

Sehen ohne gesehen zu werden – Lasersensoren in der Militärtechnik

Winfried Reeb, Laser Components GmbH, Olching

Leistungsstarke Puls laserdioden der Laserwellenlänge 1550 nm sowie sehr empfindliche Lawinen-Photodioden spielen eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung der nächsten Generation augensicherer militärischer Laser-Entfernungsmessgeräte und von Systemen zur Freund/Feind-Erkennung.

Bereits 1968, acht Jahre nach Erfindung des Lasers durch Theodore Maiman, führten finanziell großzügig ausgestattete Forschungsprogramme zur Entwicklung der ersten „Laserwaffe“ für die amerikanische Luftwaffe: eine lasergelenkte Bombe. Seither gibt es eine intensive Wechselwirkung zwischen der zivilen und militärischen Entwicklung von Laserquellen und Optischen Technologien.

Heute sind Laser mit Ausgangsleistungen im Bereich von Milliwatt bis Petawatt (10^{15} W) verfügbar. Militärische Hochenergielaser (HEL) mit einer kontinuierlichen Ausgangsleistung >20 kW werden meist als Wirkwaffe verwendet. Halbleiterlaser im Leistungsbereich einiger 10 W kommen dagegen in militärischen Sensoranwendungen zum Einsatz. Hierzu gehören u.a. die Entfernungsmessung, die Freund/Feind-Erkennung (identification friend or foe, IFF), die Zielmarkierung selbststeuernder Waffen und lasergelenkter Bomben, Blendwaffen sowie die optische Kommunikation.

1 Entfernungsmessung nach dem Pulslaufzeit-Verfahren

Mit handgehaltenen Beobachtungssystemen können Soldaten ihre Gefechtsstände und Operationszentralen auf kurze Distanz schnell und zuverlässig mit wichtigen Informationen wie Zielkoordinaten und Bewegungen des Feindes versorgen. Dies geschieht bei Tag und Nacht und kann durch die Wahl der Messwellenlänge unentdeckt bleiben. Basis des Verfahrens ist die optische Distanzmessung nach dem Prinzip der Pulslaufzeit (TOF, Time-of-Flight). Mit diesem berührungslos arbeitenden Werkzeug lassen sich Abstände und Geschwindigkeiten von einigen cm bis km messen.

Bei der Laufzeitmessung wird ein zeitlich modulierter Lichtpuls durch eine Sendeoptik scharf gebündelt ausgesandt. Aus der Ankunftszeit des wieder aufgefangenen

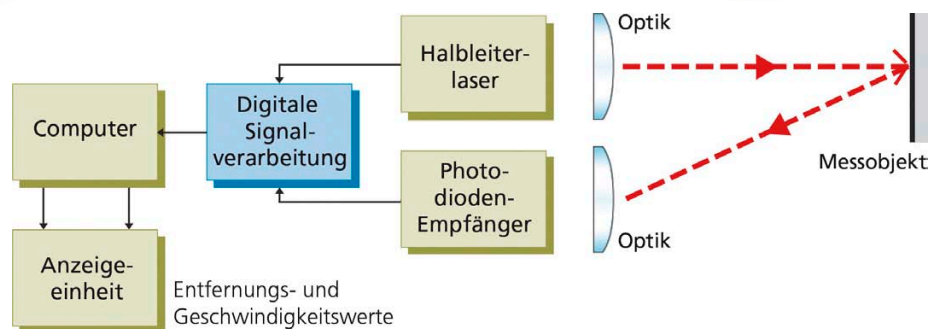


Bild 1: Anordnung zur Messung der Pulslaufzeit

nen reflektierten Lichts wird dessen Laufzeit Δt bestimmt (Bild 1). Daraus lässt sich über die Lichtgeschwindigkeit c die Entfernung l ermitteln, wobei die Brechkraft n des umgebenden Mediums die Lichtgeschwindigkeit reduziert. Da das Licht den Weg zweimal zurücklegt, muss diese doppelte Laufstrecke noch halbiert werden:

$$l = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot n} \quad (\text{Gl. 1})$$

Ein wichtiger Vorteil dieses Verfahrens ist die geringe Reaktionszeit. Der Messbereich beim TOF liegt zwischen 1 m und mehreren 10 km, was angesichts der hohen Lichtgeschwindigkeit den Nachteil einer Messung in sehr kurzen Zeitabständen bedingt (Nano- bis Picosekunden). Daher ist es schwierig, eine höhere Auflösung als einige Zentimeter zu erreichen. Um die Anforderungen an die Zeitmessung zu verringern, werden Verfahren eingesetzt, bei denen die Laserwellenlänge oder Amplitude hochfrequent moduliert wird. Höhere Anforderungen an die Auflösung bestehen allerdings hauptsächlich bei Industrie-Scannern, in der Sicherheitstechnik sowie beim räumlichen Abtasten von Objekten. Militärische TOF-Entfernungsmessgeräte messen typischerweise über Distanzen von mehreren Kilometern mit einer Genauigkeit bis <1 m.

2 Laser als Messsignalquelle

Als TOF-Sender eignen sich sowohl Festkörper- als auch Halbleiterlaser. Während Festkörperlaser Pulsspitzenleistungen bis in den Megawatt-Bereich, sehr kurze Einzelpulse und eine hohe Strahlqualität bieten, sind die meisten Laserdioden darauf ausgelegt, eine optische Dauerstrichleistung (CW, continuous wave) von einigen mW bis zu mehreren Watt abzustrahlen. Solche Laserdioden können nur bedingt übersteuert werden. Übersteigt die optische Leistung auch nur für kurze Zeit den spezifizierten Höchstwert, zerstört die hohe Energiedichte den Resonator in der Diode. Puls laserdioden (PLDs) sind dagegen für kurze, kräftige Überlastungen ausgelegt und eignen sich somit gut als TOF-Signalquelle. Neben der kompakten und leichten Bauform liegen Vorteile von PLDs in der hohen Belastbarkeit gegenüber Beschleunigungen bis >1000 g/ms und in der geringen Leistungsaufnahme. Dies ermöglicht die Integration mobiler Entfernungsmesssysteme z.B. in Zielfernrohre und Ferngläser. Anwendungstypische Vor- und Nachteile verschiedener Lasersender und zugeordneter Detektoren finden sich in **Tabelle 1**. Damit die hohen Spitzenleistungen von PLDs möglich werden, müssen die Dioden

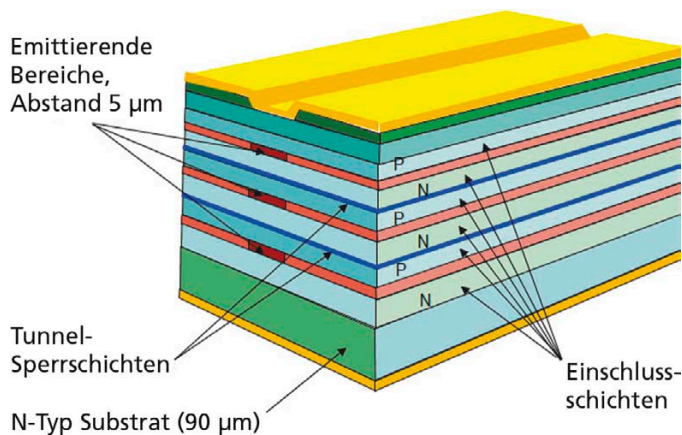


Bild 2: Laserchip (nicht maßstabsgetreu) mit "Multi-Junction"-Technologie: 3 Laserdioden in einem Chip epitaktisch gestapelt

mit einem sehr geringen Tastverhältnis (duty cycle) von typisch 0,1% angesteuert werden. Das bedeutet, dass einem Puls von z.B. 100 ns Dauer eine um den Faktor 1000 längere Pause von 100 µs folgt. Um kHz-Wiederholraten zu erreichen, muss der optische Puls also sehr kurz sein und sehr steile Anstiegsflanken aufweisen. In der Regel erzeugt man PLD-Pulse von einigen 10 ns mit starken Strompulsen im ein- bis zweistelligen Amperebereich. Um diese zu erzeugen bedarf es u.a. besonderer Schaltungstransistoren und kurzer Leitungsführung.

Bei der Auswahl der Pulsaserdiode ist das Basismaterial der aktiven Schichten und damit die emittierte Wellenlänge ein wichtiges Kriterium. Für Laserentfernungsmesser im Sport-, Industrie- und Automobilbereich hat sich AlGaAs mit einer Wellenlänge von 905 nm etabliert, die für das menschliche Auge zwar nicht sichtbar ist, mit herkömmlichen Nachtsichtgeräten und Restlicht-

verstärkern aber detektiert werden kann. Dies gelingt nicht beim Einsatz von InGaAsP-Pulsaserdioden, die bei 1550 nm emittieren. In militärischen Anwendungen wird der Laserstrahl somit „unsichtbar“ für den Feind. Ein weiterer Vorteil von Wellenlängen über 1500 nm ist, dass deutlich höhere Leistungen abgestrahlt werden können und das System nach wie vor augensicher gemäß Laserschutzklasse 1M ist. Diese Vorgabe ergibt sich – aus militärischer Sicht nachvollziehbar – weniger aus Rücksicht auf das Wohlergehen des Gegners als auf Sicherheitsvorschriften in den eigenen Reihen.

3 Multi-Junction-Technik und gesteigerter Effizienz für hohe Laserleistung

Die InGaAsP-Struktur der 1550 nm Laserdioden ist seit vielen Jahren für ihre Zuverlässigkeit, Strahleigenschaften und Tempe-

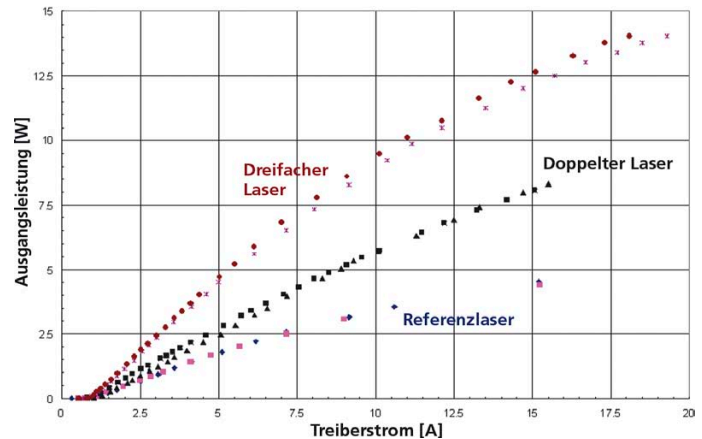


Bild 3: Strom/Leistungs-Kennlinien von Pulsaserdioden mit 1, 2 und 3 integrierten Dioden, hier PLDs mit einer Emittierlänge von 100 µm, einer Resonatorlänge von 1 mm und Emission bei 1550 nm

raturstabilität bekannt. Bei einer Effizienz von 0,35 W/A erreichen Einzelemittier bis zu 12 W.

Höhere Leistungen lassen sich mit der von Laser Components entwickelten "Multi-Junction"-Architektur erzielen (junction = Sperrschicht). Dabei werden in einem Chip mehrere Laserdioden epitaktisch gestapelt (**Bild 2**), so dass der Abstand zwischen zwei Emittieren nur ca. 5 µm beträgt. Bei gleicher Emittierbreite lässt sich die optische Spitzenleistung so nahezu verdreifachen (**Bild 3**).

Eine weitere Option sind Hochleistungs-PLDs mit einer Effizienz von 0,5 W/A. Je nach Streifenbreite lassen sich aus einem solchen Einzelement bis zu 33 W erzielen. Höhere Spitzenleistungen gelingen nur durch Stapelaufbauten: Spitzenleistungen von 50 W sind bei einer Pulslänge von 100 ns möglich, bei kürzeren Pulsen auch über 80 W. Ein weiterer Vorteil dieses Aufbaus ist die schlanke Abstrahlcharakteristik von lediglich 12° x 25°. Die Divergenz der schnellen Achse lässt sich durch die zusätzliche Montage einer FAC-Linse (fast axis collimation) im hermetisch dichten Gehäuse unmittelbar vor dem Laserdiodenchip von 25° auf 10 mrad reduzieren (s. **Bild 4**).

Komponenten-Typ	Vorteile	Nachteile	Anwendungen
Festkörperlaser	Sehr hohe Leistung, kurze Pulse, sehr gute Strahlqualität	Teuer, schwer, hoher Leistungsverbrauch	Entfernungsmessung über sehr große Distanzen, stationäre Systeme
Pulsaserdiode	Günstig, sehr leicht und klein, geringer Leistungsverbrauch	geringere Leistung	Tragbare Entfernungsmesser, Ferngläser, IFF
PIN-Detektor	extrem günstig, sehr klein, geringe Leistungsaufnahme, Betriebsspannung < 25V	geringere Empfindlichkeit	Entfernungsmessung über kurze Distanzen, IFF
APD-Detektor	günstig, sehr klein, rauscharm, geringer Leistungsverbrauch	Vorspannung größer als bei PIN	Entfernungsmessung über lange Distanzen, Scanner

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Laserquellen und Detektoren im Hinblick auf militärische Anwendungen [3]

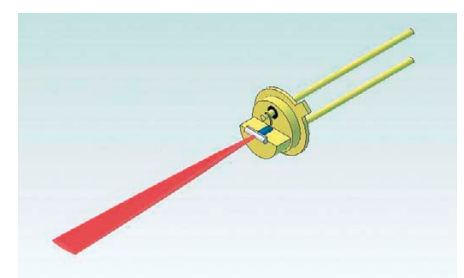


Bild 4: Pulsaserdiode mit vorgesetzter Kollimationslinse (FAC) in einem T0-46-Gehäuse

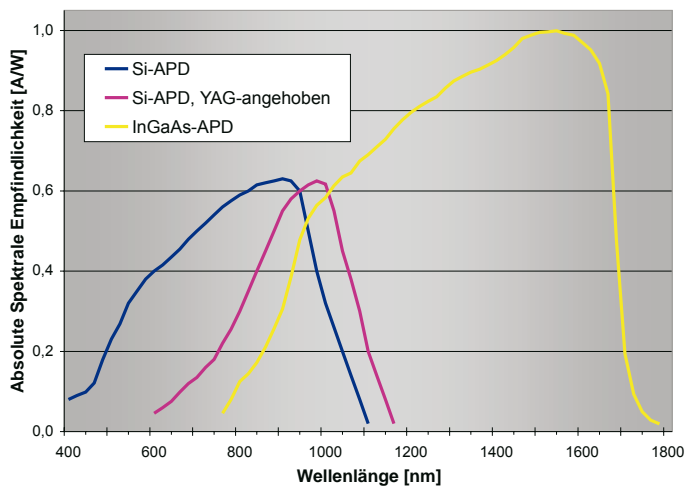


Bild 5: Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Lawinen-Photodioden

4 Spektral angepasste Detektoren

Auf der Empfängerseite nutzen Laser-Entfernungsmesssysteme meist PIN-Photodioden oder Lawinen-Photodioden (avalanche photo diodes, APDs), um die kurzen Lichtpulse der PLDs zu detektieren. Abhängig vom Material liegt deren Empfindlichkeit in verschiedenen Spektralbereichen: Bei Silizium zwischen 400 und 1100 nm, bei InGaAs zwischen 900 und 1700 nm. Während die meisten Si-Detektoren ihre maximale Sensitivität bei 900 nm haben, werden für die Militärtechnik auf Nd:YAG-Laser optimierte Versionen angeboten, deren Empfindlichkeit auf die Emission bei 1060 nm angehoben ist (**Bild 5**). Für die augensichere Wellenlänge von 1550 nm kommen InGaAs-Detektoren zum Einsatz, deren Signal/Rausch-Verhältnis deutlich höher ist als das von Germanium-Versionen.

Bei konventionellen PIN-Photodioden erzeugen einfallende Photonen eine Ladungsträger-Trennung in Form von Elektron-Loch-Paaren, die einen messbaren Photostrom liefern. Bei APDs wird dagegen gleich eine ganze Ladungsträgerlawine ausgelöst. Voraussetzung für die so erhöhte Empfindlichkeit ist, dass an der APD eine Sperrspannung angelegt wird, um die Verarmungszone aufzuweiten. Die vom Licht freigesetzten Ladungsträger werden dort im elektrischen Feld derart beschleunigt, dass sie durch Stoßionisation weitere Elektron-Loch-Paare generieren. Der erzeugte Strom I berechnet sich dabei nach

$$I = R_0 \cdot M \cdot P_s \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei R_0 die spektrale Empfindlichkeit der APD in [A/W] ist, P_s die einfallende

Lichtleistung in [W] und M die interne Verstärkung, die von der angelegten Sperrspannung abhängt (s. **Bild 6**).

5 APD oder PIN-Diode

Beim Leistungsvergleich von APDs und PIN-Dioden genügt es nicht, alleine das Rauschen der Detektoren selber zu betrachten. Entscheidend ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) des gesamten Systems. Bei PIN-Dioden muss also immer auch der zugehörige Vorverstärker berücksichtigt werden, dessen Rauscheigenschaften u.a. frequenzabhängig sind. APDs sind PIN-Dioden immer dann überlegen, wenn sie das Signal deutlich verstärken können, ohne dabei das Gesamt-rauschen des Systems signifikant zu erhöhen. Dies gelingt, indem man die interne Verstärkung der APD so einstellt, dass das Detektorrauschen etwa dem Eingangsrauschen des nachfolgenden Verstärkers oder Lastwiderstands entspricht. Somit werden APDs bevorzugt zur Detektion geringer Lichtintensitäten bei mittleren oder hohen Frequenzen eingesetzt.

Im Vergleich zu PIN-Dioden mit Vorverstärkern erreicht eine APD bei interner Verstärkung von ca. 10- bis 1000-fach eine SNR-Verbesserung um den Faktor 2 bis 5. Sowohl bei PIN-Dioden als auch bei APDs nimmt das Rauschen mit der Bandbreite des Systems zu. Deswegen sollte auch sorgfältig geprüft werden, wie weit die Bandbreite reduziert werden kann.

Zusammenfassung

Augensichere Laser-Entfernungsmesser, die bei einer Wellenlänge von 1550 nm

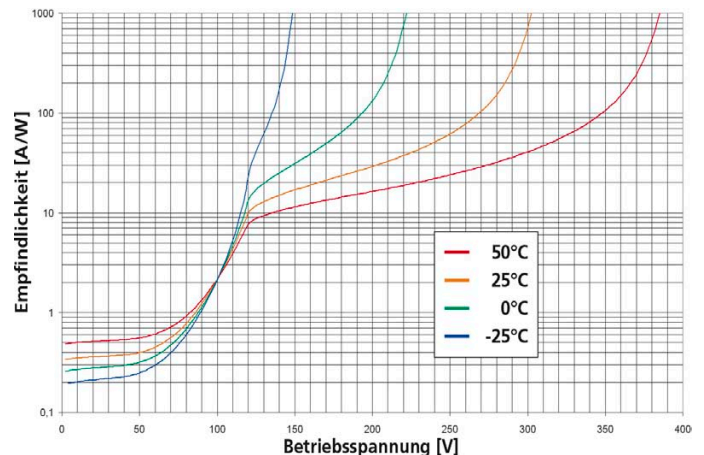


Bild 6: Typische Verstärkung über der Betriebsspannung und abhängig von der Temperatur, gemessen an einer für 1064 nm optimierten Si-APD mit $D = 3 \text{ mm}$

arbeiten, können von herkömmlichen Nachtsichtgeräten oder Restlichverstärkern nicht detektiert werden. Leistungsstarke Puls-laserdioden und empfindliche APDs ermöglichen den Aufbau extrem leichter, kompakter und energiesparender Sensoren für die Integration in tragbare Geräte.

Literaturhinweise:

- [1] Laser Components white paper, *Silicon Avalanche Photodiodes*, Technical application note, August 2006
- [2] J.F. Boucher, V. Viikkinen, P. Rainbow, P. Uusimaa, J. Lyytikäinen, S. Ranta, *Ultra high efficiency 1550nm multi-junction pulsed laser diodes*, Proceedings SPIE, Vol. 7480, p.7480 (2009)
- [3] B. Dion, N. Bertone, *An overview of avalanche photodiodes and pulsed lasers as they are used in 3D laser radar type applications*, white paper, CMC Electronics, Inc. / OEC Group, Montreal, Quebec, Canada
- [4] J. Stupl, G. Neuneck, *Laser als Waffensysteme?*, IFSH, IFAR Working Paper #9, Oktober 2005, www.ifsh.de/IFAR

Ansprechpartner:

Winfried Reeb
Produktionsingenieur & Gruppenleiter
Laserdioden und Detektoren
Laser Components GmbH
Werner-von-Siemens-Str. 15
D-82140 Olching
Tel. 08142/2864-42
Fax 08142/2864-11
eMail: w.reeb@lasercomponents.com
Internet: www.lasercomponents.com

