

Halbleitertechnologie von A bis Z

Optoelektronik & Photonik

Integration & Anwendungen	3
Die optische Übertragungskette	3
Displaytechnik: LED-Backlight, μLED und OLED im Vergleich	4
Sensorik: LiDAR und Time-of-Flight	5
Sensorik: Pulsoximetrie und Näherungssensoren	5
Photonische integrierte Schaltkreise (PIC) - Ausblick	6

Integration & Anwendungen

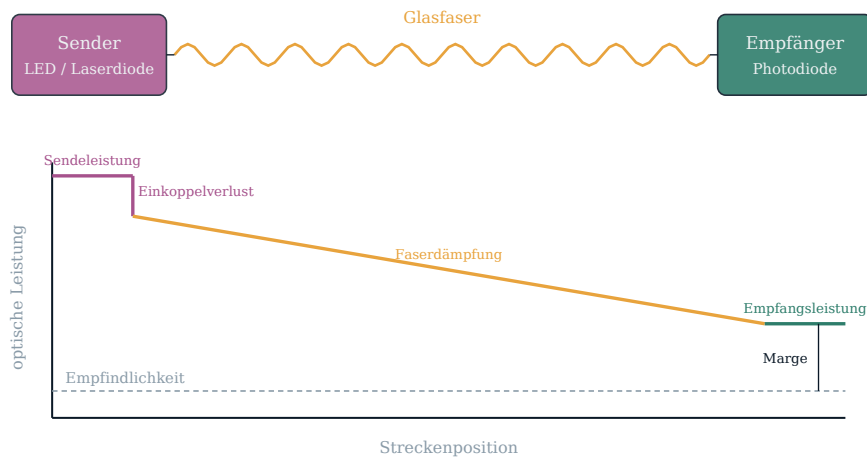
Die optische Übertragungskette

Die vorangegangenen drei Kapitel behandelten LED, Laserdiode und Photodiode als einzelne Bauelemente – in der Praxis funktionieren sie jedoch fast nie isoliert, sondern als Glieder einer Übertragungskette: Sender (LED oder Laserdiode) → Übertragungsmedium (Glasfaser oder freier Raum) → Empfänger (Photodiode). Diese Kette macht deutlich, warum die Materialwahl in den vorherigen Kapiteln so eng gekoppelt war: Ein InGaAsP-DFB-Laser bei 1,55 μm ergibt nur dann ein funktionierendes System, wenn am anderen Ende eine InGaAs-Photodiode mit passender Responsivität in genau diesem Wellenlängenfenster sitzt – Sender und Empfänger sind kein zufälliges Materialpaar, sondern eine aufeinander abgestimmte Systemkomponente.

Bei der Systemauslegung addieren sich die Wirkungsgrade und Verluste jeder Stufe: die Wall-Plug-Efficiency des Senders, die Einkoppeleffizienz in die Faser (typischerweise der verlustreichste Schritt bei Kantenemittern, ein Grund für die zunehmende VCSEL-Nutzung mit ihrem runden, gut koppelbaren Strahlprofil), die Faserdämpfung über die Streckenlänge sowie schließlich die Empfängerempfindlichkeit der Photodiode. Die Leistungsbilanz (Link-Budget) aus Sendeleistung minus aller Verluste muss am Ende oberhalb der minimal detektierbaren Leistung der Photodiode liegen – reicht die Marge nicht aus, kommen Zwischenverstärker (optische Faserverstärker) oder empfindlichere APD-Empfänger zum Einsatz.

Optische Übertragungskette und Link-Budget

Sender, Faser und Empfänger als aufeinander abgestimmte Systemkette



Die Leistungsbilanz aus Sendeleistung minus aller Verluste muss oberhalb der minimal detektierbaren Leistung der Photodiode liegen.

Displaytechnik: LED-Backlight, μ LED und OLED im Vergleich

In der Displaytechnik kommen LEDs in mehreren, technisch grundverschiedenen Rollen zum Einsatz. Bei klassischen LCD-Bildschirmen dient eine Reihe weißer InGaN-LEDs (siehe Kapitel 2) lediglich als Hintergrundbeleuchtung – die eigentliche Bildinformation entsteht durch nachgeschaltete Flüssigkristallzellen, die das LED-Licht pixelweise durchlassen oder blockieren. Bei OLED-Displays hingegen ist jedes Pixel selbst ein Lichtemitter: organische Halbleiterschichten emittieren direkt Licht, wodurch sich Kontrast (echtes Schwarz durch vollständiges Abschalten einzelner Pixel) und Blickwinkelstabilität deutlich verbessern – allerdings zulasten von maximaler Helligkeit und Langzeitstabilität gegenüber anorganischen Halbleitern.

μ LED-Displays verfolgen einen dritten Ansatz: Statt organischer Emmitter werden winzige, anorganische InGaN/AlGaInP-LED-Chips (Kantenlänge oft unter 50 μm) direkt als individuell ansteuerbare Pixel verwendet – dieselbe Halbleitertechnologie aus Kapitel 2, nur massiv miniaturisiert und in extrem hoher Stückzahl auf ein Trägersubstrat übertragen ("Mass Transfer", einer der größten Fertigungsengpässe dieser Technologie). μ LEDs vereinen dadurch die Kontrastvorteile selbstemittierender Pixel mit der Helligkeit, Lebensdauer und Materialstabilität anorganischer III-V-Halbleiter, sind aber wegen der Fertigungskomplexität aktuell noch auf Premium-Anwendungen und große Displaydiagonalen beschränkt.

Sensorik: LiDAR und Time-of-Flight

LiDAR-Systeme (Light Detection and Ranging) nutzen die in Kapitel 3 und 4 behandelten Bauelemente in einer präzisen Zeitmessungsanwendung: Eine Laserdiode – meist ein VCSEL oder Kantenemitter im Nahinfrarot (905 nm oder augensicherere 1550 nm) – sendet einen kurzen Lichtpuls aus, eine schnelle Photodiode (oft eine APD wegen der geringen Rücksignalstärke) registriert die Reflexion vom Zielobjekt. Aus der Laufzeit Δt zwischen Aussenden und Empfangen ergibt sich die Distanz direkt über $d = c \cdot \Delta t / 2$ – bei Lichtgeschwindigkeit entspricht das einer Zeitauflösung im Pikosekundenbereich für Zentimeter-Distanzgenauigkeit, was hohe Anforderungen an die Schaltgeschwindigkeit sowohl der Laserdiode als auch der Photodiode-Ausleseelektronik stellt.

Automotive-LiDAR-Systeme rastern dabei ein ganzes Sichtfeld ab, entweder mechanisch (rotierender Spiegel) oder zunehmend solid-state mittels VCSEL-Arrays, die elektronisch statt mechanisch verschiedene Winkel adressieren – ein direkter Anwendungsfall der in Kapitel 3 beschriebenen VCSEL-Array-Fähigkeit. Bei den 1550-nm-Systemen kommt der Vorteil der bereits für Telekommunikation etablierten InGaAsP/InP-Technologie zum Tragen: Diese Wellenlänge lässt sich mit deutlich höherer Leistung betreiben als 905 nm, ohne die Augensicherheitsgrenzwerte zu überschreiten, da sie von der Hornhaut absorbiert statt auf die Netzhaut fokussiert wird.

Sensorik: Pulsoximetrie und Näherungssensoren

Ein medizintechnisches Anwendungsbeispiel für die Materialkombination aus Kapitel 2 und 4 ist die Pulsoximetrie: Ein Fingerclip-Sensor durchleuchtet das Gewebe mit zwei LEDs unterschiedlicher Wellenlänge (rot, ≈ 660 nm, und infrarot, ≈ 940 nm) und misst mit einer dahinterliegenden Photodiode die durchgelassene Lichtintensität. Sauerstoffgesättigtes und -entsättigtes Hämoglobin absorbieren diese beiden Wellenlängen unterschiedlich stark; aus dem Verhältnis der pulsierenden Absorptionssignale (verursacht durch das arterielle Blutvolumen bei jedem Herzschlag) berechnet das Gerät die Sauerstoffsättigung, ganz ohne Blutentnahme.

Näherungssensoren in Smartphones funktionieren nach einem ähnlichen, aber einfacheren Prinzip: Eine IR-LED (meist GaAs-basiert, siehe Kapitel 2) sendet unsichtbares Licht aus, eine benachbarte Silicium-Photodiode misst die Reflexion – ist ein Objekt (etwa das Ohr beim Telefonieren) nah genug, steigt die reflektierte Intensität deutlich an und schaltet den Bildschirm ab. Dieselbe Grundarchitektur, erweitert um strukturiertes Licht aus VCSEL-Arrays (siehe Kapitel 3), bildet auch die Basis für 3D-Gesichtserkennungssysteme, die statt

einer einfachen Ja/Nein-Näherungsmessung ein vollständiges Tiefenbild der Szene rekonstruieren.

Photonische integrierte Schaltkreise (PIC) – Ausblick

Alle bisher behandelten Bauelemente – Laser, Photodiode, teils auch Modulatoren – existieren heute überwiegend als diskrete, einzeln gehäuste Komponenten, die über Fasern oder freien Raum miteinander verbunden werden. Photonische integrierte Schaltkreise (PICs) verfolgen denselben Miniaturisierungs- und Integrationsgedanken, der die Mikroelektronik seit Jahrzehnten prägt: mehrere optische Funktionen – Laser, Wellenleiter, Modulatoren, Photodetektoren – werden auf einem einzigen Chip kombiniert, verbunden durch strukturierte Wellenleiter statt diskreter Fasern.

Die Silicium-Photonik ist dabei der aktuell wichtigste Trend: Da Silicium selbst nicht emittiert (Kapitel 1), aber als Wellenleiter- und Detektormaterial (in Kombination mit Germanium, siehe Kapitel 4) hervorragend geeignet ist und zudem auf etablierten CMOS-Fertigungslinien hergestellt werden kann, lassen sich passive und detektierende photonische Funktionen kostengünstig integrieren. Die Lichtquelle selbst bleibt dabei meist ein separat gefertigter III-V-Laserchip (InP-basiert), der nachträglich auf den Silicium-Chip gebondet oder über Hybridintegration angekoppelt wird – ein aktives Forschungsfeld, das die in diesem Bereich behandelten III-V-Materialsysteme direkt mit der Silicium-Fertigungswelt der übrigen Kapitel auf der Webseite verknüpft. Anwendungstreiber sind vor allem Rechenzentren, wo PICs die elektrische Verkabelung zwischen Servern zunehmend durch optische Verbindungen mit höherer Bandbreite und geringerem Energieverbrauch pro Bit ersetzen.