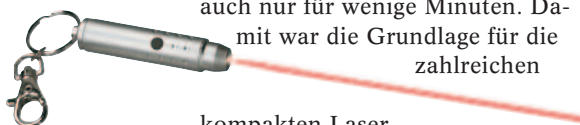


Strahlende Winzlinge

Dank kompakter Halbleiterlaser trat der Laser den Siegeszug in den Alltag an und findet sich etwa in CD- und DVD-Spielern, Laserpointern und nicht zuletzt in der optischen Kommunikation, wo Laserdioden hohe Übertragungsraten ermöglichen.

1964 drohte der Bösewicht Blofeld im Film „Goldfinger“ James Bond mit einer mannshohen, bedrohlich aussehenden Laserkanone. In der Realität waren dagegen winzigere und vor allen Dingen nützlichere Bauarten gefragt. 1962 strahlte der erste, nur wenige Zentimeter große Halbleiterlaser, wenn auch nur für wenige Minuten. Damit war die Grundlage für die zahlreichen

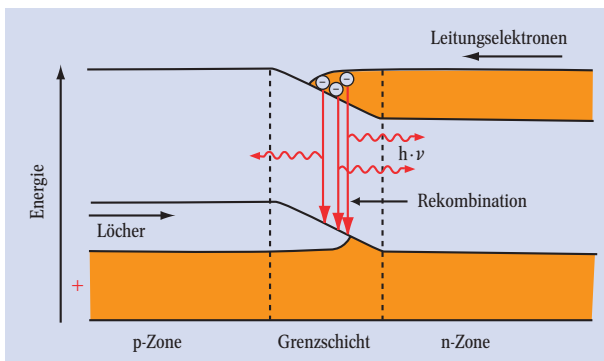


Ein kompakter Laserpointer für den Schlüsselanhänger. (Foto: Zweibrüder Optoelectronics)

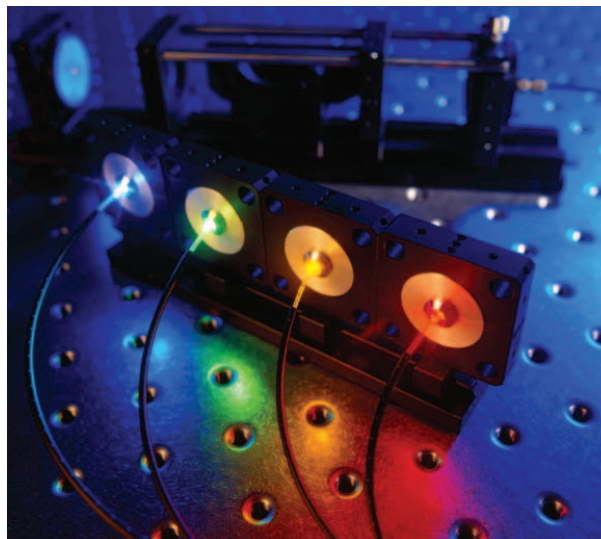
kompakten Laserquellen gelegt, wie man sie etwa in CD-Spielern, Laserpointern, Lichtschranken oder Strichscannern im Supermarkt findet.

Halbleiterlaser lassen sich in Millimetergröße realisieren. Moderne Halbleiterlaser, meist als Laserdiode bezeichnet, gehören zu den effizientesten Lasersystemen überhaupt, denn mit ihnen lassen sich über 50 Prozent der eingesetzten elektrischen Energie in Lichtenergie umsetzen.

Die Laserdiode besteht aus einem positiv und einem negativ dotierten Halbleiter. Das Bänderschema (Abb.) zeigt, dass die Elektronen im n-Material das Leitungsband, die Löcher im p-Material das Valenzband auffüllen. Wird die Diode in Durchlassrichtung betrieben, so stellt sich bei einer bestimmten Spannung das Bänderschema so ein, dass im Übergangsbereich zwischen p- und n-Halbleiter, der aktiven Zone, energetisch hoch liegende Zustände im Leitungsband



Die Funktion des Halbleiterlasers beruht auf einem Übergang zwischen einem positiv und einem negativ dotierten Halbleitermaterial. In der aktiven Grenzschicht rekombinieren Löcher und Elektronen und senden dabei Photonen aus.



Mit Hilfe verschiedenfarbiger Laserdioden lassen sich in der optischen Kommunikationstechnik noch mehr Daten über die Glasfaserkabel übertragen. (Foto: Kurt Fuchs, Fraunhofer IIS)

mit Elektronen besetzt sind. Tief liegende Zustände im Valenzband sind dagegen leer. Wie bei anderen Lasertypen liegt damit eine so genannte Besetzungsinversion vor, eine notwendige Bedingung für die stimulierte Emission von Laserlicht.

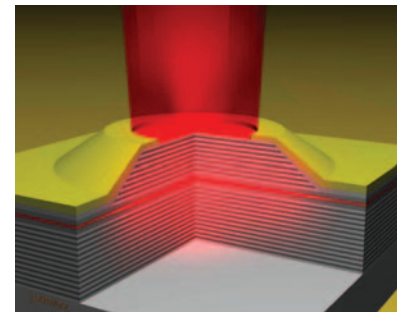
Zur eigentlichen Lasertätigkeit kommt es aber erst dann, wenn diese Emission in einem Resonator stattfindet. Die so genannten kantenemittierenden Laserdioden, wie sie etwa in der Kommunikationstechnik zum Einsatz kommen, emittieren die Strahlung senkrecht zur Wachstumsrichtung des Kristalls. Die Resonatorspiegel werden praktischerweise durch die Spaltkanten des Halbleiterkristalls gebildet: mit ihnen lässt sich ein Teil des Lichtes auskoppeln und etwa 30 Prozent werden zurück in das Lasermedium reflektiert.

Die Farbe des Lichtes bzw. seine Wellenlänge hängt von dem Energieunterschied der Zustände im Leitungs- und Valenzband ab. Dieser wiederum unterscheidet sich für verschiedene Halbleitermaterialien. Für infrarote oder rote Laserdioden eignen sich z. B. Gallium-Arsenid (GaAs) oder Gallium-Phosphid (GaP).

Oberflächlich strahlt besser

Halbleiter-Laser auf Indium-Phosphid-Basis bieten sich als Sendeelemente in der optischen Kommunikationstechnik an, da sich mit ihnen kostengünstig, strom- und platzsparend die gewünschten Wellenlängen um 1310 und 1550 nm in geeigneter Strahlqualität erzeugen lassen. Seit Jahren wird weltweit an neuartigen Halbleiterlaser-Typen geforscht, die senkrecht durch die Oberfläche emittieren. Bei diesen oberflächenemittierenden

Lasern (VCSEL, Vertical Cavity Surface Emitting Laser) bestehen die Laserspiegel aus komplexen Halbleiterschichten – den so genannten Bragg-Reflektoren, das sind alternierende Schichtfolgen zweier Halbleitermaterialien mit unterschiedlichem Brechungsindex, die zusammen mit dem Lasermaterial in einem Epitaxieprozess als Einkristall gewachsen werden. Zwei dieser Bragg-Spiegel bilden einen Resonator hoher Güte. Dazu muss ihre Dicke der halben Wellenlänge des emittierten Laserlichts entsprechen. Denn nur dann reflektiert



Aufbau einer oberflächenemittierenden Laserdiode (vgl. Text), die aktive Schicht ist rot eingezeichnet. (Quelle: Universität Stuttgart)

der Bragg-Spiegel das Licht nahezu vollständig und wirkt effizienter als die gebrochene Kristallfacette des kantenemittierenden Halbleiterlasers. Im Vergleich zu diesen benötigen die VCSEL mit ihrer kompakteren Bauweise sogar geringere Ströme, und ihre Wellenlänge lässt sich genauer einstellen. VCSEL sind sehr schmalbandige Lichtquellen und besitzen eine geringe Strahldivergenz. Damit lässt sich das Laserlicht besser in die Glasfasern einkoppeln.

Mehr Farben, mehr Daten

Bei der optischen Datenübertragung werden die elektrischen Signale zunächst in Lichtsignale einer bestimmten Wellenlänge umgewandelt. Im einfachsten optischen Netzwerk werden dann sendeseitig die Daten in Form kurzer vorverstärkter Lichtimpulse gleicher Wellenlänge, z. B. 1550 nm, in die Glasfasern eingekoppelt. Typische Datenübertragungsraten liegen bei 10 GBit/s, d. h., das Laserlicht wird pro Sekunde mehrere Milliarden Mal ein- und ausgeschaltet, um binäre Einsen und Nullen zu übermitteln. Das Lichtsignal der Laserdiode oder des VCSEL wird in den Glaskern des Lichtleiters eingekoppelt.¹⁾

Indem man gleichzeitig Laserdioden mit unterschiedlicher Wellenlängen verwendet (Wellenlängen-Multiplexing, Abb. auf S. 54 oben) lassen sich noch wesentlich größere Datenraten realisieren. Der Unterschied zwischen den Wellenlängen der einzelnen Träger kann sehr gering sein und liegt gemäß einer Empfehlung der International Telecommunication Union (ITU) zwischen 0,8 nm und 20 nm.

Als leistungsstärkste Variante gilt das so genannte dichte Wellenlängenmultiplex-Prinzip (Abk. DWDM für Dense Wavelength Division Multiplex). Der Abstand der Wellenlängen liegt hierbei zwischen 0,8 nm (100 GHz) und 1,6 nm (200 GHz). Dies lässt sich nur mit Hilfe von äußerst schmalbandigen, stabilen Lasern und extrem selektiven Farbfiltern bewerkstelligen. Mit DWDM erreicht man Datenübertragungs-

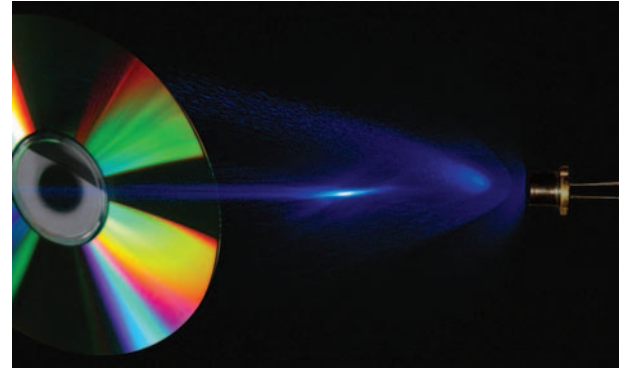
raten von über einem TBit/s mit bis zu 160 Kanälen bei 10 GBit/s oder mehreren Kanälen mit 40 GBit/s.

Eine kostengünstigere Variante ist das grobe Wellenlängenmultiplexen (Abk. CWDM für Coarse Wavelength Division Multiplex). Zur Übertragung werden maximal 18 Wellenlängen im Bereich von 1270 bis 1610 nm mit einem Abstand von 20 nm verwendet. Mit dieser Variante des Wellenlängenmultiplexen lassen sich Datenübertragungsraten bis 2,5 Gbit/s und Reichweiten bis 70 km ohne Signalverstärkung pro Kanal erreichen. Da keine teuren temperaturstabilisierten Laser und schmalbandigen Filter zur Trennung der Wellenlängen benötigt werden, bietet sich dieses Verfahren vor allem zur Datenübertragung bei mittleren Entfernungen an, etwa in innerstädtischen Kommunikationsnetzen.

Blaue Aussichten

Den Sprung zum Massenprodukt machten die Laserdioden mit der Einführung der CD Anfang der Achtziger-Jahre. Während sich in herkömmlichen CD-ROM-Laufwerken Infrarot-Laserdioden mit einer Wellenlänge von 780 Nanometern finden, verwendet man bei der DVD-Technik kurzwelligere Laserdioden, die bei 640 nm, also im sichtbaren roten Wellenlängenbereich, emittieren. Dadurch ist es möglich, statt nur 700 Megabyte Daten wie bei einer CD-ROM bis zu 4,7 Gigabyte zu speichern. Um noch mehr Daten auf die Silberscheiben packen zu können, etwa Kinofilme in noch

höherer Qualität, benötigt man also noch kürzere Wellenlängen. Dem Japaner Shuji Nakamura gelang es 1996 erstmals, eine auf Gallium-Nitrid (GaN) basierende Leuchtdiode



Violette und blaue Laserdioden ermöglichen auf DVDs Speicherdichten von 20 Gigabyte und mehr. (Foto: IAF, Universität Ulm)

(Wellenlänge um 420 nm) einige Sekunden zum Leuchten zu bringen.

Mittlerweile sind Dank hartnäckiger Forschung und Entwicklungsarbeit langlebige auch blaue Laserdioden kommerziell erhältlich und neue DVD-Technologien stehen in den Startlöchern. Die Hersteller haben sich jedoch – zum Nachteil der Kunden – nicht auf einen gemeinsamen Standard einigen können.²⁾

Blaue, grüne und rote Laserdioden im Verbund könnten auch einmal die Vision eines Laser-Fernsehens ermöglichen: Das Fernsehgerät wäre dann nur noch ein zigarrenschachtelgroßes Gerät, das das Fernsehbild an die Wand projiziert. Bislang hat sich diese Idee aber noch nicht als markttauglich erwiesen.

KATJA BAMMEL

1) vgl. Physik journal, Oktober 2002, S. 62

2) Vermutlich kommen 2006 die beiden inkompatiblen DVD-Standards HD-DVD und Blu Ray auf den Markt.

Dr. Katja Bammel,
science & more
redaktionsbüro,
E-Mail: kb@science-
and-more.de