

Vom hässlichen Entlein zum Schwan

Vor fünfzig Jahren wurde der Halbleiterlaser erfunden.

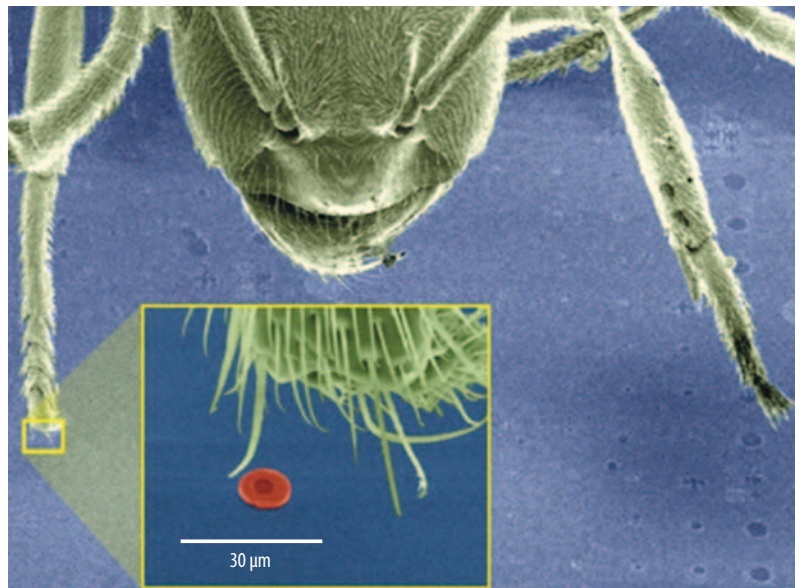
Dieter Bimberg

Ohne Halbleiterlaser würde unser Alltag völlig anders ausschauen. Das weltverbindende Internet und vieles andere, was moderne Gesellschaften prägt, würde es nicht geben. Heutzutage basieren etwa 60 Prozent des Laserweltmarkts auf Diodenlasern, das entspricht einem Umsatz von etwa sieben Milliarden Dollar. Selten jedoch wurde eine Erfindung zunächst so mit Skepsis betrachtet und mit Häme kommentiert wie jene des Halbleiterlasers.

Die Geschichte des Halbleiterlasers ist geprägt von Irrtümern und Konfusion. Es ist die Geschichte eines Konzepts, für dessen Erfolg es immer neuer Anläufe bedurfte, und zwar über Jahrzehnte hinweg. Die Entwicklung des Halbleiterlasers ist ein Musterbeispiel für interdisziplinäre Forschung mit langem Atem, für das Zusammenwirken von Materialwissenschaften mit unterschiedlichsten physikalischen Disziplinen, mit Computerentwicklung, Kommunikationstechnik und Maschinenbau. Es ist eine Geschichte, die uns lehrt, dass man nie aufgeben sollte.

1960 beobachtete Theodore Maiman stimulierte Emission zwischen elektronischen Übergängen von Chrom-Atomen in Al_2O_3 (Rubin) und bestätigte damit Einsteins Vorhersage aus dem Jahr 1917. Innerhalb von 18 Monaten wurden der aus dem Staunen nicht herauskommenden Weltöffentlichkeit weitere Laser präsentiert.¹⁾ Dazu zählten Festkörperlaser, z. B. auf YAG-Basis, sowie die ersten Gas- und Halbleiterlaser. Festkörper- und Gaslaser arbeiteten von Beginn an bei Zimmertemperatur. Ihr Anwendungspotenzial in der Forschung, von der Spektroskopie bis zur Kernfusion, war ebenso offensichtlich wie in der Materialbearbeitung – vom Bohren kleinster Löcher in der Uhrenherstellung, über das Schweißen in der Automobilfertigung, bis hin zum Härten der Zylinder von Dieselmotoren.

Halbleiterlaser hingegen funktionierten nur bei der Temperatur flüssigen Heliums, also bei 4,2 K. Ihre theoretischen Grundlagen legten von 1960 bis 1962 im Wesentlichen vier Arbeitsgruppen um Nicolay Basov vom Lebedev-Institut der Russischen Akademie der Wissenschaften, um Willard Boyle und David Thomas von den Bell Labs, um Georges Duraffourg vom CNET in Frankreich und um William Dumke von IBM [1]. Die Idee war einfach: Man nehme einen pn-Übergang in einem Halbleiter (Homoubergang) und injiziere



Ladungsträger, d. h. Elektronen von der n-Seite und Löcher von der p-Seite. Damit sind die beiden Grundvoraussetzungen für einen Laser erfüllt:

- Im Bereich der überlappenden Elektronen- und Löcherpopulationen entsteht Ladungsträgerinversion als notwendige und hinreichende Voraussetzung für stimulierte Emission in einem Zwei-Niveau-System (Abb. 2a). Die thermodynamische Laserbedingung, dass die Differenz der Quasi-Fermi-Niveaus größer ist als der fundamentale Bandabstand des Halbleiters, lässt sich erfüllen. Die Quasi-Fermi-Niveaus hängen freilich von der Temperatur ab, sodass dies auch für den Schwellenstrom eines Halbleiterlasers gilt.
- In den sich überlappenden Bereichen höchster Ladungsträgerdichten von Elektronen und Löchern erhöht sich der Brechungsindex (Abb. 2a). Die umge-

Oberflächenemittierende Diodenlaser (rot) sind selbst verglichen mit einer Ameise winzig klein.

KOMPAKT

- Die Geburtsstunde des Diodenlasers war 1962, als es vier Arbeitsgruppen zeitgleich gelang, die Emission kohärenten Lichts aus GaAs-pn-Übergängen nachzuweisen.
- 1968 wurde der erste, gepulste Doppelheterostruktur-Halbleiterlaser bei Zimmertemperatur realisiert. Ab 1970 war auch ein kontinuierlicher Betrieb möglich.
- Die Verkleinerung der Strukturen und die Einschränkung der Ladungsträgerbewegung auf zwei oder gar null Dimensionen löste einen wahren Goldrausch aus. Heute sind die winzigen Diodenlaser ökonomisch von größter Bedeutung.

¹⁾ vgl. dazu auch das Schwerpunktheft des Physik Journal, Juli 2010

Prof. Dr. Dieter Bimberg, Institut für Festkörperphysik, TU Berlin, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin

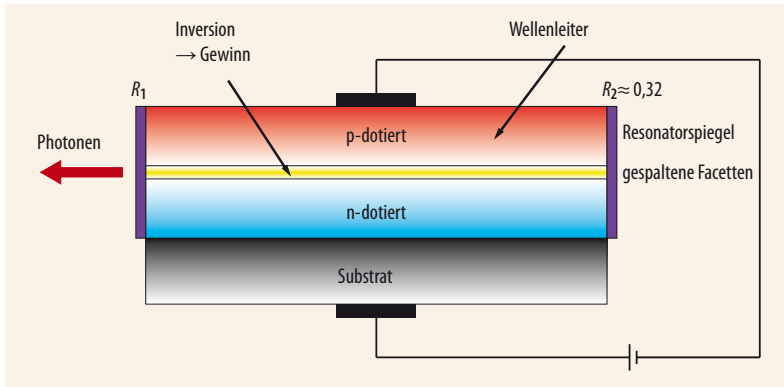


Abb. 1 In seiner Grundform besteht ein Diodenlaser aus einem einzelnen pn-Übergang, in den von der n-Seite (blau) Elektronen und von der p-Seite (rot) Löcher injiziert werden, sodass an der Grenze Photonen emittiert werden.

benden Bereiche geringerer Ladungsträgerkonzentration haben einen geringeren Brechungsindex, sodass ein Wellenleiter entsteht, in dem Totalreflexion auftritt.

Als Material wurde zuerst Gallium-Arsenid (GaAs) genutzt, eine der von Heinrich Welker entdeckten III-V-Verbindungen. Ihre kubischen Vertreter (neben GaAs auch InP, InSb, InAs, GaSb, GaP, etc.) weisen eine entscheidende Besonderheit auf: Sie spalten bei Anlegen geringen äußeren Drucks entlang einer kristallographischen (110)-Ebene mit atomarer Perfektion. Wächst man den pn-Übergang auf einem (100)-orientierten Substrat, entstehen durch das Spalten Spiegel und zusammen mit dem lateralen Wellenleiter eine Resonatorstruktur, die an den Endflächen einen Reflexionskoeffizienten von etwa 32 % aufweist. Dieser lässt sich leicht durch Verspiegelung bzw. Entspiegelung der Endflächen spezifischen Erfordernissen anpassen (**Abb. 1**). Die Ladungsträger induzieren vertikal einen Brechungsindexsprung von nur 0,1 bis 1 %. Der Wellenleiter ist breit, gegeben durch die Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger. Die Wellenführung ist hierbei nur schwach. Die Laseroszillation setzt ein, wenn der quantenmechanisch definierte Gewinn bei der stimulierten Rekombination von Elektronen und Löchern die Verluste, sowohl im Wellenleiter als auch durch Abstrahlung der elektromagnetischen Welle an den Endflächen, übertrifft.

1962, also vor genau 50 Jahren, gelang es vier miteinander konkurrierenden industriellen Arbeitsgruppen fast gleichzeitig, die Emission kohärenten Lichts aus GaAs-pn-Übergängen nachzuweisen. Die Gewinner des Rennens um den ersten Diodenlaser auf der Grundlage eines Homoübergangs waren die Arbeitsgruppen um Robert N. Hall von GEC Schenectady, Marshall I. Nathan von IBM, Nick Holonyak von GEC Syracuse und Theodore M. Quist von den Lincoln Labs am MIT. Die Schwellenstromdichte betrug etwa 100 000 A/cm² bei einer Temperatur von 4,2 K (**Abb. 3**). Die externe Quantenausbeute lag weit unter einem Prozent, d. h. der überwiegende Teil der zugeführten elektrischen Energie wandelte sich in Wärme um und führte bei dem Versuch, nur geringfügig die Temperatur zu erhöhen, zum Verdampfen des Halbleiter-pn-Übergangs.

Viele Forscher auf der ganzen Welt erkannten unmittelbar, wie wichtig Halbleiterlaser bei Zimmertemperatur wären. Weitere Teams der Bell Labs, von RCA und IBM gingen in das Rennen und erzielten Misserfolg um Misserfolg. So galten Halbleiterlaser nach einiger Zeit als ein für Anwendungen nutzloses akademisches Spielobjekt. Das Problem lag im pn-Homoübergang verborgen. Im Betrieb erstrecken sich die Ladungsträger über einen zu großen Bereich mit relativ niedriger Ladungsträgerdichte. Dazu kamen die enormen Verluste infolge der schlechten vertikalen Wellenführung.

Irrtümer und die Morgenröte

Zu Beginn der Sechzigerjahre waren Heteroübergänge, d. h. Übergänge zwischen zwei Halbleitern unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung, für Anwendungen in elektronischen Bauelementen insbesondere durch die Arbeiten von William Shockley und Aleksandr Gubanov nicht nur bekannt, sondern fest etabliert. Die Injektionseffizienz von Ladungsträgern ist, verglichen mit jener in Homoübergängen, entscheidend größer.

1963 schlugen Zhores Alferov und Rudi Kazarinov in einer Patentanmeldung und Herbert Krömer in einer Veröffentlichung unabhängig voneinander vor, Ladungsträger in einer Doppelheterostruktur zu lokalisieren [1]. Dies würde bei gleichem Strom die Ladungsträgerdichte um mehrere Größenordnungen erhöhen. 1966 bemerkte Alferov, dass eine Doppelheterostruktur, die aus zwei Barrieren mit einem größeren Bandabstand besteht, in die ein Material mit kleinerem Bandabstand eingebettet ist, zudem einen wesentlich

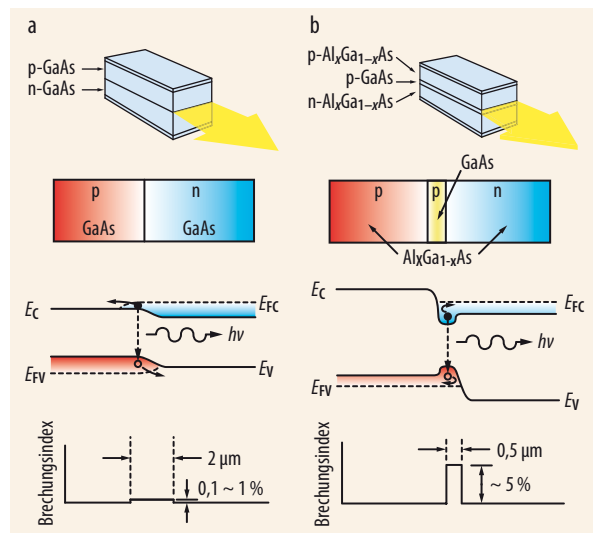


Abb. 2 Diodenlaser können auf einem pn-Übergang in einem Halbleiter (Homoübergang, a) oder an der Grenze zwischen verschiedenen Halbleitern basieren (Heteroübergang, b). Bandstruktur und Verlauf des Brechungsindex unterscheiden sich deutlich. E_C und E_V sind die Leitungs- bzw. Valenzbandkanten der elektronischen Bandstruktur, E_{FC} bzw. E_{FV} die Quasi-Fermi-Niveaus der Elektronen bzw. Löcher, bei angelegter Flussspannung.

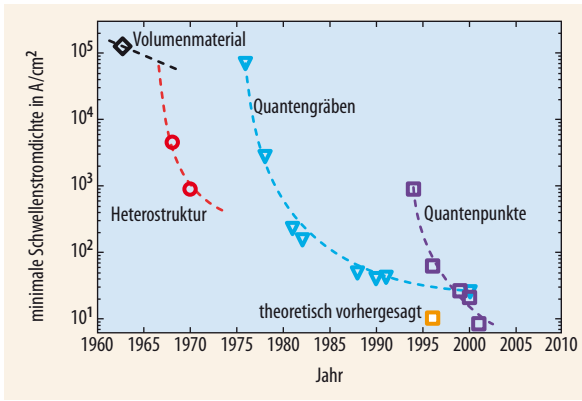


Abb. 3 Im Laufe von 50 Jahren gelang es, die Schwellenstromdichte von Diodenlasern erheblich zu senken, insbesondere durch neue Konzepte wie Quantengraben oder -punkte.

größeren Brechungsindexsprung an den Grenzflächen hat und daher zu einer um Größenordnungen verbesserten Führung des emittierten Lichtes führen sollte (Abb. 2b). An der Grenzfläche zwischen AlGaAs und GaAs springt der Brechungsindex um etwa fünf Prozent. Für beide theoretischen Vorschläge fehlte jedoch der experimentelle Nachweis. Diese Aufgabe fiel den besten Materialwissenschaftlern der Welt zu.

R. L. Anderson zeigte 1962 bei IBM, dass sich Ge/GaAs-Heterostrukturen mit fast perfekten Grenzflächen herstellen lassen. Folgerichtig hatte Krömer 1963 die Idee, einen GaAs/Ge/GaAs-Doppelheterostruktur-Laser zu bauen. Seine Arbeit wurde in den Proceedings der IEEE 1964 dahingehend kommentiert, dass ein derartiger Laser infolge des indirekten Charakters von Germanium nie funktionieren könne. Alferov regte daher 1967 an, einen GaP/GaAs/GaP-Laser zu bauen. Dies gelang – allerdings funktionierte er nur bis zu einer Temperatur von etwa 77 K.

Ende der Sechzigerjahre war die Euphorie weitgehend verflogen, insbesondere bei den industriellen Arbeitsgruppen. Es galt als nahezu unmöglich, die richtigen kristallographischen und Bandstruktur-Eigenschaften mit entsprechender Dotierbarkeit von Heterostrukturen zu kombinieren. Ein System aus AlAs/GaAs würde zwar diese Bedingungen erfüllen, allerdings ist AlAs unter normalen Umgebungsbedingungen instabil und oxidiert sofort zu Al₂O₃ (Saphir). Eine entscheidende Entdeckung machten im Mai/Juni 1967 Hans Rupprecht und Jerry Woodall bei IBM sowie Alferov am Ioffe-Institut, jeweils mit ihren Mitarbeitern. Die ternäre Verbindung AlGaAs ist chemisch stabil und lässt sich mittels Flüssigphasen-Epitaxie so herstellen, dass ihre Gitterkonstante zu GaAs-Substraten passt. Bereits ein Jahr später realisierten Alferov und Mitarbeiter den ersten Doppelheterostruktur-Halbleiterlaser bei Zimmertemperatur, wenn auch nur im Pulsbetrieb. Weitere Verbesserungen erlaubten ab Juni 1970 kontinuierlichen Betrieb bei Zimmertemperatur. Izuo Hayashi und Morton Panish von Bell Labs waren neben Alferov die Ersten.

Eine Verringerung der Schwellenstromdichte um zwei Zehnerpotenzen auf etwa 1000 A/cm² (Abb. 3) war der vielleicht entscheidendste Durchbruch, der welt-

weit Aufmerksamkeit erregte und eine riesige Welle von Forschungsaktivitäten auch zu anderen Materialsystemen auslöste, z. B. auf Basis von InP.

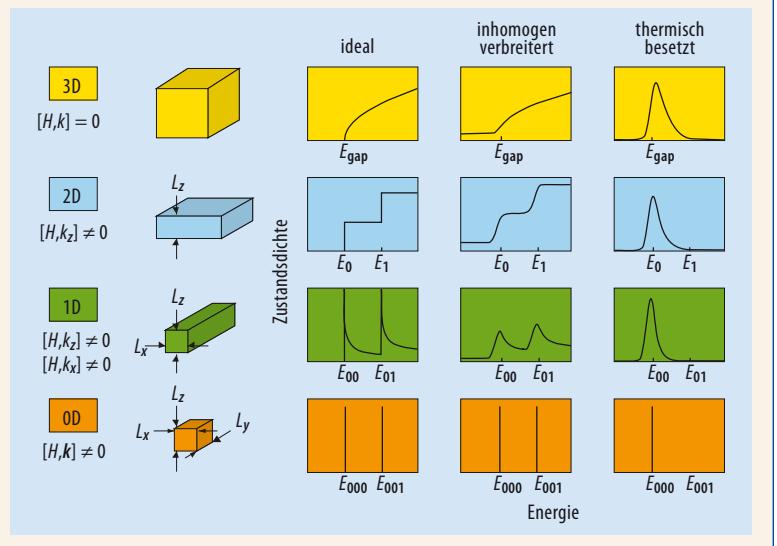
In den Sechziger- und Siebzigerjahren standen Heterostrukturen mit identischen Gitterkonstanten im Fokus der Forschung. Abweichende Gitterkonstanten induzieren beim Wachstum eine Verspannungsenergie, die sich abbaut, wenn sich Versetzungen bilden. Kohärentes Wachstum geht bei sehr geringen Schichtdicken in inkohärentes Wachstum über. Die beiden einzigen zu jener Zeit beherrschten epitaktischen Methoden zur Herstellung von Vielfachschichten – die Flüssigphasen-epitaxie und die anorganische Gasphasenepitaxie – erlaubten kein gezieltes Wachstum ultradünner Schichten von wenigen Nanometern Dicke. Dies änderte sich mit der Entwicklung der Molekularstrahlepitaxie und der metallorganischen Gasphasenepitaxie in den Siebzigerjahren. Damit gelang es, eingebettete Schichten von nur wenigen Nanometern Dicke herzustellen.

Goldrausch durch Verkleinerung

Wenn die aktive Schicht dünner wird als die de-Broglie-Wellenlänge, hängt aufgrund der Quantenmechanik der fundamentale Bandabstand der eingebetteten Schicht von ihrer Dicke ab. Diese Erkenntnis leitete einen entscheidenden Paradigmenwechsel ein und machte klar, dass die elektronischen und optischen

DIMENSIONSTUFEN

Reduziert man sukzessive die Dimensionalität eines Systems, so wirkt sich dies deutlich auf dessen elektronische Zustandsdichte aus. Im **Volumenhalbleiter (3D)** ist der Wellenvektor k eine gute Quantenzahl, und die ideale Zustandsdichte hängt wurzelförmig von der Energie ab. Eine inhomogene Verbreiterung führt zu einer Aufweichung des Verlaufs. Die kontinuierliche Zustandsdichte resultiert in einer endlich breiten thermischen Besetzung. Im Fall des **Quantengrabbens (2D)** und des **Quantenfadens (1D)** eignen sich die Komponenten des Wellenvektors in Quantisierungsrichtung nicht mehr als Quantenzahlen. Die Zustandsdichten sind aber noch kontinuierlich, ebenso die thermischen Besetzungen. Eine vollständige Quantisierung zeigt der **Quantenpunkt (0D)**, resultierend in diskreten Energieniveaus und somit auch in einer energetisch scharfen deltafunktionsartigen thermischen Besetzung.



Eigenschaften von Halbleitern nicht nur von der chemischen Zusammensetzung abhängen, sondern auch von der Geometrie (hier der Dicke). Quantengraben (quantum wells) traten in das Zentrum des Interesses. Raymond Dingle und Mitarbeiter demonstrierten hierfür die stufenförmige Zustandsdichte der Ladungsträger. Nick Holonyak, Russel Dupuis, Wong Tsang und Steve Hersee aus führenden Laboratorien in den USA und Europa nutzten erstmals einzelne oder mehrere Quantengraben als aktive Zone von Diodenlasern. Dies ermöglichte es, die Breite der wellenführenden Schicht von der Breite jener Schichten zu trennen, in denen die Ladungsträger lokalisiert waren. Gleichzeitig gelang es, sehr dünne aktive Schichten aus Materialien, die nicht dieselbe Gitterkonstante wie die Barrierenmaterialien hatten, zwischen diese defektfrei einzufügen. Der GRINSCH-Laser (Graded Index Separate Confinement Heterostructure) und der Multi-Quantum-Well-Laser waren geboren. Wiederum verringerte sich die Schwellenstromdichte um etwas mehr als eine Zehnerpotenz (Abb. 3). Quantengraben finden sich heute in nahezu allen kommerziellen Diodenlasern. Mit ihnen trug die Physik von Nanostrukturen erstmals zu neuartigen optoelektronischen Bauelementen bei.

In einem wegweisenden Patent beschrieben Dingle und Charles Henry 1975, dass eine weitere Verringerung der Dimensionalität hin zu eindimensionalen Strukturen, Quantenfäden, nochmals zu einer völlig veränderten Zustandsdichte mit Singularitäten an den Subbandkanten und weiter verringerter Schwellenstromdichte führe (Infokasten). Zwei japanische Arbeitsgruppen betrachteten erstmals nulldimensionale Systeme, in denen die Ausdehnung in allen drei Raumrichtungen kleiner als die de-Broglie-Wellenlänge ist. In ihren theoretischen Arbeiten sagten sie eine entscheidend verbesserte Funktionalität von Halbleiterlasern für Quantenpunkte voraus, die zu jener Zeit noch „quantum boxes“ hießen [2]. Die numerischen Vorhersagen basierten jedoch auf einer Reihe unrealistischer Annahmen wie unendlich hohen Barrieren. Dennoch bestand Hoffnung, diese Strukturen in Systemen mit angepassten Gitterkonstanten, z. B. GaAs/AlGaAs oder InP/InGaAs, realisieren zu können.

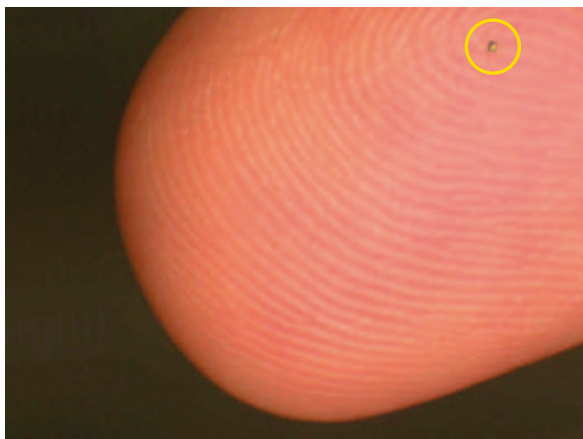


Abb. 4 Ein kantenemittierender Diodenlaser ist auf einer Fingerkuppe kaum zu sehen.

Diese Vorhersagen lösten wiederum eine Art Goldrausch aus. Fast alle führenden Halbleiterlaboratorien der Welt versuchten nunmehr, quantenpunkt-basierte Laserstrukturen dadurch herzustellen, dass sie Quantengraben-Strukturen wuchsen, mittels komplizierter lithographischer Techniken Quantenpunkte ätzten und diese überwuchsen. Der heilige Gral schien greifbar. Die Versuche scheiterten allerdings dramatisch. Die „besten“ Laser funktionierten 1994 nur im gepulsten Betrieb bei Temperaturen des flüssigen Stickstoffs mit einer Schwellenstromdichte von 7500 A/cm^2 .

Ende der Achtzigerjahre hatte eine französische Arbeitsgruppe bei elektronenmikroskopischen Untersuchungen von stark verspannten InGaAs-Schichten, die in einer GaAs-Matrix eingebaut waren, eine Art Clusterbildung entdeckt. Dabei tauchten nicht wie erwartet Quantengraben, sondern eine Vielzahl kleiner Cluster von etwa gleicher Größe auf. Dies war die Geburtsstunde der selbstorganisierten Quantenpunkte, nur wusste dies noch niemand.

Ortsaufgelöste Photolumineszenz- und Kathodolumineszenzuntersuchungen offenbarten 1993 und 1994, dass einzelne Quantenpunkte in der Tat ähnlich wie Atome spektral extrem schmal emittieren und ihre Zustandsdichte deltaförmig ist. Der erste Quantenpunktlaser der Welt, von der Berliner Arbeitsgruppe des Autors und mittels MBE am Ioffe-Institut in St. Petersburg hergestellt, zeigte bereits eine nochmals um 1,5 Zehnerpotenzen verringerte Schwellenstromdichte. Darauf aufbauend folgten sehr schnell Laser mit einer Vielzahl von gestapelten Quantenpunktschichten auf unterschiedlichsten Materialsystemen [2]. Diese halten heute die Weltrekorde geringster Schwellenstromdichten. Der schnelle Einfang von Ladungsträgern aus Barrieren mit hohen Teilchendichten in Quantenpunkten ermöglichte es z. B., grüne Laser in Materialsystemen mit einer hohen Dichte von Versetzungen, wie GaInN/AlGaIn, zu entwickeln.

Die geringe statistische Verteilung von Größe, Form und Zusammensetzung von Quantenpunkten in einer Matrix führt bei einer großen Dichte von Quantenpunkten zu einer Gauß-förmigen Linienverbreiterung. Hybrid modengekoppelte Laser, die darauf basieren, erzielen leicht Pulsbreiten mit Repetitionsraten von zurzeit bis zu 160 GHz. Derartige Parameter einer „Uhr“ sind wesentliche Voraussetzung für die kostengünstige Implementierung des 100-G-Ethernet. 2011 hat das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) einen Standard für dieses Ethernet verabschiedet sowie darüber hinausgehende Standards für glasfasergestützte Übertragungssysteme bei noch höheren Bitraten, die in den nächsten Jahren noch zu erstellen sind. Quantenpunktlaser haben die wichtige und nicht intuitive Eigenschaft, dass Real- und Imaginärteil des Brechungsindex darin entkoppelt sind. Das große Ladungsträgerreservoir in den Barrieren definiert den Realteil, während der Imaginärteil durch den Gewinn in den Quantenpunktstrukturen, die nur sehr geringe Ladungsträgerdichten haben, gegeben ist. Dies ist für nichtlinear optische Anwendungen, insbe-

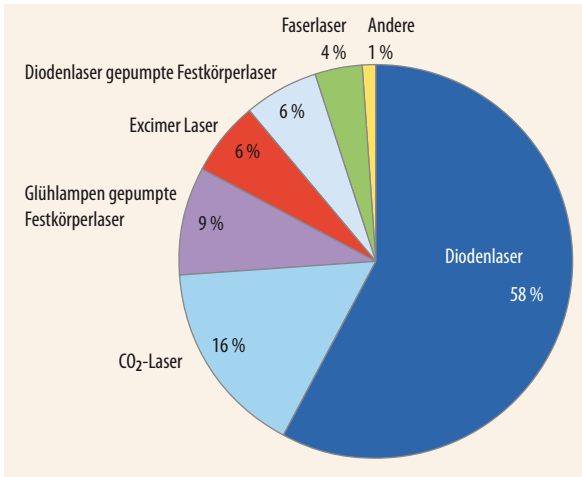


Abb. 5 Diodenlaser machen fast 60 Prozent des weltweiten Umsatzes verschiedener Lasertechnologien aus. Erst mit sehr großem Abstand folgen die CO₂-Laser.

sondere zum Umsetzen von Wellenlängen in Knoten von optischen Verbindungen, von Bedeutung. Hierbei kommt die Kreuzgewinn-Modulation in Halbleiter-Verstärkern bei 1300 nm zum Einsatz.

Ökonomisch bedeutsam

Die ersten Laser, welche im großen Stil neuartige Anwendungen ermöglichten, waren die InP-basierten Familien, welche je nach Zusammensetzung der Barriere und der aktiven Schicht im Dämpfungsminimum kommerzieller Glasfasern bei 1,55 µm emittierten oder beim Dispersionsnulldurchgang dieser Fasern bei 1,3 µm. Mit diesen Lasern ließen sich glasfasergestützte Kommunikationsnetze aufbauen, die heute das Rückgrat des schnellen Internets und von Diensten wie Google, Yahoo oder Facebook darstellen.

Eine große Diversität von drei Mainstream-Materialfamilien hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten entwickelt: Nitride, Arsenide und Phospide decken 99 % des Weltmarktes ab. Kantenemittierende Laser standen die ersten Jahrzehnte im Zentrum der Entwicklung (Abb. 4). Inzwischen konzentriert man sich mehr und mehr auf Oberflächenemitter, die zwar eine sehr viel kleinere Leistung, jedoch auch ein sehr viel besseres Strahlprofil besitzen.

Heutzutage basieren etwa 60 % des Umsatzes auf dem Laserweltmarkt auf Diodenlasern (Abb. 5). Mit sehr großem Abstand folgen die teuren CO₂-Laser, welche vor allem in der Materialbearbeitung wichtig sind, und die Lampen- bzw. Dioden-gepumpten Festkörperlaser. Eine Betrachtung ausschließlich von Umsätzen einzelner Laser gibt keinen Aufschluss darüber, welchen wirtschaftlichen Einfluss sie tatsächlich haben. Diodenlaser stellen in der Regel das „Enabling Device“ eines sehr viel teureren Systems dar. Ein Beispiel ist der CD-Player, zu dessen Fabrikationskosten der Laser etwa ein Prozent beiträgt. Durch ein Umsatzvolumen von etwa sieben Milliarden Dollar an Lasern wird also ein realer wirtschaftlicher Umsatz von geschätzten 700 bis 1000 Milliarden Dollar gehebelt.

Ende der Neunzigerjahre generierten InP-basierte Diodenlaser für Datenübertragung 90 % des Umsatzvolumens. Inzwischen sind es nur noch rund 30 %, mit abnehmender Tendenz. In der Materialbearbeitung haben GaAs-Laser an Bedeutung gewonnen. GaN-basierte Laser, heute im Wesentlichen für Datenspeicherung eingesetzt, holen schnell auf. Optische Mäuse, Laserdrucker und Scanner, die GaAs-Laser enthalten, begegnen uns im täglichen Leben.

Diodenlaser haben sich in den letzten Jahren zwei wesentliche Applikationsfelder völlig neu erschlossen. Dies ist einerseits das Feld der Hochleistungslaser, und zwar nicht nur für Drucker, sondern auch als Pump-laser für Festkörperlaser, in der Medizin und zunehmend für direkte Materialbearbeitung. Dieses Feld hat mit der Entwicklung neuartiger Laserstrukturen wie der Photonic Band Crystal Laser und der Tilted Wave Laser, wesentliche Durchbrüche erzielt. Diese könnten nun die Basis bilden für phasengekoppelte Arrays von Diodenlasern, die eine Strahlqualität wie ein Einzel-laser besitzen, jedoch eine Ausgangsleistung von einigen hundert Watt. Erfolge auf diesem Gebiet würden völlig neuartige Anwendungsfelder erschließen.

Grüne Photonik

Photonen übertragen zunehmend Information nicht nur über große Entfernungen, sondern auch über immer kürzere Distanzen und erobern im Augenblick das Gebiet der Verbindungen zwischen Rechnern und in Rechnern. Zeichneten sich 2006 Hochleistungs-rechner noch durch ein Gewirr von hunderttausenden von elektrischen Kabeln aus, welche dick, schwer und kaum krümmbar waren, so haben seitdem Glasfasern mit oberflächenemittierenden Lasern ihren Einzug gehalten. Die letzte Großrechnergeneration der Peta-Flop-Rechner, Blue Waters, welche IBM im Frühjahr 2011 vorgestellt hat, besitzt bereits fünf Millionen

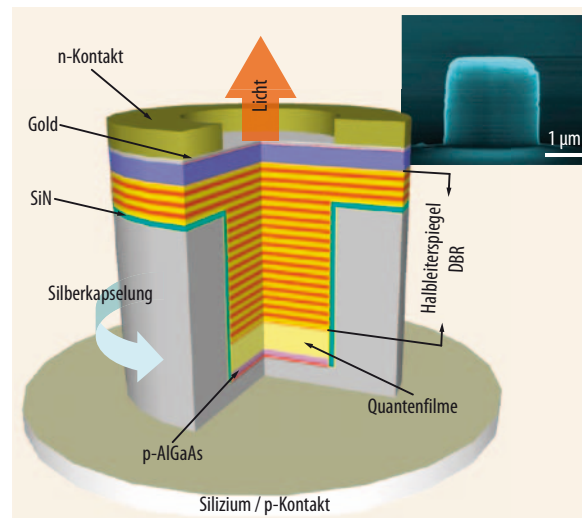


Abb. 6 Eine Kombination aus Halbleitern und Metallen ermöglicht Nanolaser, deren benötigte Fläche etwa einen Faktor 100 kleiner ist als bei oberflächenemittierenden Lasern und die daher weniger Energie aufnehmen.

derartiger Verbindungen. Für etwa 2016 bis 2018 hat IBM einen Exa-Flop-Rechner angekündigt, der einige Milliarden optischer Verbindungen benötigt. Diese werden 80 % der elektrischen Leistung des Rechners verbrauchen. Ginge man von der gegenwärtig typischen Leistungsaufnahme von 20 mW eines jeden Lasers aus, so würden nur die Emitter eine Leistungsaufnahme von 20 Megawatt haben, von denen 16 MW weggekühlt werden. Bei geschätzten 500 Großrechnern in der ganzen Welt wären 2020 allein hierfür 10 Gigawatt notwendig – also zehn Standard-Kraftwerke von 1 GW. Diese Vorstellung ist gleichzeitig realistisch wie auch absurd und zeigt, wo die Herausforderungen für Physiker und Ingenieure zurzeit liegen. Die Übertragung eines Bits von Punkt A zu Punkt B geht nunmal nicht ohne Energieaufwand. Diesen gilt es zu minimieren.

Die neuesten auf der Photonics West 2012 vorgestellten oberflächenemittierenden Laser benötigen nur noch 100 Femtojoule, um ein Bit bei 25 Gb/s über eine Distanz von 100 Metern zu befördern [4]. Damit verringert sich die Energieaufnahme der Rechner bereits etwa um einen Faktor 3 gegenüber den gerade genannten Werten. Das ist aber immer noch zu viel. Auch der zukünftige Einsatz von Lasern über noch kürzere Entfernungen in parallelen Board-to-Board- oder gar Chip-to-Chip-Interconnects bedingt eine weitere wesentliche Reduktion der Energieaufnahme sowie der dissipierten Wärme, um Terabit/s übertragen zu können.

Das Überschreiten der Grenze von der Halbleitertechnologie zu einer gemischten Metall-Halbleitertechnologie durch die Einführung von Lasern mit Spiegeln und Ummantelungen aus Metallen, z. B. Silber, verspricht sowohl eine Reduktion der benötigten Fläche um einen Faktor 100 als auch eine entsprechende Verringerung der Energieaufnahme (Abb. 6) [5]. Spekulieren darf man, ob diese Nano-Laser in der Zukunft Quantenpunkte als Gewinnmaterial haben werden.

Literatur

- [1] *Zh. I. Alferov*, *Physica Scripta T* **68**, 32 (1986)
- [2] *D. Bimberg, M. Grundmann und N. N. Ledentsov*, *Quantum Dot Heterostructures*, John Wiley & Sons Ltd (1999)
- [3] *D. Bimberg*, *Electronics Lett.* **44**, 3 (2008)
- [4] *P. Moser et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 231106 (2011)
- [5] *C.-Y. Lu et al.*, *Semiconductor Sci. Technology* **26**, 014012 (2011)

DER AUTOR

Dieter Bimberg (FV Halbleiterphysik) studierte Mathematik, Philosophie und Physik. Er promovierte 1971 in Frankfurt und wechselte danach zum Hochfeldmagnetlabor des MPI für Festkörperforschung in Grenoble, wo er sich mit den magnetooptischen Eigenschaften von Halbleitermaterialien beschäftigte. 1978 folgte er einem Ruf an die RWTH Aachen. Seit 1981 arbeitet Bimberg an der TU Berlin, wo er Professor für angewandte Physik ist und 1990 bis 2011 Geschäftsführender Direktor des Instituts für Festkörperphysik war. 2006 erhielt er den Max-Born-Preis von DPG und IOP.

