

Halbleitertechnologie von A bis Z

Optoelektronik & Photonik

Laserdioden	3
<i>Vom LED zum Laser: Besetzungsinversion und stimulierte Emission</i>	3
<i>Der optische Resonator und Modenbildung</i>	3
<i>Kantenemitter: Fabry-Pérot- und DFB-Laser</i>	4
<i>VCSEL: Aufbau und Vorteile</i>	4
<i>Materialsysteme und Anwendungsfelder</i>	5

Laserdioden

Vom LED zum Laser: Besetzungsinversion und stimulierte Emission

Der fundamentale Unterschied zwischen LED und Laserdiode liegt nicht im Grundaufbau – beide basieren auf einem pn-Übergang aus direktem Halbleiter –, sondern im Emissionsmechanismus. Eine LED erzeugt Licht durch spontane Emission: Ein angeregtes Elektron rekombiniert zu einem zufälligen Zeitpunkt mit einem Loch, das entstehende Photon hat eine zufällige Phase und Richtung. Ein Laser hingegen nutzt stimulierte Emission: Ein bereits vorhandenes Photon trifft auf ein angeregtes Elektron-Loch-Paar und löst dessen Rekombination aus – das neu entstehende Photon ist dabei in Phase, Richtung und Wellenlänge exakt identisch mit dem auslösenden Photon. Dieser Verstärkungsmechanismus (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) erzeugt kohärentes Licht, im Gegensatz zum inkohärenten LED-Licht.

Damit stimulierte Emission gegenüber Absorption überwiegt, muss im aktiven Medium Besetzungsinversion herrschen: Es müssen mehr Elektronen im energetisch höheren Leitungsband-Zustand vorhanden sein als im niedrigeren Valenzband-Zustand – ein Zustand, der im thermischen Gleichgewicht nie auftritt und daher aktiv durch hohe Injektionsstromdichte erzwungen werden muss. Bei Halbleiterlasern übernimmt der stark in Durchlassrichtung gepumpte pn-Übergang diese Aufgabe: Oberhalb eines bestimmten Schwellstroms kippt das Verhältnis, optische Verstärkung setzt ein, und aus spontaner Emission wird zunehmend stimulierte Emission.

Der optische Resonator und Modenbildung

Besetzungsinversion allein erzeugt noch keinen Laser, sondern nur ein optisch verstärkendes Medium. Für den eigentlichen Lasereffekt braucht es zusätzlich Rückkopplung: einen optischen Resonator, meist realisiert durch zwei parallele, teilreflektierende Spiegelflächen beidseits der aktiven Zone. Bei einfachen Kantenemittern entstehen diese Spiegel durch die natürlichen Kristallspaltflächen des Halbleiters selbst (Bruchflächen entlang bestimmter Kristallebenen), die durch den Brechungsindexsprung zu Luft bereits eine Reflektivität von 30–35 % aufweisen – ausreichend, um Licht mehrfach durch das Verstärkungsmedium zu zirkulieren.

Nur Licht, dessen Wellenlänge ein ganzzahliges Vielfaches der Resonatorlänge ergibt (stehende Welle zwischen den Spiegeln), wird konstruktiv verstärkt – alle anderen Wellenlängen interferieren destruktiv und werden unterdrückt. Dies führt zur charakteristischen longitudinalen Modenstruktur eines Lasers: statt

eines breiten, kontinuierlichen Spektrums wie bei der LED zeigt sich ein Kamm scharfer, eng benachbarter Emissionslinien, deren Abstand durch die Resonatorlänge bestimmt wird. Übersteigt die optische Verstärkung innerhalb des Resonators die Summe aller Verluste (Spiegeltransmission, interne Absorption, Streuung), setzt Laseroszillation ein – der Schwellstrom I_{th} markiert genau diesen Übergangspunkt und ist eine der wichtigsten Kenngrößen jeder Laserdiode.

Kantenemitter: Fabry-Pérot- und DFB-Laser

Die einfachste Bauform ist der Fabry-Pérot-Laser: zwei parallele Spaltflächen als Resonatorspiegel, Licht wird seitlich aus der Chipkante ausgekoppelt (daher "Kantenemitter" oder Edge-Emitting Laser). Da der Resonator meist mehrere hundert Mikrometer lang ist, unterstützt er gleichzeitig mehrere longitudinale Moden, deren Wellenlängenabstand invers proportional zur Resonatorlänge ist – ein Fabry-Pérot-Laser emittiert daher typischerweise multimodig, mit mehreren Spektrallinien im Abstand von etwa 0,1–0,3 nm.

Für Anwendungen, die eine einzelne, extrem stabile Wellenlänge benötigen – allen voran die Glasfaserkommunikation, wo chromatische Dispersion sonst das Signal verschmiert – kommt der DFB-Laser (Distributed Feedback) zum Einsatz. Statt der einfachen Endspiegel wird hier ein periodisches Beugungsgitter direkt in die Schichtstruktur nahe der aktiven Zone integriert (Gitterperiode im Bereich weniger hundert Nanometer, hergestellt meist per Elektronenstrahlolithographie). Dieses Gitter reflektiert wellenlängenselektiv über die gesamte Resonatorlänge verteilt statt nur an den Endflächen und erzwingt so longitudinal-monomodigen Betrieb mit einer Seitenmodenunterdrückung von typischerweise über 30–40 dB. DFB-Laser auf InGaAsP/InP-Basis bei 1,55 μm sind der Industriestandard für Langstrecken-Glasfaserübertragung.

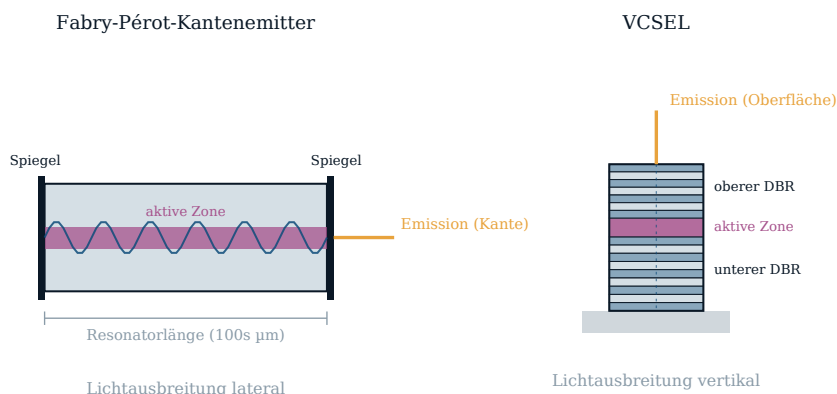
VCSEL: Aufbau und Vorteile

Eine grundlegend andere Geometrie verfolgt der VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser): Statt Licht seitlich aus der Kante auszukoppeln, emittiert er senkrecht zur Waferoberfläche. Der Resonator liegt vertikal, gebildet aus zwei DBR-Spiegeln (Distributed Bragg Reflector) – Stapeln aus alternierenden Schichten unterschiedlichen Brechungsindex, jeweils eine Viertelwellenlänge dick, die durch konstruktive Interferenz Reflektivitäten von über 99 % erreichen können, da einzelne Grenzflächenreflexionen bei Halbleitern zu gering für einen brauchbaren Resonator wären. Da die aktive Zone dabei nur wenige Mikrometer lang ist statt mehrerer hundert Mikrometer

bei Kantenemittern, sind extrem hohe Spiegelreflektivitäten nötig, um trotz der kurzen Verstärkungsstrecke die Laserschwelle zu erreichen.

Die vertikale Bauweise bringt entscheidende praktische Vorteile: VCSEL lassen sich wie LEDs auf Waferebene testen, bevor sie vereinzelt werden (bei Kantenemittern ist das erst nach dem Spalten möglich), sie emittieren ein rundes, wenig divergentes Strahlprofil (statt des elliptischen Strahls von Kantenemittern, was die Faserkopplung vereinfacht), und sie lassen sich dicht gepackt zu zweidimensionalen Arrays anordnen. Diese Eigenschaften machen VCSEL zur dominanten Technologie für kurze Datacom-Strecken (Rechenzentren, 850-nm-GaAs-VCSEL über Multimode-Glasfaser) und – in großer Stückzahl – für 3D-Sensorik wie Gesichtserkennung und LiDAR-Beleuchtung in Smartphones, wo Arrays aus tausenden VCSEL gleichzeitig strukturiertes Licht projizieren.

Optischer Resonator: Kantenemitter vs. VCSEL
Lateraler Resonator (Fabry-Pérot) vs. vertikaler DBR-Resonator (VCSEL)



Kurze aktive Zone im VCSEL erfordert Spiegelreflektivitäten $> 99\%$ – daher DBR-Stapel statt einfacher Spaltflächen.

Materialsysteme und Anwendungsfelder

Die Materialwahl folgt denselben Grundsätzen wie bei der LED, ergänzt um resonatorspezifische Anforderungen. GaAs/AlGaAs-Systeme decken 780–980 nm ab (CD/DVD-Laser historisch, heute vor allem Pump Laser für Faserlaser und VCSEL für Datacom/Sensorik). InGaAsP/InP dominiert bei 1,3 µm und 1,55 µm für Telekommunikation, da diese Wellenlängen mit den Dämpfungs- und Dispersionsminima von Quarzglasfasern zusammenfallen. GaN-basierte Laserdioden decken den blauvioletten Bereich um 405 nm ab und ermöglichten die hochauflösende Blu-ray-Speichertechnik, da kürzere Wellenlängen eine kleinere Beugungsbegrenzung und damit höhere Speicherdichte erlauben.

Über die klassische Datenübertragung hinaus haben sich Laserdioden in drei weiteren Feldern etabliert: In der Materialbearbeitung ersetzen leistungsstarke Diodenlaser-Barren (arrayartig angeordnete Kantenemitter) zunehmend Gaslaser beim Schweißen, Schneiden und als Pumpquelle für Festkörperlaser, dank hoher elektrischer Effizienz (Wandlungswirkungsgrad oft über 50 %). In der Sensorik nutzt LiDAR (Light Detection and Ranging) kurze Laserpulse zur Laufzeitmessung für Umgebungserfassung in Automotive- und Robotik-Anwendungen – hier verschieben sich VCSEL zunehmend in den Vordergrund gegenüber klassischen Kantenemittern. Und in der Displaytechnik dienen rote, grüne und blaue Laserdioden als Lichtquelle für Laserprojektoren, wo ihre hohe spektrale Reinheit einen deutlich größeren Farbraum ermöglicht als LED- oder Lampenprojektoren.