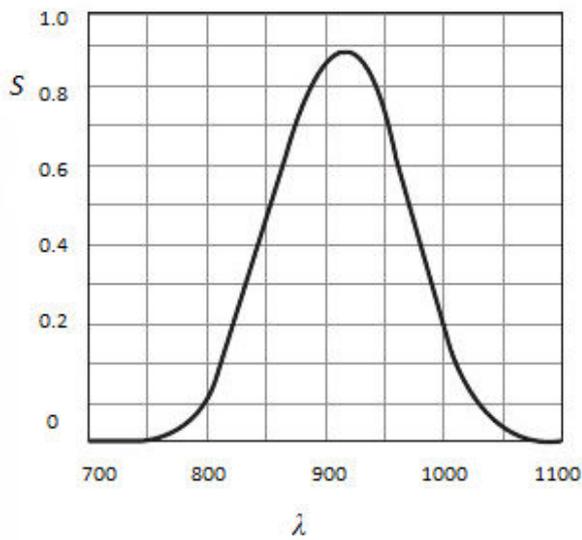
Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	-40 ... +85	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-40 ... +85	$^\circ\text{C}$
Sperrspannung	V_R	32	V
Verlustleistung	P_C	150	mW

Tabelle 5.7: Grenzwerte der QSE773 PIN-Photodiode

Kennwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Spektrale Wellenlänge	$\lambda_{0.5}$	750...1050	nm
Wellenlänge der Empfindlichkeit	λ_p	940	nm
Sperrspannung $E_e=0\text{mW}/\text{cm}^2, I_R=0.1\text{mA}$	V_R	390	mV
Kurzschlussstrom $E_e=1\text{mW}/\text{cm}^2, \lambda_p=950\text{nm}$	I_{sc}	18	μA
Dunkelstrom $E_e=0\text{mW}/\text{cm}^2, V_R=10\text{V}$	I_D	30	nA
Photostrom $E_e=1\text{mW}/\text{cm}^2, V_R=5\text{V}$	I_{Ph}	30	μA
Kapazität $E_e=0\text{mW}/\text{cm}^2, f=1\text{MHz}, V_R=3\text{V}$	C_t	25	pF
Anstiegszeit	t_r	50	nS
Abfallzeit $V_R=5\text{V}, R_L=1000\Omega$	t_f	50	nS

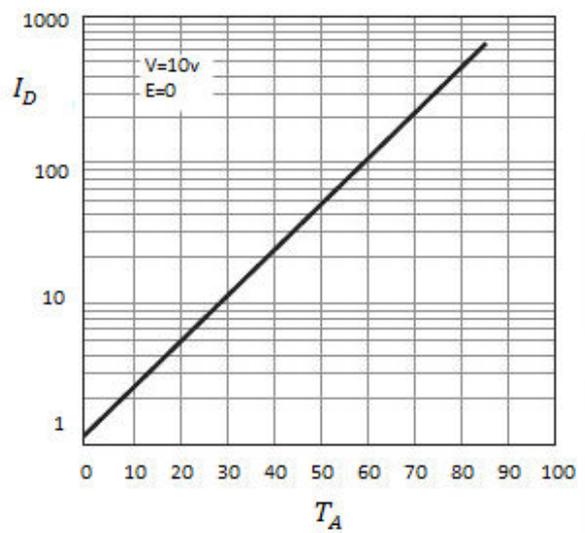
Tabelle 5.8: Elektro/optische Eigenschaften der QSE773 PIN-Photodiode



S (A/W)... Empfindlichkeit

λ (nm) ... Wellenlänge

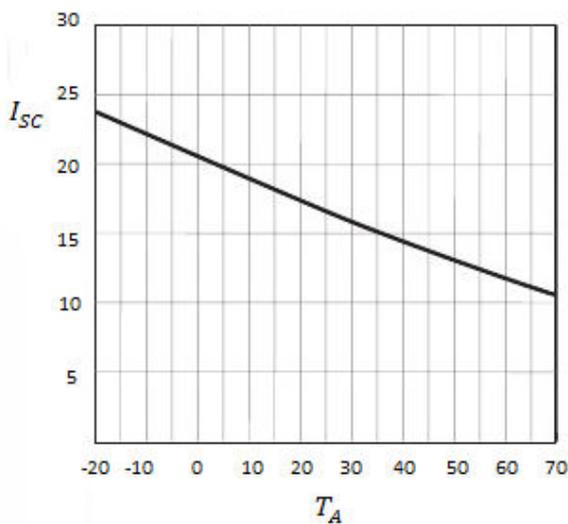
Abb.5.18: Empfindlichkeit [20]



I_D (nA)... Dunkelstrom

T_A (°C)... Temperatur

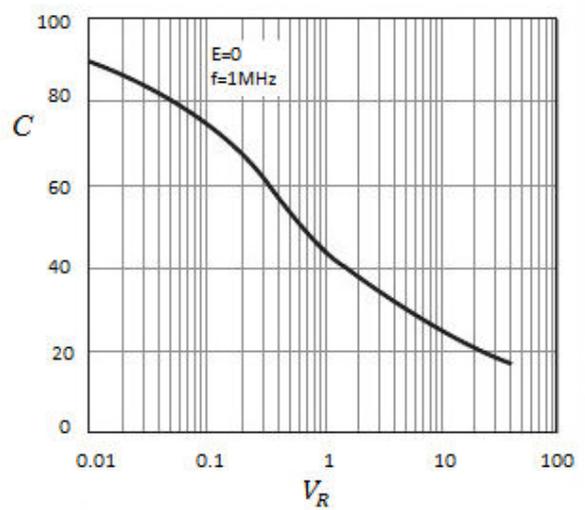
Abb.5.19: Dunkelstrom [20]



I_{SC} (μA) ... Kurzschlussstrom

T_A (°C) ... Temperatur

Abb.5.20: Kurzschlussstrom [20]



C (pF) ... Kapazität

V_R (V) ... Sperrspannung

Abb.5.21: Kapazität [20]

5.2 APD-Photodioden

5.2.1 G8931-20

Die G8931-20 ist eine InGaAs Lawinen-Photodiode, die zur Abstandmessung, räumliche Lichtdurchlässigkeit und geringe Lichtpegelerkennung entwickelt ist. Trotz des großen aktiven Bereiches $\varnothing 0.2mm$ bietet G8931-20 eine Hochgeschwindigkeitsantwort (typisch Grenzfrequenz 0.9 GHz bei M=10). Diese wird von der Firma Hamamatsu (Japan) hergestellt.

In Abbildung 5.22 ist eine G8931-20 Lawinen Photodiode aufgezeigt.



Abb.5.22: G8931-20 Lawinen-Photodiode [21]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 0.95 ... 1.7 μm
- Aktive Fläche: $\varnothing 0.2mm$
- Niederspannungsbetrieb
- Niedrige Kapazität
- Hohe Empfindlichkeit
- Niedriger Dunkelstrom

Anwendungen:

- Abstandmessungen
- Räumliche Lichtübertragung
- OTDR (optical time-domain reflectometer)
- Erkennung des klein Lichtsignals

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

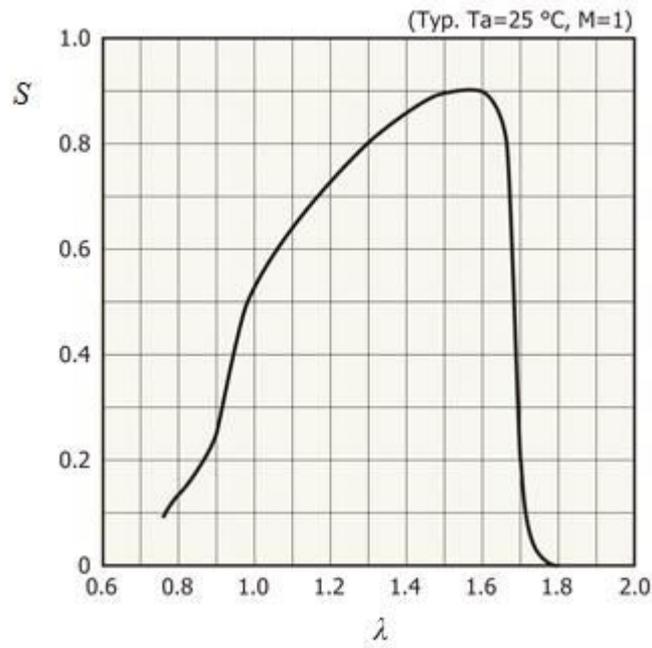
Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	-40 ... +85	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-55 ... +125	$^\circ\text{C}$
Sperrstrom	I_R	2	mA
Durchlassstrom	I_F	2	mA

Tabelle 5.9: Grenzwerte der G8931-20 APD-Photodiode

Kennwerte($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Spektrale Wellenlänge	$\lambda_{0.5}$	0.95 ... 1.7	μm
Wellenlänge der Empfindlichkeit	λ_p	1.55	μm
Durchbruchspannung $I_D=100\mu\text{A}$	V_{BR}	60	V
Temperaturkoeffizient von V_{BR} -40 ... +85 $^\circ\text{C}$	Γ	0.11	$\text{V}/^\circ\text{C}$
Dunkelstrom $V_R=V_{BR} \times 0.9$	I_D	150	nA
Empfindlichkeit $\lambda=1.55\mu\text{m}, M=1$	S	0.9	A/W
Kapazität $f=1\text{MHz}, V_R=V_{BR} \times 0.9$	C_t	1.5	pF
Grenzfrequenz $M=10$	f_c	0.9	GHz

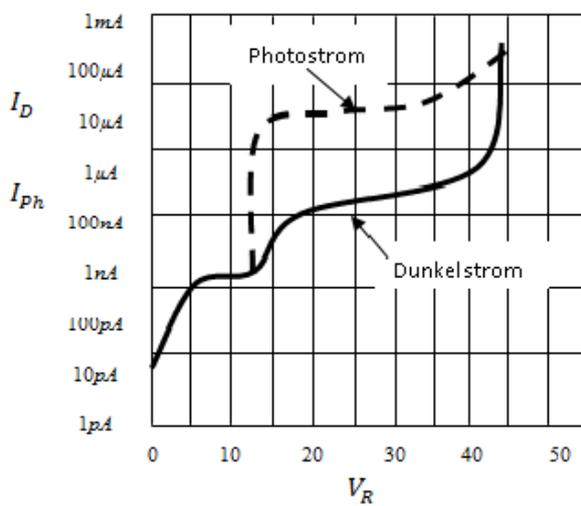
Tabelle 5.10: Elektro/optische Eigenschaften der G8931-20 APD-Photodiode



S (A/W)... Empfindlichkeit

$\lambda(\mu\text{m})$... Wellenlänge

Abb.5.23: Empfindlichkeit [21]

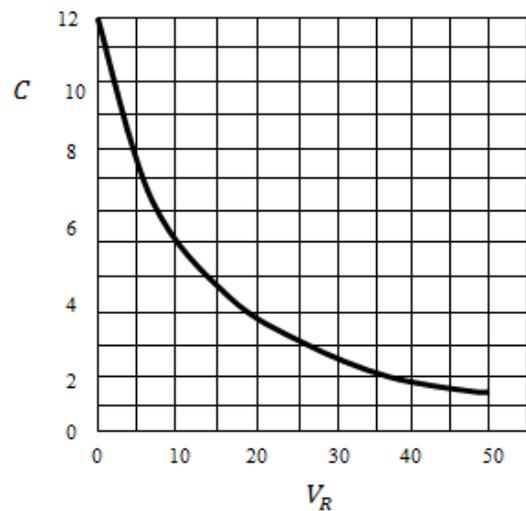


I_D ... Dunkelstrom

I_{Ph} ... Photostrom

$V_R(V)$... Sperrspannung

Abb.5.24: Dunkelstrom, Photostrom [21]



C (pF)... Kapazität

$V_R(V)$... Sperrspannung

Abb.5.25: Kapazität [21]

5.2.2 SAE500NX

Die SAE500NX ist eine Silizium-Lawinen-Photodiode mit hoher Empfindlichkeit und extrem schnelle Anstiegs- und Abfallzeiten. Die wird von der Firma Laser Components (Deutschland) hergestellt. Abbildung 5.26 zeigt eine SAE500NX Lawinen-Photodiode.

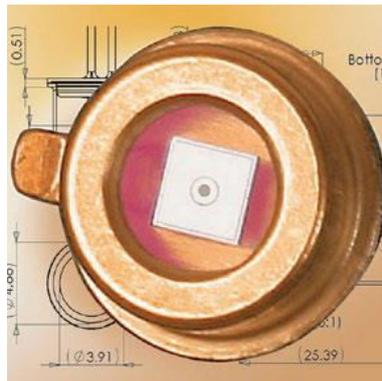


Abb.5.26: SAE500NX Lawinen-Photodiode [22]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 550 ... 1050 nm
- Hohe Quanteneffizienz
- Niedriger Rauschen
- Hohe Geschwindigkeit
- Multiplikationsverstärkung, $M > 100$ verfügbar
- 500 μm Durchmesser Aktive Fläche
- Stufenweise Multiplikationskurven
- Breiter Betriebstemperaturbereich

Anwendungen:

- Entfernungsmesser
- Optische Kommunikationssysteme

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	-40 ... +75	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-55 ... +100	$^\circ\text{C}$
Sperrstrom	I_R	1	mA
Durchlassstrom	I_F	5	mA

Tabelle 5.11: Grenzwerte der SAE500NX PIN-Photodiode

Kennwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$), $M=100$

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Durchbruchspannung $I_D=10\mu\text{A}$	V_{BR}	230	V
Temperaturkoeffizient von V_{BR} -40 ... +75 $^\circ\text{C}$	Γ	0.6	$\text{V}/^\circ\text{C}$
Dunkelstrom	I_D	1	nA
Empfindlichkeit $\lambda=950 \text{ nm}$	S	50	A/W
Kapazität	C_t	2	pF
Anstiegszeit $M=100$	t_r	500	psec
Rauschen	i_{nose}	0.2	$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$

Tabelle 5.12: Elektro/optische Eigenschaften der SAE500NX APD-Photodiode

5.2.3 SPM1-T

Die SPM1-T ist eine Lawinen-Photodiode mit hoher Verstärkung und ein sehr schnelles Pulsantwortverhalten. Die wird von der Firma Newport (United States) hergestellt. Abbildung 5.27 zeigt eine SPM1-T Lawinen-Photodiode.



Abb.5.27: SPM1-T Lawinen Photodiode [23]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 400 ... 1100 nm
- Kompakter, robuster und stabiler Detektor mit integriertem Netzteil und TE-Kühler
- Hohe Verstärkung (10⁶)
- Niedrige Bias Spannungen (30 V)
- Schnelle Anstiegszeit (<5 ns)
- Niedrige Dunkelzählrate (<1MHz)
- Große Sensorfläche von bis zu 9 mm²

Anwendungen:

- Fluoreszenz-Lebensdauermessungen
- Biologische Sensoren
- Konfokale Mikroskopie
- Nuklearmedizin
- Umweltüberwachung
- Detektion nuklearer Strahlung
- Hochenergie-Physik
- Entfernungsmessung

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	-20 ... +40	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-30 ... +85	$^\circ\text{C}$

Tabelle 5.13: Grenzwerte der SPM1-T APD-Photodiode

Kennwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Spektrale Wellenlänge	λ	400 ... 1100	nm
Betriebsspannung $\lambda=520nm$	V_A	29.9	V
Empfindlichkeit $\lambda=520nm$	S	55	A/W
Kapazität $f=1MHz, V_R=V_{BR} \times 0.9$	C_t	130	pF
Grenzfrequenz $3 db/punkt$	f_c	1	MHz

Tabelle 5.14: Elektro/optische Eigenschaften der SPM1-T APD-Photodiode

5.2.4 DSC-R402APD

Die DSC-R402 ist eine InGaAs Lawinen-Photodiode, die eine sehr hohe Empfindlichkeit und einen rauscharmen Verstärkung bietet. Die wird von der Firma Discovery Semiconductors, Inc (United States) hergestellt. In Abbildung 5.28 ist eine DSC-R402 Lawinen Photodiode gezeigt.



Abb.5.28: DSC-R402 Lawinen-Photodiode [24]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 950 ... 1650 nm
- Extrem hohe Empfindlichkeit von -26 dBm
- Niedriger Kapazität
- Sehr schnelle InGaAs APD
- Rauscharm
- Hohe Verstärkung
- Hermetisch dicht
- Hohe Empfindlichkeit

Anwendungen:

- U-Bahn und Fernverkehr
- DWDM-Systeme (Dense Wavelength Division Multiplexing)
- SONET/SDH-Systeme (Synchronous Optical Networking / Synchronous Digital Hierarchy)

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	0 ... +70	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-40 ... +85	$^\circ\text{C}$
Max APD Durchbruchspannung bei 10 μA	V_{BR}	+40	V
Max Amp Bias	V_{DD}	+8.5	V
Optische Eingangsleistung (Zerstörungsgrenze) M=3	P_{input}	+3	<i>dB peak</i>

Tabelle 5.15: Grenzwerte der DSC-R402 APD-Photodiode

Kennwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Wellenlänge	λ	950 ... 1650	<i>nm</i>
Durchbruchspannung $I_D=10\mu\text{A}$	V_{BR}	37	V
Temperaturkoeffizient von V_{BR} -40 ... +85 $^\circ\text{C}$	Γ	0.15%/ $^\circ\text{C}$	V/ $^\circ\text{C}$
Verlustleistung	P_C	880	<i>mW</i>
Empfindlichkeit $\lambda=1.55\mu\text{m}, M=1$	S	0.7	<i>A/W</i>
Elektrische Rückflussdämpfung		-10	<i>dB</i>
Optische Rückflussdämpfung		30	<i>dB</i>
Grenzfrequenz	f_C	30	<i>KHz</i>

Tabelle 5.16: Elektro/optische Eigenschaften der DSC-R402APD-Photodiode

5.2.5 7510-APD

Die 7510 ist eine Lawinen-Photodiode mit einer hohen Verstärkung und geringer Rauschentwicklung. Sie wird von der Firma Analog Modules (United States) hergestellt. Abbildung 5.29 zeigt eine 7510 Lawinen-Photodiode.



Abb.5.29: 7510-Lawinen Photodiode [25]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 1.0 ... 1.7 μm
- Spitzenleistung bei geringer NEP (Noise equivalent power)
- Ausgezeichnete Dynamikbereich $> 30 \text{ dB}$
- Bandbreite: 100 MHz
- Enthält den Temperatursensor
- Hermetische Gehäuse
- 200 μm InGaAs APD Detektor

Anwendungen:

- Augensicherer Sensoren
- Medizintechnik Anwendungen
- Labormesstechnik
- Entfernungsmessung
- LIDAR (Light detection and ranging)

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	-40 ... +80	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-55 ... +85	$^\circ\text{C}$
Bias-Strom	I_B	70	$n\text{A}$
Vorspannung	V_B	50	V

Tabelle 5.17: Grenzwerte der 7510 APD-Photodiode

Kennwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
InGaAs APD aktiver Durchmesser		200	μm
Temperaturkoeffizient +80 $^\circ\text{C}$	Γ	0.14	$\text{V}/^\circ\text{C}$
Temperatursensor		-2.5	$\text{mV}/^\circ\text{C}$
Empfindlichkeit $\lambda=1.55 \mu\text{m}$	S	1	A/W
Bandbreite (3dB)	B	100	MHz
Eingangsleistung	P_{input}	+5 ... -5	VDC
Eingangsstrom 13(-5V)	I_{input}	18(+5V)	mA
Äquivalente Rauschleistung	NEP	3	$n\text{W}$

Tabelle 5.18: Elektro/optische Eigenschaften der 7510 APD-Photodiode

5.3 G4176 MSM-Photodiode

Die G4176 ist eine GaAs-MSM (Metal-Semiconductor-Metal) Photodiode mit einer ultraschnellen Antwortzeiten. Die wird von der Firma Hamamatsu (Japan) realisiert. In Abbildung 5.30 ist eine G4176 MSM-Photodiode gezeigt.



Abb.5.30: G4176-MSM-Photodiode [26]

Besondere Merkmale:

- Wellenlängenbereich: 450 ... 870 nm
- Ultraschnelle Reaktion: $t_r, t_f=30$ pS
- Niedriger Dunkelstrom: $100\mu\text{A}$ ($T_A = 25^\circ\text{C}$)
- Größe lichtempfindliche Fläche: $200\mu\text{m}$
- Chipgröße: $1\text{mm} \times 1\text{mm}$

Anwendungen:

- Optische Hochgeschwindigkeits-Signalmessungen
- Optische Kommunikation

Grenzwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

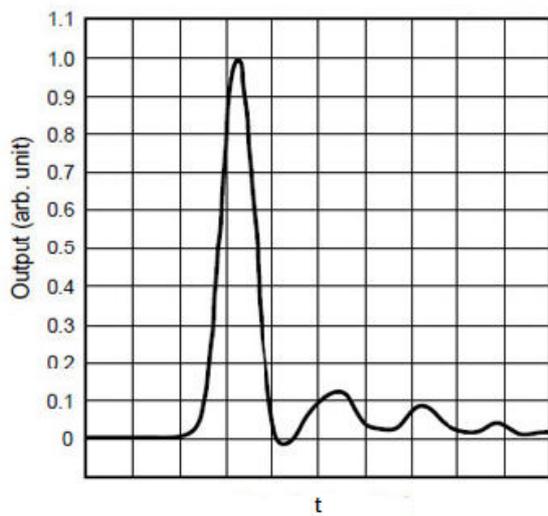
Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebstemperatur	T_{op}	-40 ... +85	$^\circ\text{C}$
Lagertemperatur	T_{stg}	-40 ... +100	$^\circ\text{C}$
Eingangslicht			
Impulsbreite: $\leq 1\text{ns}$	ϕ	50	mW
$> 1\text{ns}$		5	mW
Vorspannung	V_B	± 10	V

Tabelle 5.19: Grenzwerte der G4176 MSM-Photodiode

Kennwerte ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

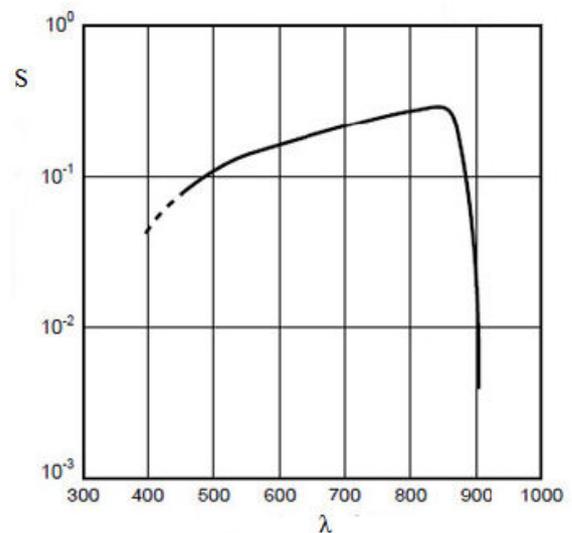
Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Spektrale Wellenlänge	λ	450... 870	nm
Wellenlänge der Empfindlichkeit	λ_p	850	nm
Äquivalente Rauschleistung	NEP	3×10^{-15}	W/\sqrt{Hz}
$\lambda=850nm$			
Dunkelstrom	I_D	100	pA
Empfindlichkeit	S	0.3	A/W
$\lambda=850nm$			
Kapazität	C_t	0.3	pF
Anstiegszeit	t_r	30	$psec$
Abfallzeit	t_f	30	$psec$
10 bis 90 %			

Tabelle 5.20: Elektro/optische Eigenschaften der G4176 MSM-Photodiode



t (0.1 ns/div) ... Zeit

Abb.5.31: Optischer Impulsantwort [26]



S (A/W) ... Empfindlichkeit

λ (nm) ... Wellenlänge

Abb.5.32: Empfindlichkeit [26]

5.4 Vergleich der Eigenschaften von Photodioden

In diesen Abschnitt werden die wichtigsten Eigenschaften von präsentierten Photodioden zusammengefasst und verglichen. Für die Auswahl einer Photodiode zum Aufbau eines Photoempfängers in optischen Übertragungssystemen sind mehrere Parameter maßgebend. In erster Linie ist das die Empfindlichkeit, dann die Diodenkapazität und die Vorspannung. Um einen guten zuverlässigen Empfänger zu schaffen, soll die Photodiode eine hohe Empfindlichkeit, kleine Kapazität und eine kleine Vorspannung haben.

Typen von Photodioden	Bezeichnung				
	Wellenlänge λ (nm)	Betriebstemperatur T_{op} (°C)	Vorspannung V_B (V)	Empfindlichkeit $S(A/W)$	Kapazität C (pF)
PIN-Photodioden					
• BPW 34 S	400 ... 1100	-40 ... +100	32	0.6	72
• PD15-21B	730 ... 1100	-25 ... +85	32	1.0	5
• BPV23NF	790 ... 1050	-40 ... +100	60	1.0	48
• QSE773	750 ... 1100	-40 ... +85	32	0.88	25
APD-Photodioden					
• G8931-20	950 ... 1700	-40 ... +85	60	0.9	1.5
• SAE500NX	550 ... 1050	-40 ... +75	230	50	2
• SPM1-T	400 ... 1100	-20 ... +40	30	55	130
• DSC-R402	950... 1650	0 ... +70	40	0.7	
• 7510	1000...1700	-40 ... +80	50	1.0	
MSM-Photodiode					
• G4176	450 ... 870	-40 ... +85	10	0.3	0.3

Tabelle 5.21: Vergleich der Eigenschaften von Photodioden

Wenn man neben diesen Parametern noch die Datenrate und den Preis als zwei von wichtigsten Parametern für die Auswahl von Photodioden einfügt, ergibt sich nach folgender Tabelle, dass die PIN-Photodiode in allen Parametern einen guten Kompromiss darstellt und aus diesem Grund wäre sie eine gute Wahl.

	Photodiodentypen		
	PIN	APD	MSM
Vorspannung (V)	32 ... 60	30 ... 230	10
Empfindlichkeit (A/W)	0.6 ... 1.0	0.7 ... 55	0.3
Kapazität (pF)	5 ... 72	1.5 ... 130	0.3
Datenrate (Gbit/s)	bis zu 40	bis zu 10	bis zu 10
Preis (€)	ab 1.00	ab 50.00	ab 100.00

Tabelle 5.22: Parametervergleich

6 Schlussfolgerungen

In der durchgeführten Arbeit wurden die charakteristischen Eigenschaften von verschiedenen Photodioden und die Möglichkeiten deren Anwendungen untersucht. Zunächst wurden die wichtigsten Teile eines optischen Übertragungssystems vorgestellt. Im Prinzip besteht ein optisches Übertragungssystem aus einem Sender, einem Übertragungsmedium und einem Empfänger. Der Sender wandelt das elektrische Signal in ein optisches Signal um, wofür hauptsächlich Laserdioden verwendet werden. Durch das Übertragungsmedium wird das optische Signal übermittelt, wobei sowohl Lichtwellenleiter als auch der Freiraum (Luft) genutzt werden können. Um das optische Signal wieder in die elektrische Domäne umwandeln zu können, benötigt man am Empfangsort des optischen Übertragungssystems einen optischen Detektor. Die am häufigsten verwendeten optischen Empfänger sind Photodioden.

Im Hauptteil wurden die Eigenschaften und die Charakteristik verschiedener Photodiodentypen (PIN, APD, MSM) untersucht. Hierbei war das Augenmerk vor allem auf die Aufbauformen und Materialien, sowie die wichtigsten Parameter von Photodioden gerichtet. Es wurde im Detail auf die Empfindlichkeit, die Kapazität und das Frequenzverhalten eingegangen. Im speziellen wurde eines der wichtigsten Merkmale der Photodiode, das Rauschen untersucht. Beim Betrieb der Photodiode wurden verschiedene Rauschquellen, wie z.B. das thermische Rauschen oder Schrotrauschen berücksichtigt und analysiert.

Zum besseren Verständnis der Funktionsweise verschiedener Photodiodentypen wurden im Anschluss (in einer zusammenstellenden und vergleichenden Analyse) die unterschiedlichen Photodioden von diversen Herstellern untersucht und evaluiert. Dabei wurden die wichtigsten Parameter und die relevanten Eigenschaften gegenüber gestellt und eine Empfehlung zur Auswahl der Photodiode für die Anwendung in optischen Übertragungssystemen gegeben. Nach den abschließenden Betrachtungen zum Einsatz von Photodioden für hohe Datenraten in der modernen Kommunikationstechnik wurden im Anhang die Datenblätter der wichtigsten untersuchten Empfängerbauelemente dargestellt.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass in dieser Arbeit eine theoretische Einführung zur Entwicklung eines optischen Empfängers vorgestellt wurde. Die aktuellen optischen Empfängerschaltungen benötigen schnelle Photodioden, mit denen sich der Empfang von Daten mit Übertragungsgeschwindigkeiten im Tbit/s Bereich technisch realisieren lässt, da

immer höhere Datenraten gefordert werden und auch von den Lichtsendern zur Verfügung gestellt werden. Hierbei sind einfachere Lösungen gefragt und das Potential liegt vornehmlich in sehr preiswerten PIN-Photodioden, was vor allem das Preis Leistungsverhältnis klar hervorhebt. PIN-Photodioden stellen, in allen relevanten Parametern, die maßgeblich für die Realisierung der optischen Detektoren sind, einen guten Kompromiss dar.

Nach der theoretischen Grundlagen und der Analyse verschiedener Photodioden von diversen Herstellern konnte festgestellt werden, dass für einen guten zuverlässigen Empfänger in erster Linie eine hohe Empfindlichkeit, eine kleine Kapazität und eine kleine Vorspannung wichtig sind. Unter Berücksichtigung dieser Parameter kann optischer Empfänger gute Ergebnisse in Bezug auf hohe Datenraten liefern. Die zur Zeit beste Empfehlung, für eine Realisierung eines optischen Empfängers für zukünftige sehr hohe Datenraten, ist die PIN-Photodiode, da diese vor allem in Bezug auf Preis und Leistung punkten kann.

In Zeiten, wo immer mehr Daten produziert, übertragen und gespeichert werden, ist es natürlich noch nicht abschätzbar, in welche Richtung sich PIN-Photodioden in Zukunft entwickeln werden. Besonders in den neuen Kommunikationstechnologien für höchste Datenraten wird die Übertragung mit Licht immer wichtiger, weshalb natürlich auch die optischen und elektrooptischen Bauteile sich extrem schnell weiterentwickeln (müssen), was natürlich auch wieder zu Entwicklungen neuer Herstellungstechnologien führen wird und muss.

Vor allem die Nutzung von Internet (inklusive sozialer Netzwerke), welches ein Hauptbestandteil unseres Lebens geworden ist, treibt dabei die notwendige Übertragungskapazität immer weiter nach oben und Übertragungsraten von 10 und 100Gbit/s gehören mittlerweile zum Standard. Daher kommt der optischen Nachrichtentechnik eine wesentliche Rolle zu, da durch die hohe Trägerfrequenz (im THz Bereich) eine große nutzbare Bandbreite verfügbar ist. Abschließend möchte ich noch feststellen, dass den Empfängerschaltungen und damit den optischen Detektoren eine wesentliche Aufgabe zukommt, denn diese müssen die schnellen Daten richtig empfangen und detektieren bzw. das Signal als Demodulator in das Basisband zurückwandeln. Als Ausblick in die Zukunft möchte ich anmerken, dass die hohen Datenraten unter Nutzung der optischen Nachrichtentechnik, sowohl die Halbleiter- und Bauelemente-Hersteller, aber auch die Schaltungsentwickler und -Designer vor große Herausforderungen und innovative Aufgaben stellen werden.

Literaturverzeichnis

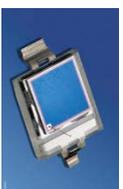
- [1] LEITGEB, E.; FASSER, P.; PLANK, Th.: Skriptum zur Vorlesung aus Optische Nachrichtentechnik, ÖH-Skriptum, TU Graz 2007
- [2] HARTH, W.; GROTHE, H.: Sende- und Empfangsdioden für die optische Nachrichtentechnik (2.Auflage), Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1998
- [3] JAHNS, J: Photonik: Grundlagen, Komponenten und Systeme, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2001
- [4] BRÜCKNER, V.: Elemente optische Netze: Grundlagen und Praxis der optischen Datenübertragung (2.Auflage), Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011
- [5] MÜLLER, R.: Halbleiter-Elektronik: Rauschen(2.Auflage), Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1990
- [6] EBELING, K.J.: Integrierte Optoelektronik: Wellenleiteroptik, Photonik, Halbleiter (2.Auflage), Springer-Verlag, 1992
- [7] BRÜCKNER, V.: Optische Nachrichtentechnik: Grundlagen und Anwendungen, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2003
- [8] VOGES, E.; PETERMANN, K.: Optische Kommunikationstechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- [9] JIN-WEI SHI; YING-HUNG CHENG; KAI-LUN CHI; JHIH-MIN WUN; YUE-MING HSIN; BENJAMIN, S.D: High-Speed, High-Efficiency, Large-Area p-i-n Photodiode for Application to Optical Interconnects from 0.85 to 1.55 μm Wavelengths, IEEE Journals & Magazines, Page(s): 3956-3961, Volume: 31, Issue: 24, 2013
- [10] BRANDL, P.; ZIMMERMANN, H.: 3Gbit/s optical receiver IC with high sensitivity and large integrated pin photodiode, IET Journals & Magazines, Page(s): 552-554, Volume: 49, Issue: 8, 2013
- [11] NADA, M.; MURAMOTO, Y.; YOKOYAMA, H.; ISHBASHI, T.; KODOMA, S.: High-sensitivity 25 Gbit/s avalanche photodiode receiver optical sub-assembly for 40 k transmission, IET Journals & Magazines, Page(s): 777-778, Volume: 48, Issue: 13, 2012
- [12] GANGULY, A.K.; GANGULY, A.; BHOUMIC, M.: High-Speed Metal Semiconductor-Metal Photodiode, IEEE Conference Publications, Page(s): 1-4, 2008
- [13] ESPINASE, P.B.; KOSIER, S.L.: What's in store for silicon photoreceivers, IEEE Journals & Magazines, Page(s): 23-31, Volume: 20, Issue: 2, 2004
- [14] STROBEL, O.; LUBKOLL, J.: Fiber-optic communication-An overview, IEEE Conference Publications, Page(s): 16-20, 2010
- [15] JACOBS, F: Optical Fiber Communication Technologyand System, IEEE Conference Publications, Page(s): 344, 1997

- [16] HAO YANG; DAUNT, C.; KOHSIN, L.; WIE HAN; GUY, F.; CORBETT, B.: High-speed and high-power InGaAs/InP Photodiode, IEEE Conference Publications, Page(s): 1-4, 2011
- [17] [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00100776_0.pdf/BPW 34 S, Lead\(Pb\) Free Product-RoHS Compliant.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00100776_0.pdf/BPW_34_S_Lead(Pb)_Free_Product-RoHS_Compliant.pdf), 13.November 2014
- [18] <http://www.everlight.com/file/ProductFile/PD15-21B-TR8.pdf>, 09.03.2015
- [19] <http://www.vishay.com/docs/81513/bpv23nf.pdf>, 09. 03. 2015
- [20] <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/QS/QSE773.pdf>, 19. 03. 2015
- [21] http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/g8931-20_kapd1019e.pdf, 09. 03. 2015
- [22] [http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets lcd series nir enhanced.pdf&prev=search](http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets_lcd_series_nir_enhanced.pdf&prev=search), 09. 03. 2015
- [23] <http://www.newport.com>, 03. 03. 2015
- [24] http://www.ic72.com/pdf_file/d/484764.pdf, 26. 03. 2015
- [25] <http://www.analogmodules.com/admincenter/datasheets/7510.pdf>, 09. 03. 2015
- [26] <http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/lsr/G4176E.pdf>, 10. 03. 2015
- [27] <http://www.itwissen.info>, 18. 03. 2015
- [28] <http://www.lehrbuch-photovoltaik.de>, 18. 03. 2015

Anhang

Silicon PIN Photodiode
Silizium-PIN-Fotodiode
Version 1.1

BPW 34 S



BPW 34 S

- Features:**
- Suitable for reflow soldering
 - Especially suitable for applications from 400 nm to 1100 nm
 - Short switching time (typ. 20 ns)
 - DIL plastic package with high packing density
- Besondere Merkmale:**
- Geeignet für Reflow Lötten
 - Speziell geeignet für Anwendungen im Bereich von 400 nm bis 1100 nm
 - Kurze Schaltzeit (typ. 20 ns)
 - DIL-Plastikgehäuse mit hoher Packungsdichte

- Applications**
- Photointerrupters
 - Industrial electronics
 - For control and drive circuits
 - IR remote control of hi-fi and TV sets, video tape recorders, dimmers, remote controls of various equipment
- Anwendungen**
- Lichtschranken
 - Industriellelektronik
 - Messen/ Steuern/ Regeln
 - IR-Fernsteuerung von Fernseh- und Rundfunkgeräten, Videorecordern, Lichtdimmern, Gerätefernsteuerungen

Ordering Information

Type:	Photocurrent Typ:	Ordering Code Bestellnummer
BPW 34 S	$E_c = 1000$ lx, Std. Light A_v , $V_a = 5$ V I_p [µA]	065110A1209

2014-01-09

1

Version 1.1

BPW 34 S

Maximum Ratings ($T_A = 25$ °C)

Grenzwerte

Parameter Bezeichnung	Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Operating and storage temperature range Betriebs- und Lagertemperatur	T_{op} , T_{stg}	-40 ... 100	°C
Reverse voltage Sperrspannung	V_R	32	V
Total power dissipation Verlustleistung	P_{tot}	150	mW

Characteristics ($T_A = 25$ °C)

Kennwerte

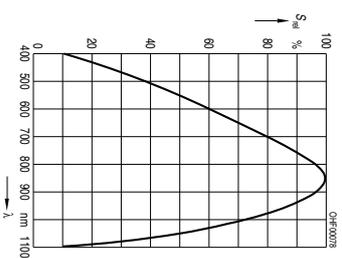
Parameter Bezeichnung	Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Spectral sensitivity Fotempfindlichkeit	S	80 (≥ 50)	nA/lx
($V_a = 5$ V, standard light A_v , $T = 2856$ K)			
Photocurrent Fotostrom	I_p	80 (≥ 50)	µA
($E_c = 1000$ lx, Std. Light A_v , $V_a = 5$ V)			
Wavelength of max. sensitivity Wellenlänge der max. Fotempfindlichkeit	$\lambda_{s,max}$	850	nm
Spectral range of sensitivity Spektraler Bereich der Fotempfindlichkeit	$\lambda_{0,95}$	400 ... 1100	nm
Radiant sensitive area Bestrahlungsempfindliche Fläche	A	7.02	mm ²
Dimensions of radiant sensitive area Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche	L x W	2.65 x 2.65	mm x mm
Half angle Halbwinkel	ϕ	± 60	°
Dark current Dunkelstrom	I_d	2 (≤ 30)	nA
($V_a = 10$ V)			
Spectral sensitivity of the chip Spektrale Fotempfindlichkeit des Chips	S_{chip}	0.62	A./W
($\lambda = 850$ nm)			

2014-01-09

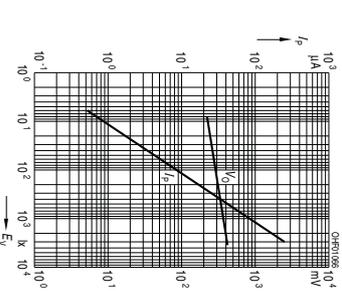
2

Parameter Bezeichnung	Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Quantum yield of the chip Quantenausbeute des Chips ($\lambda = 850 \text{ nm}$)	η	0.90	Electro- ns /photon
Open-circuit voltage Leerlaufspannung ($E_a = 1000 \text{ K}$, Std. Light A)	V_o	365 (± 300)	mV
Short-circuit current Kurzschlussstrom ($E_a = 1000 \text{ K}$, Std. Light A)	I_{sc}	80	μA
Rise and fall time Anstiegs- und Abfallzeit ($V_A = 5 \text{ V}$, $R_L = 50 \text{ } \Omega$, $\lambda = 850 \text{ nm}$, $I_p = 800 \text{ } \mu\text{A}$)	t_r , t_f	0.02	μs
Forward voltage Durchlassspannung ($I_f = 100 \text{ mA}$, $E = 0$)	V_f	1.3	V
Capacitance Kapazität ($V_A = 0 \text{ V}$, $f = 1 \text{ MHz}$, $E = 0$)	C_0	72	pF
Temperature coefficient of V_o Temperaturkoeffizient von V_o	TC_{V_o}	-2.6	mV / K
Temperature coefficient of I_{sc} Temperaturkoeffizient von I_{sc} (Std. Light A)	$TC_{I_{sc}}$	0.18	% / K
Noise equivalent power Rauschäquivalente Strahlungsleistung ($V_A = 10 \text{ V}$, $\lambda = 850 \text{ nm}$)	NEP	0.041	pW / $\text{Hz}^{1/2}$
Detection limit Nachweisgrenze ($V_A = 10 \text{ V}$, $\lambda = 850 \text{ nm}$)	D [*]	6.5e12	$\text{cm}^2 \times \text{Hz}^{-1/2} / \text{W}$

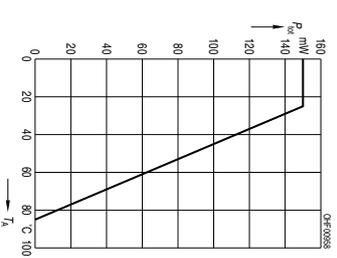
Relative Spectral Sensitivity
Relative spektrale Empfindlichkeit
 $S_{rel} = (A)$



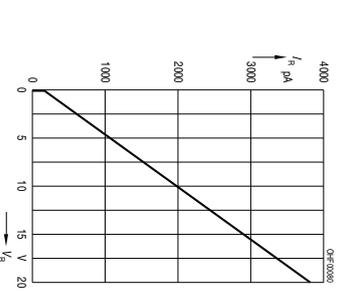
Photocurrent / Open-Circuit Voltage
Fotostrom / Leerlaufspannung
 $I_p (V_A = 5 \text{ V}) / V_o = (E_a)$



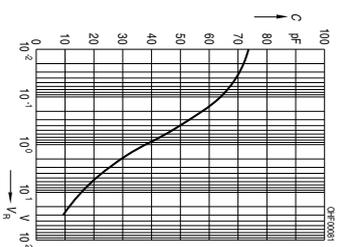
Total Power Dissipation
Verlustleistung
 $P_{tot} = (T_A)$



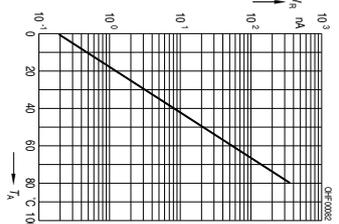
Dark Current
Dunkelstrom
 $I_d = (V_A)$, $E = 0$



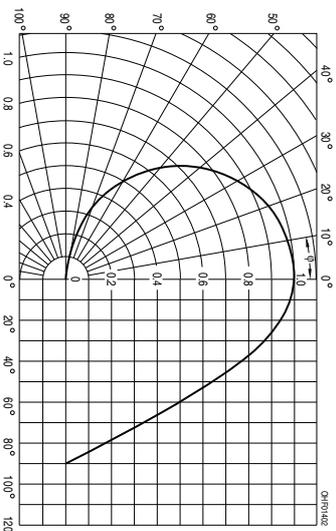
Capacitance
Kapazität
 $C = f(V_A), I_A = 1 \text{ MHz}, E = 0$



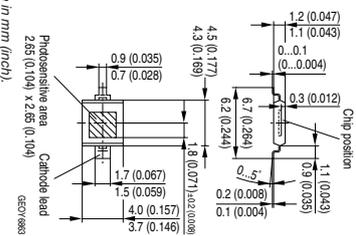
Dark Current
Dunkelstrom
 $I_A = f(T_A), V_A = 10 \text{ V}, E = 0$



Directional Characteristics
Winkeldiagramm
 $S_{rel} = f(\varphi)$



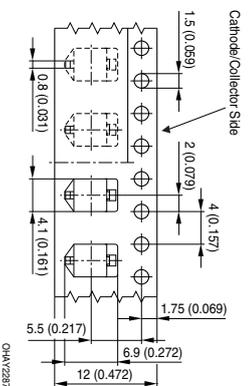
Package Outline
Maßzeichnung



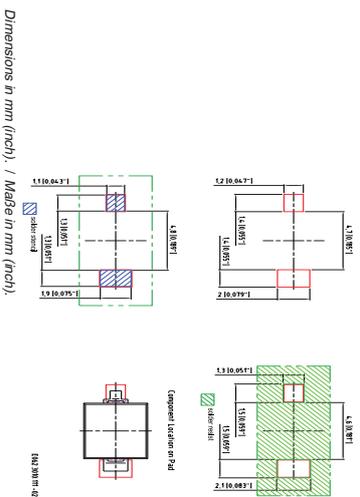
Dimensions in mm (inch) / Maße in mm (inch).

Package SMT DIL, Epoxy
Gehäuse SMT DIL, Harz

Method of Taping
Gunting

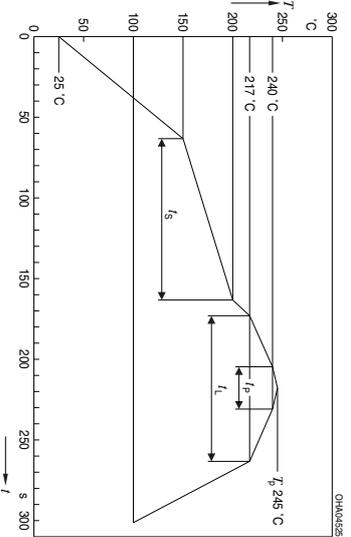


Dimensions in mm (inch). / Maße in mm (inch).
Recommended Solder Pad
Empfohlenes Lötspaddesign



Dimensions in mm (inch). / Maße in mm (inch).

Reflow Soldering Profile
Rettow-Lötprofil
Preconditioning: JEDEC Level 4 acc. to JEDEC J-STD-020D.01



Profile-Feature	Symbol	Pb-Free (SnAgCu) Assembly	Unit
Ramp-up rate to preheat*		2	K/s
25 °C to 150 °C		3	K/s
Time t_s	t_s	60	s
Time t_p	t_p	100	s
Time t_r	t_r	120	s
Ramp-up rate to peak*		2	K/s
150 °C to T_p		3	K/s
Liquidus temperature	T_L	217	°C
Time above liquidus temperature	t_L	80	s
Peak temperature	T_p	245	°C
Time within 5 °C of the specified peak temperature $T_p \pm 5$ K	t_p	10	s
Ramp-down rate*		3	K/s
T_p to 100 °C		6	K/s
Time		480	s
25 °C to T_p			

All temperatures refer to the center of the package, measured on the top of the component.
* slope calculation DT/Dt; Dt max. 5 s; fulfillment for the whole T-range

Disclaimer**Attention please!**

The information describes the type of component and shall not be considered as assured characteristics. Terms of delivery and rights to change design reserved. Due to technical requirements components may contain dangerous substances. For more information please contact our Sales Organization. If printed or downloaded, please find the latest version in the internet.

Packing

Please use the recycling operators known to you. We can also help you – get in touch with your nearest sales office.

By agreement we will take packing material back, if it is sorted. You must bear the costs of transport. For packing material that's returned to us unsorted or which we are not obliged to accept, we shall have to invoice you for any costs incurred. **Life-support devices or components used in life-support devices or pumps must be expressly authorized for such purpose!** Critical components* may only be used in life-support devices** or systems with the express written approval of OSRAM OS.

*) A critical component is a component used in a life-support device or system whose failure can reasonably be expected to cause the failure of that life-support device or system, or to affect its safety or the effectiveness of that device or system.

**) Life-support devices or systems are intended (a) to be implanted in the human body, or (b) to support and/or assist in the human body, or (c) to prevent a fall of a person, and (d) the failure of which is not reasonably to be expected to cause the health of the user may be endangered.

Disclaimer**Bitte beachten!**

Lieferbedingungen und Änderungen im Design vorbehalten. Aufgrund technischer Anforderungen können die Bauteile Geänderte enthalten. Für weitere Informationen zu gewünschten Bauteilen, wenden Sie sich bitte an unseren Vertrieb. Falls Sie dieses Bauteil in einem anderen Produkt verwenden haben, finden Sie die aktuellste Version im Internet.

Verpackung

Benutzen Sie bitte die Ihnen bekannten Recyclingwege. Wenn diese nicht bekannt sein sollten, wenden Sie sich bitte an das nächstgelegene Vertriebsbüro. Wir nehmen das Verpackungsmaterial zurück, falls dies vereinbart wurde und das Material sortiert ist. Sie tragen die Transportkosten. Für Verpackungsmaterial, das unsortiert an uns zurückgeschickt wird oder das wir nicht annehmen müssen, stellen wir Ihnen die anfallenden Kosten in Rechnung.

Bauteile, die in lebenserhaltenden Apparaten und Systemen eingesetzt werden, müssen für diese Zwecke ausdrücklich zugelassen sein! Kritische Bauteile* dürfen in lebenserhaltenden Apparaten und Systemen** nur dann eingesetzt werden, wenn ein schriftliches Einverständnis von OSRAM OS vorliegt.

*) Ein kritisches Bauteil ist ein Bauteil, das in lebenserhaltenden Apparaten oder Systemen eingesetzt wird und dessen Defekt voraussichtlich zu einer Fehlfunktion dieses lebenserhaltenden Apparates oder Systems führen wird oder die Sicherheit oder Effektivität dieses Apparates oder Systems beeinträchtigt.

**) Lebenserhaltende Apparate oder Systeme sind für (a) die Implantation in den menschlichen Körper oder (b) für die Lebenserhaltung bestimmt. Falls Sie versagen, kann davon ausgegangen werden, dass die Gesundheit und das Leben des Patienten in Gefahr ist.

Published by OSRAM Opto Semiconductors GmbH
Leibnizstraße 4, D-93065 Regensburg
www.osram-os.com © All Rights Reserved.

ETI RoHS and China RoHS compliant product

此产品符合欧盟 RoHS 指令的要求。

按照中国的相关法规和标准，不含有毒有害物质或元素。



Technical Data Sheet

1206 Package Silicon PIN Photodiode

Features

- Fast response time
- High photo sensitivity
- Small junction capacitance
- Package in 8mm tape in "7" diameter reel
- Pb free
- The product itself will remain within RoHS compliant version.

PD15-21B/TR8



Descriptions

- PD15-21B/TR8 is a high speed and high sensitive PIN photodiode in miniature flat top view lens SMD package and it is molded in a black plastic. The device is Spectrally matched to infrared emitting diode.

Applications

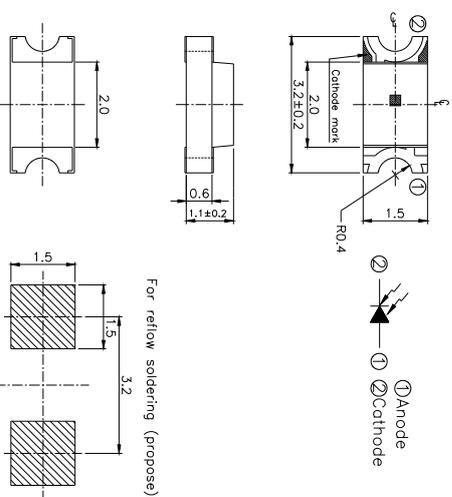
- High speed photo detector
- Copier
- Game machine

Device Selection Guide

LED Part No.	Chip	Lens Color
	Material	
PD15-21B/TR8	Silicon	Black

PD15-21B/TR8

Package Dimensions



- Notes:** 1. All dimensions are in millimeters
2. Tolerances unless dimensions ± 0.1 mm

Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Units
Reverse Voltage	V_R	32	V
Operating Temperature	T_{opr}	-25 ~ +85	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +100	°C
Soldering Temperature	*1 T_{sld}	260	°C
Power Dissipation at(or below) 25°C Free Air Temperature	P_c	150	mW

Notes: *1: Soldering time ≤ 5 seconds.

Electro-Optical Characteristics (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Range Of Spectral Bandwidth	$\lambda_{0.5}$	---	730	---	1100	nm
Wavelength Of Peak Sensitivity	λ_p	---	---	940	---	nm
Open-Circuit Voltage	Voc	Ee=5mW/cm ² λ_p =940nm	---	0.42	---	V
Short-Circuit Current	Isc	Ee=1mW/cm ² λ_p =875nm	---	0.8	---	μ A
Reverse Light Current	I _L	Ee=1mW/cm ² λ_p =875nm V _R =5V	0.2	0.8	---	μ A
Dark Current	I _D	Ee=0mW/cm ² V _R =10V	---	---	10	nA
Reverse Breakdown Voltage	B _{Vr}	Ee=0mW/cm ² I _R =100 μ A	32	170	---	V
Total Capacitance	C _T	Ee=0mW/cm ² f=1MHz V _R =5V	---	5	---	pF
Rise Time	t _r	V _R =5V	---	6	---	ns
Fall Time	t _f	R _L =1000 Ω	---	6	---	ns

Typical Electro-Optical Characteristics Curves

Fig.1 Power Dissipation vs. Ambient Temperature

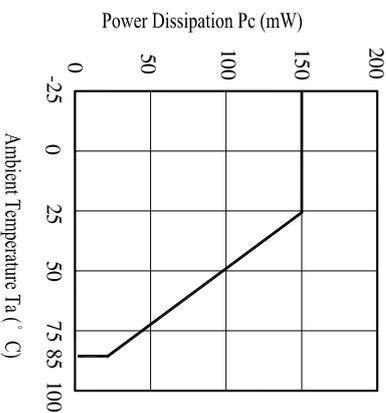


Fig.2 Spectral Sensitivity

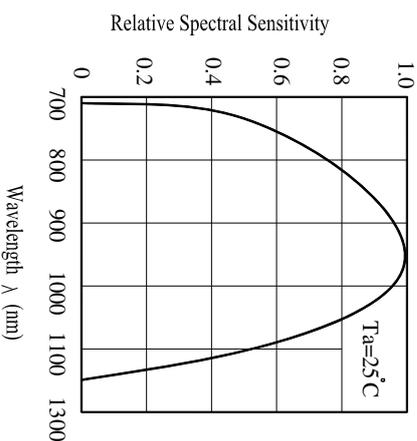


Fig.3 Dark Current vs. Ambient Temperature

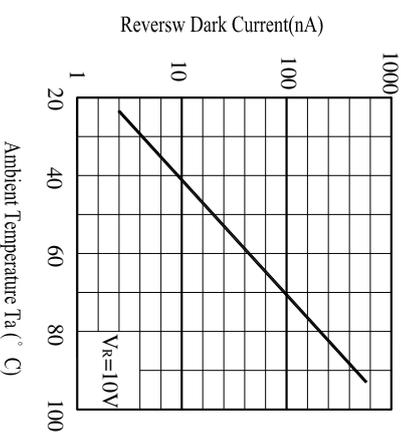
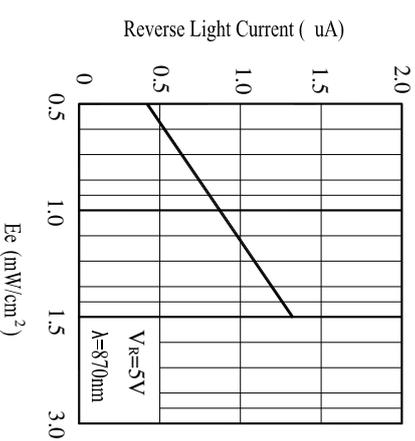


Fig.4 Reverse Light Current vs. Ee



Typical Electro-Optical Characteristics Curves

Fig.5 Terminal Capacitance vs. Reverse Voltage

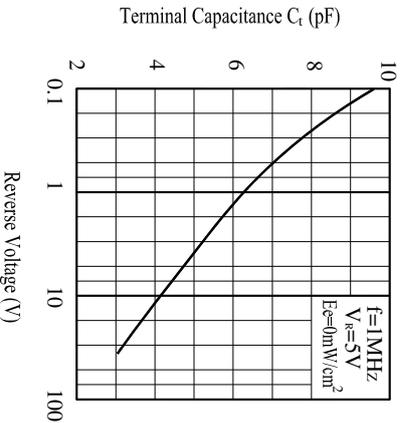
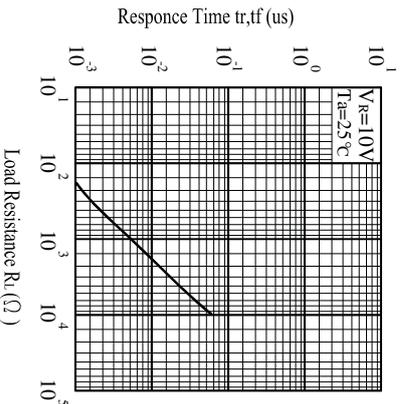


Fig.6 Response Time vs. Load Resistance



Precautions For Use

1. Over-current-proof

Customer must apply resistors for protection , otherwise slight voltage shift will cause big current change (Burn out will happen).

2. Storage

2.1 Do not open moisture proof bag before the products are ready to use.

2.2 Before opening the package, the LEDs should be kept at 30°C or less and 90%RH or less.

2.3 The LEDs should be used within a year.

2.4 After opening the package, the LEDs should be kept at 30°C or less and 70%RH or less.

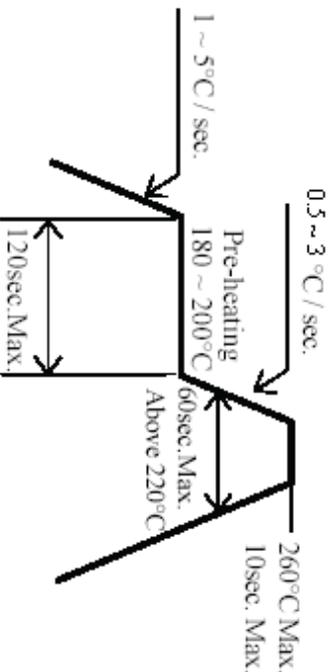
2.5 The LEDs should be used within 168 hours (7 days) after opening the package.

2.6 If the moisture absorbent material (silica gel) has faded away or the LEDs have exceeded the storage time, baking treatment should be performed using the following conditions.

Baking treatment : 60±5°C for 24 hours.

3. Soldering Condition

3.1 Lead solder temperature profile



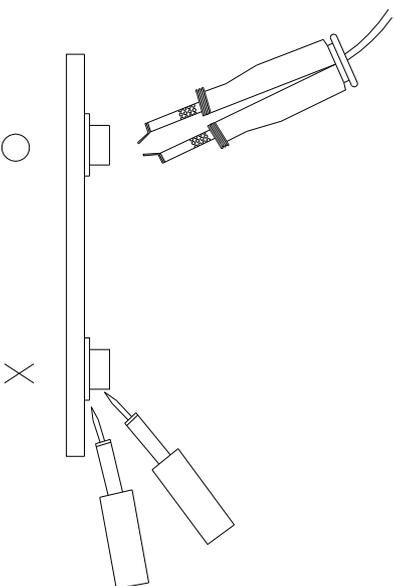
- 3.2. Reflow soldering should not be done more than two times.
- 3.3. When soldering, do not put stress on the LEDs during heating.
- 3.4. After soldering, do not warp the circuit board.

4. Soldering Iron

Each terminal is to go to the tip of soldering iron temperature less than 280°C for 3 seconds within once in less than the soldering iron capacity 25W. Leave two seconds and more intervals, and do soldering of each terminal. Be careful because the damage of the product is often started at the time of the hand solder.

5. Repairing

Repair should not be done after the LEDs have been soldered. When repairing is unavoidable, a double-head soldering iron should be used (as below figure). It should be confirmed beforehand whether the characteristics of the LEDs will or will not be damaged by repairing.



Reliability Test Item And Condition

The reliability of products shall be satisfied with items listed below.

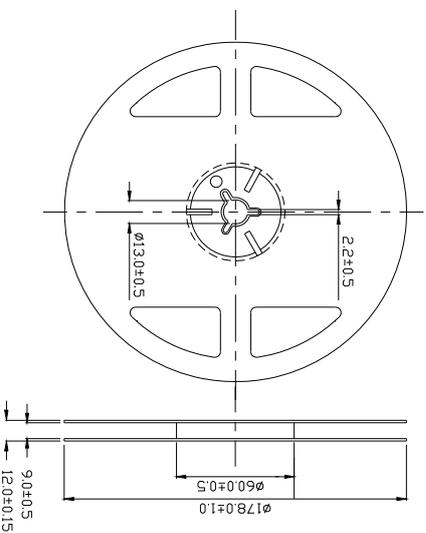
Confidence level : 90%

LTPD : 10%

NO.	Item	Test Conditions	Test Hours/ Cycles	Sample Sizes	Failure Judgement Criteria	Ac/Re
1	REFLOW Soldering	TEMP. : 260°C±5°C 10secs	6Mins	22pcs	$I_f \leq L \times 0.8$	0/1
2	Temperature Cycle	H : +100°C L : -40°C 5mins ↔ 15mins	50Cycles	22pcs	L : Lower Specification	0/1
3	Thermal Shock	H : +100°C L : -10°C 5mins ↔ 10secs	50Cycles	22pcs	Limit	0/1
4	High Temperature Storage	TEMP. : +100°C	1000hrs	22pcs		0/1
5	Low Temperature Storage	TEMP. : -40°C	1000hrs	22pcs		0/1
6	DC Operating Life	$V_R = 5V$	1000hrs	22pcs		0/1
7	High Temperature/ High Humidity	85°C / 85% R.H	1000hrs	22pcs		0/1

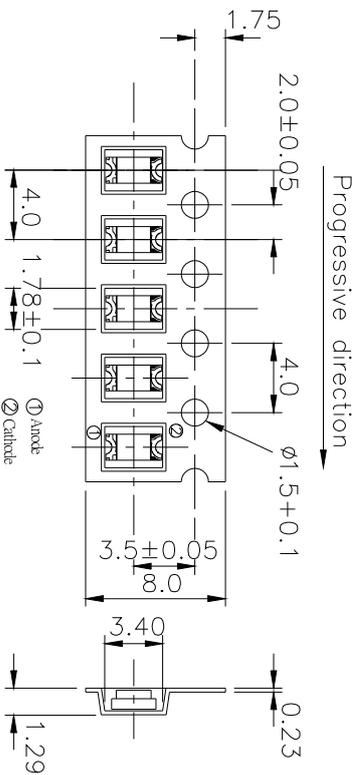
Package Dimensions

1. Reel Dimensions



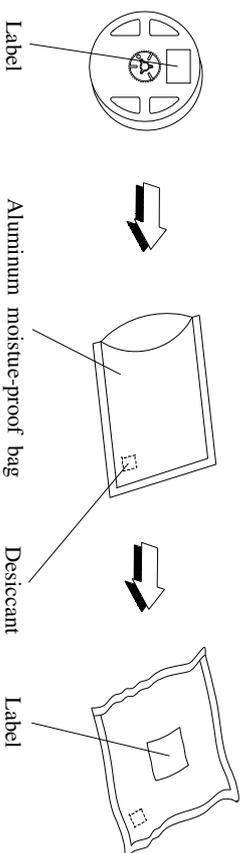
Note: The tolerances unless mentioned is ± 0.1 mm , Unit = mm

2. Carrier Tape Dimensions:(Quantity: 2000pcs/reel)



Note: The tolerances unless mentioned is ± 0.1 mm , Unit = mm

Packing Procedure



Label Form Specification



CPN: Customer's Production Number
 P/N : Production Number
 QTY: Packing Quantity
 CAT: Ranks
 HUE: Peak Wavelength
 REF: Reference
 LOT No: Lot Number
 MADE IN TAIWAN: Production Place

Notes

1. Above specification may be changed without notice. EVERLIGHT will reserve authority on material change for above specification.
2. When using this product, please observe the absolute maximum ratings and the instructions for using outlined in these specification sheets. EVERLIGHT assumes no responsibility for any damage resulting from use of the product which does not comply with the absolute maximum ratings and the instructions included in these specification sheets.
3. These specification sheets include materials protected under copyright of EVERLIGHT corporation. Please don't reproduce or cause anyone to reproduce them without EVERLIGHT's consent.

EVERLIGHT ELECTRONICS CO., LTD. Tel: 886-2-2267-2000, 2267-9936
 Office: No 25, Lane 76, Sec 3, Chung Yang Rd, Fax: 886-2267-6244, 2267-6189, 2267-6306
 Tucheng, Taipei 236, Taiwan, R.O.C <http://www.everlight.com>

Silicon PIN Photodiode



94 8633

FEATURES

- Package type: leaded
- Package form: side view
- Dimensions (in mm): 4.5 x 5 x 6
- Radiant sensitive area (in mm²): 4.4
- High radiant sensitivity
- Daylight blocking filter matched with 870 nm to 950 nm emitters
- Fast response times
- Angle of half sensitivity: $\phi = \pm 60^\circ$
- Compliant to RoHS, Directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC



RoHS
compliant
GREEN
PREFERRED**

Note
** Please see document "Vishay Material Category Policy":
www.vishay.com/doc/299902

APPLICATIONS

- High speed detector for infrared radiation
- Infrared remote control and free air data transmission systems, e.g. in combination with TSFT-xxxx series IR emitters

PRODUCT SUMMARY

COMPONENT	I_{ra} (µA)	ϕ (deg)	$\lambda_{0.5}$ (nm)
BPV23NF	65	± 60	790 to 1050
BPV23NFL	65	± 60	790 to 1050

Note

- Test condition see table "Basic Characteristics"

ORDERING INFORMATION

ORDERING CODE	PACKAGING	REMARKS	PACKAGE FORM
BPV23NF	Bulk	MOC: 4000 pcs, 4000 pcs/bulk	Side view
BPV23NFL	Bulk	MOC: 4000 pcs, 4000 pcs/bulk	Side view, long leads

Note

- MOC: minimum order quantity

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T_{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)

PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage	T _{amb} ≤ 25 °C	V _r	60	V
Power dissipation		P _v	215	mW
Junction temperature		T _j	100	°C
Operating temperature range		T _{amb}	-40 to +100	°C
Storage temperature range		T _{stg}	-40 to +100	°C
Soldering temperature	t ≤ 5 s	T _{sd}	260	°C
Thermal resistance junction/ambient	Connected with Cu wire, 0.14 mm ²	R _{thJA}	350	K/W

BASIC CHARACTERISTICS (T_{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)

PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Forward voltage	I _e = 50 mA	V _f		1	1.3	V
Breakdown voltage	I _r = 100 µA, E = 0	V _{br}	60			V
Reverse dark current	V _r = 10 V, E = 0	I _o		2	30	nA
Diode capacitance	V _r = 0 V, f = 1 MHz, E = 0	C _o		48		pF
Serial resistance	V _r = 12 V, f = 1 MHz	R _s		900		Ω
Open circuit voltage	E _o = 1 mW/cm ² , λ = 950 nm	V _o		390		mV
Temperature coefficient of V _o	E _o = 1 mW/cm ² , λ = 950 nm	TK _v		-2.6		mV/K
Short circuit current	E _o = 1 mW/cm ² , λ = 950 nm	I _k		65		µA
Reverse light current	E _o = 1 mW/cm ² , λ = 950 nm, V _r = 5 V	I _{ra}	45			µA
Temperature coefficient of I _{ra}	E _o = 1 mW/cm ² , λ = 950 nm, V _r = 10 V	TK _{ira}		0.1		%/K
Absolute spectral sensitivity	V _r = 5 V, λ = 870 nm	S(λ)		0.57		A/W
	V _r = 5 V, λ = 950 nm	S(λ)		0.50		A/W
Angle of half sensitivity		φ		± 60		deg
Wavelength of peak sensitivity		λ _p		940		nm
Range of spectral bandwidth		λ _{0.5}		790 to 1050		nm
Quantum efficiency	λ = 950 nm	η		90		%
Noise equivalent power	V _r = 10 V, λ = 950 nm	NEP		4 x 10 ⁻¹⁴		W/√Hz
Noise equivalent power	V _r = 10 V, λ = 950 nm	D*		5 x 10 ¹²		cm ² ·Hz/W
Rise time	V _r = 10 V, R _L = 1 kΩ, λ = 820 nm	t _r		70		ns
Fall time	V _r = 10 V, R _L = 1 kΩ, λ = 820 nm	t _f		70		ns
Cut-off frequency	V _r = 12 V, R _L = 1 kΩ, λ = 870 nm	f _c		4		MHz
	V _r = 12 V, R _L = 1 kΩ, λ = 950 nm	f _c		1		MHz

BASIC CHARACTERISTICS (T_{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)

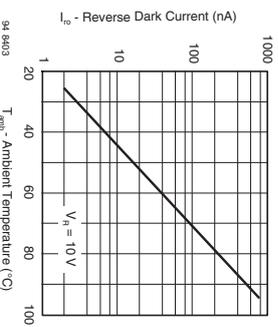


Fig. 1 - Reverse Dark Current vs. Ambient Temperature

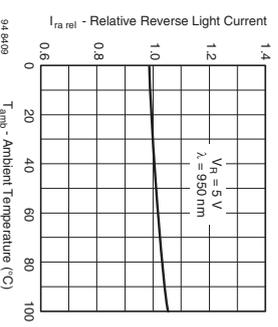


Fig. 2 - Relative Reverse Light Current vs. Ambient Temperature

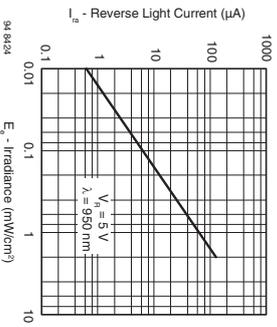


Fig. 3 - Reverse Light Current vs. Irradiance

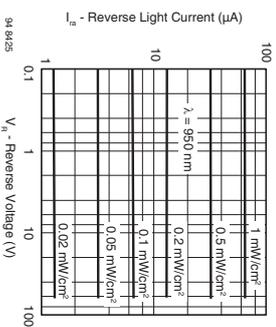


Fig. 4 - Reverse Light Current vs. Reverse Voltage

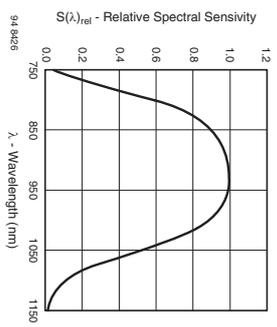


Fig. 6 - Relative Spectral Sensitivity vs. Wavelength

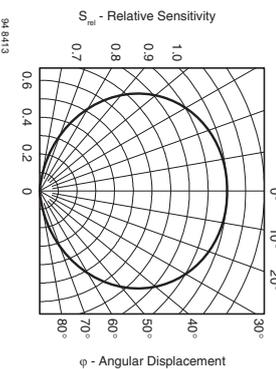


Fig. 7 - Relative Radiant Sensitivity vs. Angular Displacement

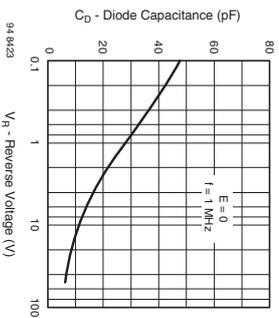
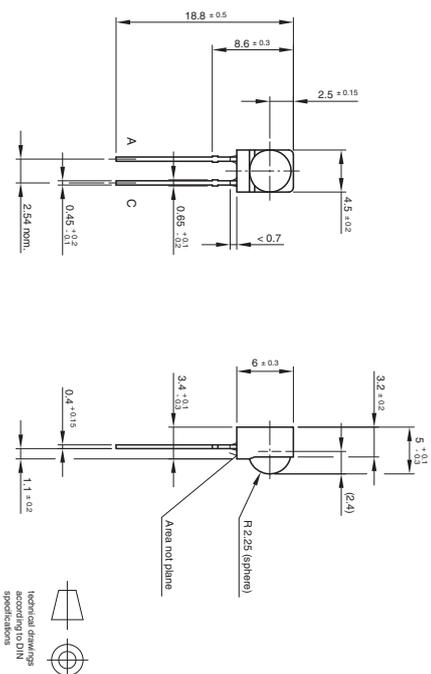


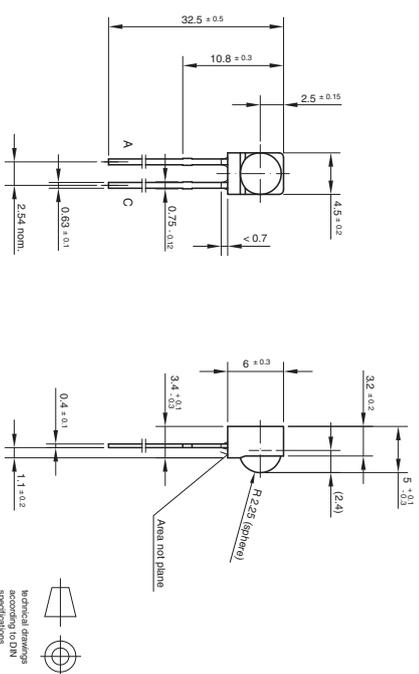
Fig. 5 - Diode Capacitance vs. Reverse Voltage

PACKAGE DIMENSIONS in millimeters: BPV23NF



Drawing-No.: 6.544-5199-01-4
Issue: 2: 19.06.01
9511475

PACKAGE DIMENSIONS in millimeters: BPV23NFL



Drawing-No.: 6.544-5238-01-4
Issue: 2: 07.07.97
9612205

Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and/or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify and hold Vishay and its distributors harmless from and against any and all claims, liabilities, expenses and damages arising or resulting in connection with such use or sale, including attorney's fees, even if such claim alleges that Vishay or its distributor was negligent regarding the design or manufacture of the part. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Material Category Policy

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as RoHS-Compliant fulfill the definitions and restrictions defined under Directive 2011/65/EU of The European Parliament and of the Council of June 8, 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (EEE) - recast, unless otherwise specified as non-compliant.

Please note that some Vishay documentation may still make reference to RoHS Directive 2002/95/EC. We confirm that all the products identified as being compliant to Directive 2002/95/EC conform to Directive 2011/65/EU.

QSE773

Sidelooker Pin Photodiode

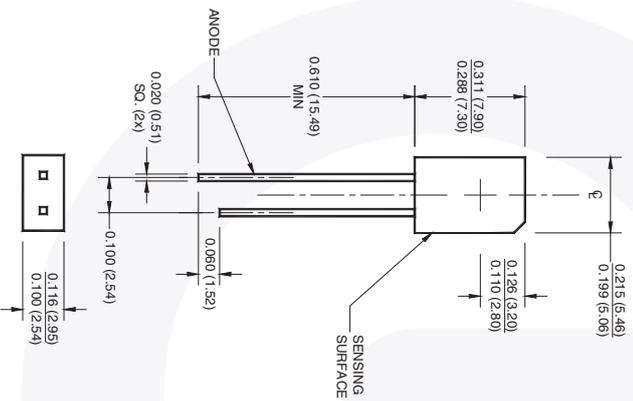
Features

- Day/light filter
- Sidelooker package
- Pin photodiode
- Wide reception angle, 120°
- Chip size = 0.107 sq. inches (2.71 sq. mm)

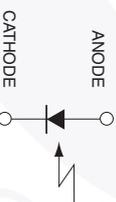
Description

The QSE773 is a plastic silicon pin photodiode in a sidelooker package.

Package Dimensions



Schematic



Notes:

1. Dimensions for all drawings are in inches (mm).
2. Tolerance of ±0.010 (0.25) on all non-nominal dimensions unless otherwise specified.

Absolute Maximum Ratings (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Stresses exceeding the absolute maximum ratings may damage the device. The device may not function or be operable above the recommended operating conditions and stressing the parts to these levels is not recommended. In addition, extended exposure to stresses above the recommended operating conditions may affect device reliability. The absolute maximum ratings are stress ratings only.

Symbol	Parameters	Value	Units
T _{opr}	Operating Temperature	-40 to +85	°C
T _{stg}	Storage Temperature	-40 to +85	°C
T _{SOL-I}	Soldering Temperature (Iron) ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾	240 for 5 sec.	°C
T _{SOL-F}	Soldering Temperature (Flow) ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁷⁾	260 for 10 sec	°C
V _R	Reverse Voltage	32	V
P _D	Power Dissipation ⁽³⁾	150	mW

Notes:

3. Derate power dissipation linearly 2.50mW/°C above 25°C.
4. RMA flux is recommended.
5. Methanol or isopropyl alcohols are recommended as cleaning agents.
6. Soldering iron tip 1/16" (1.6 mm) from housing.
7. As long as leads are not under any stress or spring tension.

Electrical Characteristics (T_A = 25°C)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
V _R	Reverse Voltage	I _R = 0.1mA, E _g = 0mW/cm ²	32			V
I _{R(D)}	Dark Reverse Current	V _R = 10 V, E _g = 0mW/cm ²			30	nA
λ _{pk}	Peak Sensitivity	V _R = 5V		940		nm
θ	Reception Angle at 1/2 Power			±60		°
I _{ph}	Photo Current ⁽⁸⁾	E _g = 1.0mW/cm ² , V _R = 5V	30			µA
I _{sc}	Short Circuit Current ⁽⁸⁾	E _g = 1.0mW/cm ²		18		µA
C	Capacitance	V _R = 3V		25		pF
t _r	Rise Time	V _R = 5V, R _L = 1kΩ		50		ns
t _f	Fall Time	V _R = 5V, R _L = 1kΩ		50		ns

Notes:

8. Light source is an GaAs LED which has a peak emission wavelength of 940nm.
9. All measurements made under pulse conditions.

Mouser Electronics

Authorized Distributor

Click to View Pricing, Inventory, Delivery & Lifecycle Information:

Fairchild Semiconductor:

[QSE773](#) [QSE773E9R0](#)

SPM Serie Avalanche-Photodioden-Detektoren mit hoher Verstärkung



Egal ob Ihre Anwendung eine großflächige Strahlungsdetektion, ein Tischgerät oder ein hochwertiges Laboranalysegerät beinhaltet, Sie werden von der SPM Serie im Vergleich zu existierenden Detektoren in jedem Fall profitieren.

Die Avalanche Photodioden (APD) mit hoher Verstärkung der Serie SPM bilden die erste Festkörper Alternativen zu seit langem etablierten Photomultiplier-Röhren (PMT). Diese SPM Detektoren kombinieren die großen Verstärkungsfaktoren (10⁹) und hohe Quanteneffizienz von PMT mit den gestärzten Vorzügen von Siliziumdetektoren wie geringe Baugröße, niedrige Betriebsspannung, Robustheit, Zuverlässigkeit, Unempfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern, Toleranz von zusätzlichem Umgebungslicht und die Möglichkeit der Miniaturisierung. Darüber hinaus besitzt dieses neue Design ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis und ein sehr schnelles Pulsantwortverhalten.

Der Detektor besteht aus einer Anordnung von Gelegemoden Avalanche Photodioden (APD), von denen jede einzelne mit einer integrierten Dämpfungselektronik gekoppelt ist. Diese Art von Detektor wird üblicherweise als Silizium-Photomultiplier (SPM) bezeichnet. Gelegemoden APDs besitzen eine extrem hohe interne Verstärkung, welche eine Einzelphotonen-Empfindlichkeit bei Raumtemperatur ermöglicht. Das Ausgangssignal einer Gelegemoden APD besteht aus einer für jedes detektierte Photon identischen Aufladung oder Strompuls. Durch den parallelen Zusammenschluss einer Anordnung von Gelegemoden APDs wird das summierte Ausgangssignal proportional zur Anzahl der Gelegemoden Pulse und damit proportional zum einfallenden Photonenfluss. Die gleichmäßig hohe Verstärkung über das Array ermöglicht es, die einzelnen Photoelektronenspitzen deutlich auszulösen und damit sowohl Einzelphotonen nachzuweisen wie auch die genaue Anzahl von Photonen zu bestimmen.

Die APDs der SPM Serie stehen mit aktiven Flächen von 1x1 mm² oder 3x3 mm² zur Verfügung, sind in einem hermetisch abgeschlossenen TO8 Can Gehäuse untergebracht und auf einem zweifelligen Peltierkühler montiert. Während des normalen Betriebs ist der Detektor auf -20°C heruntergekühlt. Dies gewährleistet gegenüber dem Betrieb bei Raumtemperatur eine noch größere Leistungsfähigkeit, da hierbei die Dunkelzählrate typischerweise um eine Größenordnung herab gesetzt ist.

Um die Leistungsfähigkeit dieser Detektoren noch weiter zu steigern, stehen zwei verschiedene Vorverstärker zur Auswahl:

Die Transimpedanzverstärker-Version (-T) wandelt den Strom mit einer Verstärkung von 470 V/A in ein Spannungssignal um. Diese Version eignet sich insbesondere für Anwendungen, bei denen die Detektion von kontinuierlichen (CW) Signalen im Vordergrund steht und wo das Signal über die Zeit aufintegriert wird. Beispiele sind die Abbildung von Zellen oder DNA Micro-Arrays, wo es wünschenswert ist, das optische Signal der Probe für Zeitaltären von 1 µs bis zu 1 ms aufzunehmieren.

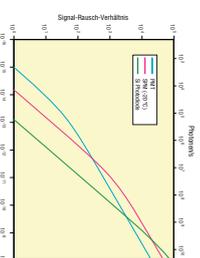
Die Pulsverstärker-Version (-P) ermöglicht es dagegen die kurzen Anstiegszeiten des Detektors auszunutzen und liefert den direktesten Weg, um die Pulsinformationen in exakter Form dem Anwender zugänglich zu machen. Mit einem internen Verstärkungsfaktor von 20 ist diese Version für die Detektion einzelner Photoelektronen optimiert, wie sie z.B. bei Anwendungen der Entfernungsmessung oder Hochenergie-Physik auftreten.

Die Detektoren der SPM Serie sind mit einem integrierten Netzteil ausgestattet und können über eine auf der Bodenseite vorhandene Gewindebohrung auf Siffen montiert werden. Ein optionaler C-Mount Adapter steht für die Montage von Filtern und Sammellinsen zur Verfügung.

- Kompakter, robuster und stabiler Detektor mit integriertem Netzteil und TE-Kühler
- Hohe Verstärkung (10⁹)
- Niedrige Bias Spannungen (30 V)
- Schnelle Anstiegszeit (<5 ns)
- Niedrige Dunkelzählrate (<1MHz)
- Große Sensordfläche von bis zu 9 mm²

Anwendungen

- Fluoreszenz-Lebensdauernmessungen
- Biologische Sensoren
- Scannende Microarrays
- DNA Biochips/Sequenzierung
- Proteomics/Protein Biochips
- Kontokale Mikroskope
- Nuklearmedizin
- Umweltüberwachung
- Detektion nuklearer Strahlung
- Hochenergie-Physik
- Durchfluss-Cytometrie
- Kapillar-Elektrophorese
- Entfernungsmessung



In einer Vielzahl von Anwendungen ist das Signal-Rausch-Verhältnis der SPM Detektoren besser als das von Photomultiplern und Photodioden.

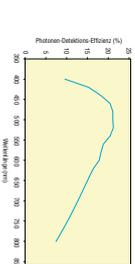
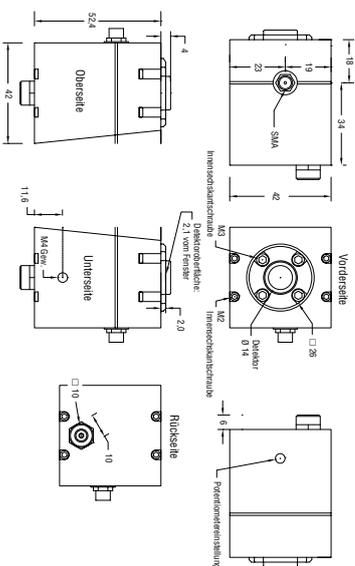
Technische Daten

Model	SPM-I	SPM1-P	SPM3-I	SPM3-P	testbedingungen
Spektralbereich (nm)	400 - 1100 nm	300 nm typisch	-	-	-
Chiptfläche (mm ²)	1,14 x 1,14	3 x 3	-	-	-
Aktiver Bereich (mm ²)	1x1	2,85 x 2,85	-	-	-
Betriebsspannung V _{BIAS} (V)	29,9	29,7	-	-	+2V über Durchbruch 2,-5/20nm
Empfindlichkeit (AWW)	55K	-	35K	-	+2V über Durchbruch A,-5/20nm
Verstärkung pro Pixel	-	1x10 ⁹	-	-	-
Verstärkung der Vorverstärkerstufe	470	20	470	20	500Q Last
Max. Ausgangsspannung (V)	-	-	-	-	50Q Last
NFP (GW/Hz)	6,5x10 ⁻¹⁰	-	5,84 x 10 ⁻¹⁴	-	+4V über Durchbruch 2,-5/20nm
Dynamischer Bereich	-	10 ⁹	>10 ⁹	-	+4V über Durchbruch 2,-5/20nm
Cut-Off Frequenz (MHz)	1	10	1	10	3,6B Punkt
Ausgangskapazität (pF)	-	130	-	-	-
Ausgangsimpedanz (Ω)	-	50	-	-	-
Photon-Detektions-Effizienz (%)	-	9,21	-	-	-
Einzelphoton-Puls- steigende Flanke (ns)	-	5	-	5-10	-
Einzelphoton-Puls- fallende Flanke (ns)	-	20	-	50	-
Eingangsspannung (V)	-	5	-	-	-
TEC Kühlerdauer (s)	-	10	-	-	-
Betriebs-temperatur (°C)	-	-20 bis +40	-	-	von der Raumtemperatur
Lager-temperatur (°C)	-	-30 bis +85	-	-	-

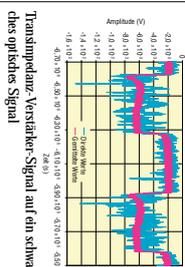
Bestell-Information

Modell	Beschreibung
SPM1-I	APD Modul mit hoher Verstärkung, 1x1 mm Sensor und Transimpedanzverstärker
SPM1-P	APD Modul mit hoher Verstärkung, 1x1 mm Sensor und Pulsverstärker
SPM3-I	APD Modul mit hoher Verstärkung, 3x3 mm Sensor und Transimpedanzverstärker
SPM3-P	APD Modul mit hoher Verstärkung, 3x3 mm Sensor und Pulsverstärker
SPM-C/W	C-Mount Adapter - optional
SPM-F	FC Adapter für Faserkopplung

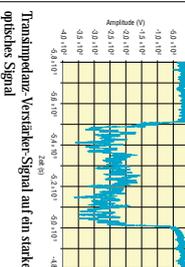
Abmessungen



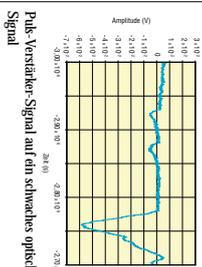
SPM Empfindlichkeit über der Wellenlänge



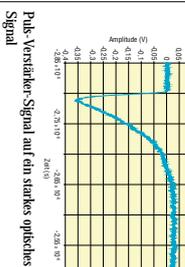
Transimpedanz-Verstärker-Signal auf ein schwaches optisches Signal



Puls-Verstärker-Signal auf ein starkes optisches Signal



Puls-Verstärker-Signal auf ein schwaches optisches Signal



Puls-Verstärker-Signal auf ein starkes optisches Signal



DSC-R402APD: 10Gb/s APD+TIA Optical Receiver

Description:

Ideal for adding extra distance to 10 Gb communications links, this fiber-pigtailed optical receiver combines the very high responsivity of an InGaAs Avalanche Photodiode (APD) with a low-noise amplifier that offers 20 dB gain. With variable gain of M=2 to M=7, performance can be matched to line conditions and sensitivity varied from -17 to -26 dBm (BER 10^{-12} , PRBS: $2^{31} - 1$). Suitable for NRZ applications with or without FEC.

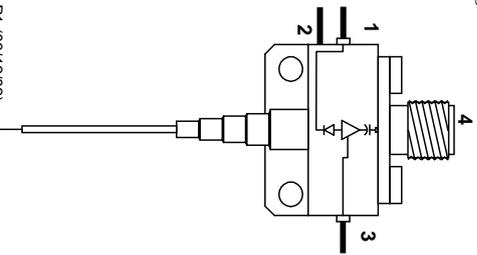
Features:

- High Sensitivity
- High Bandwidth
- Low Capacitance High Speed InGaAs APD
- Low-Noise, High-Gain
- Hermetically Sealed and Built to GR-468 Standards

Applications:

- Metro and Long Haul 10 Gb/s
- DWDM systems
- SONET/SDH systems

Block Diagram:



Pin Connections:

1.	APD Bias Voltage $V_{\text{bias}} = 25\text{-}36\text{V}$
2.	Case Ground *
3.	Bias Voltage Amplifier $V_{\text{bias}} = +8\text{V}$
4.	RF Signal Out (std: AC coupled, opt: DC coupled)

* Observe Polarities
ALWAYS connect ground FIRST, either at case or by RF connection, and ALWAYS disconnect ground LAST.

Electrical / Optical Specifications: TC = 25°C unless otherwise specified

Parameter	Min	Typical	Max	Units
Sensitivity 10^{-12} BER, $2^{31}-1$ PRBS ⁽⁴⁾⁽⁶⁾ M = 7	-	-25	-	dBm
Optical Overload (BER < 10^{-12}) ⁽⁴⁾⁽⁶⁾ at what M = 7	-	0	-	dBm
Responsivity @ 1550 nm, M = 1 @ 1310 nm, M = 1	-	0.7 0.7	-	A/W A/W
Transimpedance	-	500	-	Ω
Gain Flatness @ 1550 nm ⁽¹⁾	-	± 1	-	dB
Logic Sense	-	Non-Inverting	-	-
Group Delay ^(2,4) , M = 3.4	-	15	-	ps
Low Frequency Cutoff (AC coupled)	-	30	-	KHz
APD Breakdown Voltage (V_{bd}) at 10 μ A	-	37	-	V
APD Breakdown Voltage Temp Coefficient	-	0.15%/°C	-	V/°C
V_{bias} Bias Amp.	7.5	8	8.4	V+
Power Dissipation	-	880	-	mW
Electrical Return Loss	-10	-	-	dB
Optical Return Loss @ 1550 nm	30	-	-	dB
Wavelength Response	950	-	1650	nm
Optical PDL @ 1550 nm ⁽⁵⁾	-	0.06	0.12	dB

Absolute Maximum Ratings:

Operating Temperature Range ⁽⁶⁾	0 to 70	°C
Storage Temperature Range	-40 to 85	°C
Max APD Breakdown Voltage at 10 μ A	+40	V
Max Amp Bias V_{bias}	+8.5	V
Optical Input Power Damage Threshold M = 3 ⁽⁴⁾	+3	dBm peak
Lead Soldering Temperature (10 s)	250	°C

- (1) Flatness – relative to mean from DC to 70% of the 3 dB bandwidth
 (2) Group Delay – over range of 500 MHz to –3 dB bandwidth
 (3) DC coupled option goes to 0 Hz
 (4) Assumes NRZ format with 50% duty cycle, 1550 nm source and M = 7 unless otherwise noted.
 (5) Optical PDL measured with the Agilent measurement system
 (6) Heat sink and forced air cooling is required.



ANALOG MODULES, INC.

HIGH SENSITIVITY APD OPTICAL RECEIVER

MODEL 7510 HIGH SENSITIVITY APD OPTICAL RECEIVER

- OUTSTANDING LOW NEP
- EXCELLENT DYNAMIC RANGE > 30DB
- BANDWIDTH: 100MHZ
- INCORPORATES TEC AND TEMPERATURE SENSOR
- HERMETIC LOW PROFILE TO-8 PACKAGE, 0.1 CU. IN.
- 200µm InGaAs APD DETECTOR WITH MASK
- OPERATION FROM 1.0µm to 1.7µm WAVELENGTH



DESCRIPTION:

The **7510** is a high gain, low noise, APD-preamp, optical receiver. The compact construction (modified TO-8 header) and PCB mounting capability makes the **7510** ideal for miniature applications. The thermo-electric heater/cooler allows the highest performance to be achieved with an external control circuit. Alternate detector sizes available, consult factory.

SPECIFICATIONS:

PARAMETER	Min.	7510-1-04		Units
		Typical	Max.	
InGaAs APD Active Diameter	180	220		µm
Bandwidth (3dB)	80	100		MHz
Responsivity (1.55µm, 8ns pulse)	0.7	1		MW/V
Noise Equivalent Power (NEP) @1.55µm	1.3	3		nW
Noise (RMS) at output	2	3		mV
Linear Dynamic Range (Peak signal/RMS noise)	1125:1	1700:1		3000:1
Peak Output Pulse (Negative Swing)	4.5	5.1		6
DC Output Offset @ 25°C	2	2.5		3
APD				
Bias Voltage @ 25°C	40	50		75
Bias Current	10	70		150
Temperature Coefficient (TEC off)	-	+0.14		0.2
Temperature Sensor	-	-2.5		-
TEMPERATURE				
Current	-	-		0.9
Voltage	-	-		0.6
TEMPERATURE				
Operating	-40	-		+80**
Storage	-55	-		+85
Input Power	+4.9	+5		+5.1
Input Current	-	-5		-5.1
Weight	-	18 (+5V) 13 (-5V)		20 15
		4.3 (0.15Oz)		

*All measurements made at 25°C, R_L = 50Ω, AC Coupled
**Useful life of TEC is reduced at temperatures in excess of 80°C.

Specifications subject to change without notice.

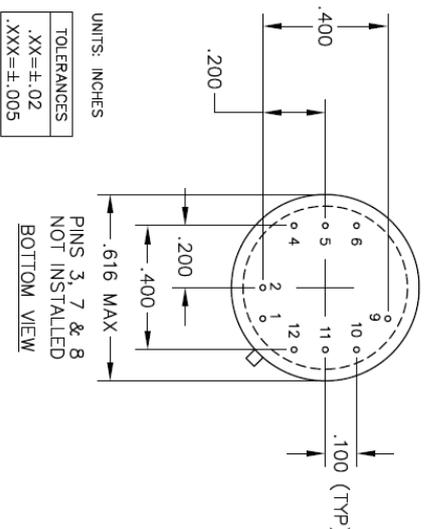
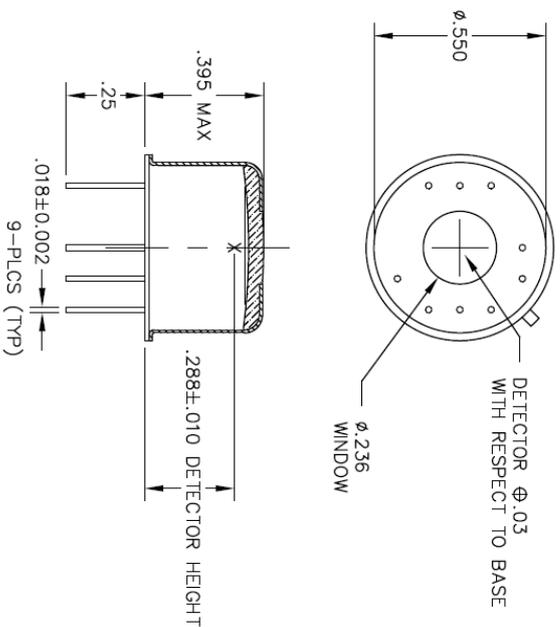
APPLICATIONS:

Eyesafe Sensors, Medical Applications,
Laboratory Instrumentation, Range-finding, LIDAR



126 BAYWOOD AVENUE ♦ LONGWOOD, FLORIDA 32750-3426 ♦ USA
(407) 339-4355 ♦ FAX (407) 834-3806 ♦ e-mail: ami@analogmodules.com
www.analogmodules.com

10/2012



PIN#	SIGNAL NAME
1	BIAS VOLTAGE
2	TEC-
4	-5V
5	GND
6	TEC+
9	N/C
10	OUTPUT
11	TEMP
12	+5V

8467.DWG

UNITS: INCHES

TOLERANCES
.XX ± .02
.XXX ± .005

PINS 3, 7 & 8 NOT INSTALLED

WINDOW: .035 ± .006" THK.

RI = 1.469 @ 1550nm; 1.476 @ 1064nm.

MODEL 7510-1 DIMENSIONS AND PACKAGE DETAIL

See 7510-1 Application Note for detailed operating information and design considerations.
An optional test board is available, consult factory for information.