

LASERPHYSIK

LASERTYPEN.TEX KB 20070512

KLAUS BETZLER¹

FACHBEREICH PHYSIK, UNIVERSITÄT OSNABRÜCK

D: LASER – TYPEN

Von Beginn der Laserentwicklung an wurde eine Vielfalt von Lasermedien und Anregungsmechanismen erforscht und zum Teil auch zur Lasertätigkeit gebracht. So liefen kurz nach dem ersten Festkörperlaser auch die ersten Gaslaser und Halbleiterlaser. Weitere Gaslaser, Festkörperlaser und die ersten Farbstofflaser folgten wenige Jahre später. Einige dieser Lasertypen haben sich inzwischen zu “Arbeitspferden” und “Arbeitsameisen” in Industrie und Technik entwickelt und sind aus unserem technologischen Umfeld nicht mehr wegzudenken, andere führen eher ein Nischendasein und sind allenfalls für Spezialanwendungen in der Forschung wichtig.

Einige wenige Systeme sollen im Folgenden etwas näher erläutert werden.

1 Festkörperlaser

Geschichtlich die ersten, spielen Festkörperlaser immer noch eine große Rolle auf vielen Anwendungsgebieten. Wir beschränken uns in diesem Kapitel auf die “klassischen” Festkörperlaser, den ebenfalls zu den Festkörpern gehörenden Halbleiter- und Faserlasern sind eigene Kapitel gewidmet.

Bei Festkörperlaser sind die laseraktiven Ionen in einer Festkörpermatrix – einem Kristall oder einem Glas – als Dotierung eingebettet. Sie ersetzen dort entweder Ionen der Matrix oder sie sind auf Zwischengitterplätzen eingebaut. Stärke und Symmetrie des *Kristallfelds* beeinflussen die energetische Lage und Aufspaltung der Energieniveaus sowie die Übergangswahrscheinlichkeiten. Bei höherer Dotierung treten Wechselwirkungseffekte zwischen den Dotierungionen auf, die meist unerwünscht sind. So kann der direkte Energieaustausch zwischen benachbarten Ionen zu Effizienzverlusten führen.

¹KLAUS.BETZLER@UNI-OSNABRUECK.DE

1.1 Rubinlaser

Wikipedia: "Ein Rubin (mittellatein rubens, rubinus rot, der Rote) ist ein Edelstein aus der Familie der Korunde. Die rote Verfärbung ist auf einen geringen Anteil von Chrom zurückzuführen. Nur die roten Korunde heißen Rubine, andere Varietäten sind Saphir oder auch Padparadscha." Bei Wikipedia finden Sie auch vielfältige weitere Daten zum Rubin.

Korunde sind Al_2O_3 -Kristalle, für Rubin-Laser werden sie künstlich hergestellt (*Verneuil*-Verfahren, Näheres unter diesem Stichwort im Netz) mit einer geringen² Cr-Dotierung von etwa 0.05 Gewichts-% Cr_2O_3 .

Chrom-Ionen ersetzen im Rubin Aluminium-Ionen, sind somit als Cr^{3+} eingebaut. Für die optischen Eigenschaften sind die Elektronen der 3d-Schale verantwortlich. Beim dreiwertig eingebauten sind davon noch 3 übrig, die sich zu einem Gesamtspin vom $S = 3/2$ oder $S = 1/2$ anordnen können. Die Energieniveaus werden durch das umgebende *Kristallfeld* sehr stark beeinflusst. Im Rubin wirkt sich das so aus, dass Niveaus mit dem Gesamtspin $3/2$ den Grundzustand und die beiden Pumpbänder bilden, Niveaus mit dem Gesamtspin $1/2$ das energetisch unter den Pumpbändern liegende obere Laserniveau. Dadurch sind die Übergänge zwischen dem Grundniveau und den Pumpbändern spin-erlaubt, mithin sehr intensiv, sie liegen im grünen und blauen Spektralbereich bei Wellenlängen von etwa 550 und 420 nm. Der Übergang vom oberen Laserniveau zum Grundniveau ist dagegen (spin-)verboten, daher die große Zeitkonstante $\tau_{21} \approx 3$ ms des oberen Laserniveaus, eine der längsten bekannten Zeitkonstanten bei Festkörperlaser. Die Emissionswellenlänge des Rubin-Lasers liegt bei 694 nm, im tiefroten Spektralbereich.

Die energetische Lage der oberen Pumpniveaus ist sehr günstig, um mit den verbreiterten Linien einer Xenon-Blitzlampe effizient anzuregen. Dennoch und auch trotz der großen Zeitkonstante des oberen Laserniveaus können Rubin-Laser als Drei-Niveau-Systeme nur gepulst und nicht kontinuierlich betrieben werden. Die Pulslänge entspricht in etwa der Länge des Anregungsblitzes, liegt also in der Größenordnung einer Millisekunde. Die Pulsform entspricht allerdings nicht der Form des Anregungspulses, der Laserpuls besteht vielmehr aus vielen kurzen Nadelimpulsen (*Spikes*). Durch Güteschaltung und Modenkopplung lassen sich die Laserpulse deutlich verkürzen, bis auf etwa 10 ns bzw. 10 ps.

Anwendungen: In fast allen früheren Anwendungen ist der Rubin-Laser heute durch andere Lasertypen abgelöst, interessant wegen seiner hohen Leistung und wegen der kurzen Impulse ist er noch im Bereich der gepulsten Holographie. Darüber hinaus haben Rubin-Laser wegen ihrer günstig

²Durch die geringe Dotierung sind Laser-Rubine schwach rosa, für einen richtig roten Rubin muss man etwa zehnmal höher dotieren.

liegenden Emissionswellenlänge seit etwa 10 Jahren eine Renaissance im Bereich medizinischer Anwendungen erlebt. Dazu zwei Zitate aus einer einschlägigen Webseite³:

Der Langpuls-Rubin-Laser NOVALIS



Das Licht mit der Wellenlänge 694 nm (reines rotes Licht) durchdringt die oberen Hautschichten sehr gut und wird im Bereich der Pigmentzellen des Haarfollikels absorbiert und in Wärme umgesetzt. Durch eine ausreichende Aufheizung in diesem Bereich kommt es zu einer lokalen Koagulation und das Haarfollikel wird inaktiviert. Die Ankopplung des Laserlichtes ist selektiv für dunkles Pigment, daraus folgt, dass die Wirkung um so besser ist, je dunkler das Haar ist. Zu berücksichtigen ist, dass die Haarfollikel nur in der aktiven Wachstumsphase hinreichend geschädigt werden können, so dass mehrere Behandlungen über einen Zeitraum von gemittelt 9 bis 12 Monaten notwendig sind. (Dabei sollten z. B. für den Gesichtsbereich zwischen 4 und 6 Behandlungen angesetzt werden.) Die Behandlung ist generell schmerzarm.

Der 'gütegeschaltete' Ruby-Laser SINON



Dieser Ruby-Laser verkörpert eine neue Generation von gütegeschalteten Lasern, da es nach längerer Entwicklungsphase nun gelungen ist, die Pulszeit nochmals wesentlich zu verkürzen. Das rote Licht leuchtet pro Puls nur ca. 0,000000015 Sekunden! Aufgrund dieser extrem kurzen Pulsdauer werden die Behandlungen extrem hautschonend, da kaum thermische Effekte auftreten. Mit dem SINON werden Spezialfälle von Pigmentflecken, Altersflecken, Tätowierungen und Permanent-Make-up besonders hautschonend entfernt. Ein langwieriges Kühlen der Haut nach der Behandlung ist nicht mehr erforderlich. Da die Haut kaum belastet wird, kann mit einer höheren Energiedichte behandelt werden. Und dies bedeutet, dass mit dem SINON weniger Behandlungen erforderlich sind, als bei bisherigen Lasertypen.

1.2 Nd:YAG-Laser

Neodym gehört zu den Lanthaniden, den dem Lanthan ähnlichen Elementen. Diese Gruppe von Elementen ist dadurch gekennzeichnet, dass die 4f-Schale teilbesetzt ist. Üblicherweise wird Neodym als dreiwertiges Ion Nd^{3+} eingebaut. Dann sind 3 Elektronen in der 4f-Schale übrig, die sich wegen der guten Abschirmung durch die Elektronen der fünften Schale fast wie in einem freien Atom verhalten. Die drei Elektronen koppeln zu einem Gesamtspin ($S = 1/2$ oder $3/2$) und einem Gesamtbahnmoment L , L und S wiederum zu einem Gesamtdrehimpuls J (LS-Kopplung). Die relevanten

³<http://www.lf-essen.de/laserwirkung.htm>

Energieniveaus sind in Abbildung 1 skizziert. Die energetisch niedrigsten

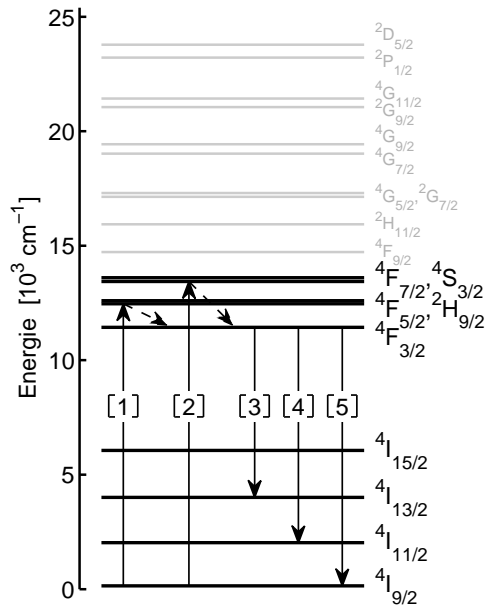


Abbildung 1: Energieniveauschema des Nd³⁺. Nicht eingezeichnet ist die Aufspaltung der Niveaus durch das Kristallfeld. Günstige Pumpübergänge liegen bei etwa 808 nm [1] und etwa 750 nm [2], Laserübergänge bei 1320 nm [3], 1064 nm [4] und 940 nm [5]. Der Übergang [5] erfolgt in ein aufgespaltenes Niveau des Grundzustandes, das thermisch besetzt ist (Quasi-Drei-Niveau-System).

Niveaus (I) haben L=6, die darüber liegenden F-Zustände L=3. Der Übergang vom 4F_{3/2} zu den I-Niveaus ist wegen des großen Unterschieds im Gesamtdrehimpuls J verboten, dadurch hat der 4F_{3/2}-Zustand eine hohe Zeitkonstante, ist somit ein idealer Ausgangszustand für einen Laserübergang.

Als Wirtsmaterialien kommen verschiedene Kristalle und Gläser infrage. Am gebräuchlichsten ist YAG, Yttrium-Aluminium-Granat, die Kristalle werden aus der Schmelze gezogen (Czochralski-Verfahren). Die Neodym-Dotierung variiert je nach Anwendung zwischen 0.5 und 1.5 mol%.

Nd:YAG kann kontinuierlich und gepulst betrieben werden, gepumpt wird mit Krypton-Blitzlampen oder kontinuierlichen Lampen, sehr effizient lässt sich Neodym auch durch Halbleiterlaser bei etwa 808 nm pumpen.

Aufgrund seiner idealen Eigenschaften ist Nd:YAG der derzeit am meisten verwendete Festkörperlaser. Die Anwendungen reichen vom grünen Laserpointer (dort mit einem Halbleiterlaser gepumpt und mit einem nichtlinearen Kristall frequenzverdoppelt) über viele industrielle Anwendungsbereiche (Materialbearbeitung) bis zur Laserfusion.

1.3 Übergangsmetalle und Seltene Erden

Je einen Vertreter der beiden Kategorien – Chrom als Übergangsmetall und Neodym als Seltene-Erd-Metall – haben wir in den vorstehenden Abschnitten knapp kennen gelernt. In beiden Gruppen gibt es weitere Vertreter mit

interessanten optischen Eigenschaften.

Bei den **Übergangsmetallen** werden d-Schalen aufgefüllt, die optischen Eigenschaften der in eine Wirtsmatrix eingebauten Ionen werden durch die noch am Ion lokalisierten d-Elektronen bestimmt. Der Einfluss des Wirtsgitters auf die energetische Lage der d-Niveaus ist groß, ein bestimmtes Ion, z. B. Cr^{3+} , kann in unterschiedlichen Umgebungen deutlich unterschiedliche Energiezustände aufweisen.

Neben Chrom, dessen Laserlinien je nach Wirtskristall (Rubin, Alexandrit, Gadolinium-Scandium-Gallium-Granat, LiCaAlF_6 , LiSrAlF_6) den Wellenlängenbereich von 690 nm bis 1100 nm ausfüllen, ist insbesondere Titan interessant (Titan-Saphir-Laser).

Bei den **Seltenen Erden** werden f-Schalen aufgefüllt, die optischen Eigenschaften werden durch die f-Elektronen bestimmt. Wegen der guten Abschirmung durch äußere Schalen ist der Einfluss des Wirtsmaterials auf die energetische Lage der f-Niveaus sehr gering, die Niveaus werden durch das Kristallfeld aufgespalten und thermisch verbreitert.

Interessante Vertreter neben Neodym sind Erbium, Ytterbium, Holmium, Thulium. Neben Einzeldotierungen werden einige Doppeldotierungen verwendet, bei denen ein Partner besonders gut gepumpt werden kann, der zweite besonders gut emittiert und außerdem ein effizienter Energieübertrag vom ersten zum zweiten erfolgt. Beispiele sind die Systeme Ytterbium-Erbium und Thulium-Holmium.

1.4 Pumpanordnungen

Festkörperlaser werden optisch gepumpt, breitbandig durch Gasentladungslampen oder schmalbandig durch Halbleiterlaser.

Die von Maiman beim ersten Rubin-Laser verwendete Pumpanordnung zeigt Abbildung 2 (Bild aus Wikipedia⁴).

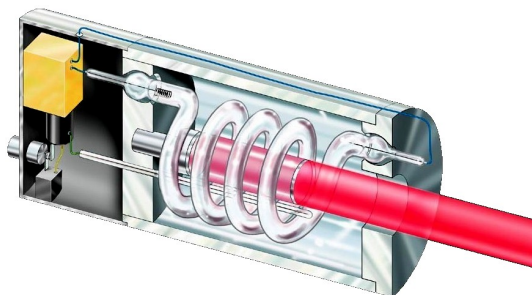


Abbildung 2: Aufbau der ersten Rubin-Laser, der Rubin-Kristall ist an den beiden Endflächen verspiegelt und bildet so auch den Resonator. Der rückseitige Spiegel ist zu 100% reflektierend, der Austrittsspiegel zu 95%.

⁴Das Original entstammt einer Veröffentlichung des *Lawrence Livermore National Laboratory*: "Laser Programs, The First 25 Years. . . 1972–1997" (<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/16710-UOC0xx/native/16710.pdf>)

Pumpen mit Gasentladungslampen: Die klassische und kostengünstigste Art (zumindest was die Anschaffungskosten anbetrifft), Festkörperlaser zu pumpen. Bei Lasern kleiner und mittlerer Leistung (bis ca. 100 W) werden einzelne Lampen verwendet. Typischerweise sind Laserkristall und lineare Lampe in den beiden Brennpunkten eines elliptischen Reflektors angeordnet (Abbildung 3).

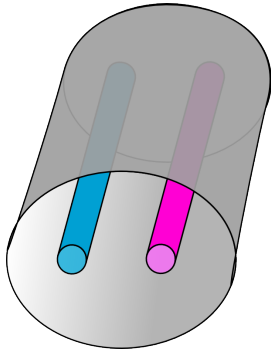


Abbildung 3: Pumplampe und Laserkristall in den beiden Brennpunkten eines elliptischen Reflektors. Typische Dimensionen sind 5–10 cm in Länge und Durchmesser. Von der Pumplampe abgestrahltes Licht wird durch den Reflektor mit hoher Effizienz auf das aktive Medium fokussiert. Die Resonatorspiegel liegen außerhalb, vor und hinter dem aktiven Medium. Zur Kühlung wird der ganze Reflektor von Kühlwasser durchströmt.

Bei fast allen Festkörperlasern ist kontinuierlicher oder gepulster Betrieb möglich. Während für kontinuierlichen Betrieb die Lampen naturgemäß auch kontinuierlich betrieben werden müssen, können für gepulsten Betrieb kontinuierliche Lampen oder Blitzlampen verwendet werden. Beides (obschon bei Blitzlampen nicht erforderlich) wird in der Regel mit einem gütegeschalteten Resonator kombiniert, um ein definiertes Pulsverhalten zu erreichen.

Um höhere Leistungen zu erzielen, kann die Anordnung zu einer Doppellipse erweitert werden. Noch höhere Leistungen erzielt man mit flachen Geometrien (*Slab-Laser*), bei denen viele Pumplampen beiderseits einer Kristallscheibe angeordnet sind (Abbildung 4).

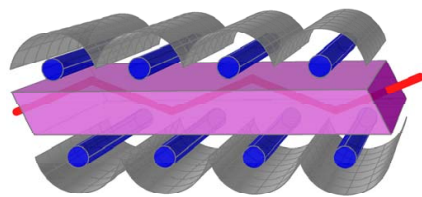


Abbildung 4: *Slab-Laser*-Geometrie: Beiderseits einer rechteckigen Kristallscheibe sind lineare Gasentladungslampen angeordnet.

Pumpen mit Halbleiterlasern: Die Entwicklung der Halbleiterlaser (vgl. Kapitel 2) macht es möglich, Festkörperlaser sehr leistungseffizient mit Diodenlasern zu pumpen. Dazu werden Laserdioden verwendet, die genau für die jeweils benötigte Pumpwellenlänge gebaut sind. Beim Nd:YAG-Laser sind dies AlGaAs-Dioden mit einer Wellenlänge von 808 nm, beim Cr:LiSAF, der im Bereich 720–840 nm abstimmbare ist, GaInP-Dioden mit einer Wellenlänge von 670 nm.

Je nach benötigter Leistung werden Einzeldioden, Dioden-Arrays oder *Stacked Arrays* (vgl. 2.9) verwendet.

Bei Einzeldioden wird meist *longitudinal* gepumpt, der Diodenlaser strahlt entlang der optischen Achse des Systems. zwischen Pumpdiode und aktivem Medium benötigt man einen Endspiegel im Resonator, der für die Wellenlänge des Diodenlasers transparent, für die Wellenlänge des Festkörperlaser zu 100% reflektierend ist.

Bei höheren Leistungen ist es günstiger, *transversal* zu pumpen. Die Pumpdioden können um den Laserkristall angeordnet werden, es können aber auch – wie bei Anordnungen mit vielen Entladungslampen (s. o.) – *Slab*-Geometrien verwendet werden.

Laserdioden bieten darüber hinaus die Möglichkeit, das Pumplicht über Lichtleiter zuzuführen. Dies hat verschiedene Vorteile:

- Die Pumpdioden sind weit vom aktiven Medium entfernt, damit bereiten sie weniger thermische Probleme.
- Die Pumpdioden brauchen nicht sehr eng angeordnet zu werden, das Pumplicht wird durch die Lichtleiter zusammengeführt.
- Der Laserkopf kann sehr handlich gebaut werden, da er nur noch aus Lichtleiterzuführung, Resonator, aktivem Medium und gegebenenfalls ein wenig Kühlung besteht.

2 Halbleiterlaser

Der vielseitigste und durch die IT-Anwendungen auch häufigste und am weitesten verbreitete Lasertyp. Der Wellenlängenbereich von Halbleiterlasern erstreckt sich (mit noch einigen Lücken) vom nahen UV bis zum mittleren Infrarot, die Ausgangsleistungen reichen vom Mikrowatt- bis in den Kilowattbereich.

Als aktives Medium können nur Halbleiter mit einer *direkten* Bandstruktur⁵ verwendet werden, bei denen optische Übergänge zwischen Leitungsbandminimum und Valenzbandmaximum ohne Beteiligung eines Phonons möglich sind. Die klassischen Elementhalbleiter Silizium und Germanium kommen daher wegen ihrer *indirekten* Bandstruktur nicht infrage.

Man verwendet

- (a) III-V-Verbindungshalbleiter wie GaAs für das nahe Infrarot,

⁵Bei einer direkten Bandstruktur liegen in einer Bandstrukturdarstellung im k-Raum Valenzbandmaximum und Leitungsbandminimum beim gleichen k-Wert (fast immer bei $k=0$).

- (b) ternäre III-V-Verbindungen wie $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ oder $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ vom nahen UV bis zum nahen Infrarot,
- (c) quaternäre III-V-Verbindungen wie $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ meist für das nahe Infrarot,
- (d) II-VI-Verbindungshalbleiter wie ZnS, ZnSe, CdS, CdSe für den grünen und blauen Spektralbereich,
- (e) IV-VI-Verbindungshalbleiter wie PbS, PbSe, PbTe oder Mischungen davon für das mittlere Infrarot.

Halbleiter können optisch gepumpt werden, z. B. durch andere Laser, auch durch Elektronenbeschuss oder andere Techniken angeregt werden. Wir beschränken uns hier jedoch auf den technisch wichtigen Anregungsmechanismus, die Ladungsträgerinjektion über einen p-n-Übergang.

2.1 Einfacher p-n-Übergang

Der Aufbau eines Halbleiterlasers mit einfachem p-n-Übergang ist in Abbildung 5 dargestellt. Auf ein mäßig dotiertes Substrat werden durch geeignete Prozessschritte (z. B. Flüssigphasenepitaxie, Liquid Phase Epitaxy, LPE, weitere Stichworte: Gasphasenepitaxie, Vapor Phase Epitaxy, VPE und Molekularstrahlepitaxie, Molecular Beam Epitaxy, MBE) hoch dotierte p- und n-Schichten aufgebracht, die den p-n-Übergang bilden.

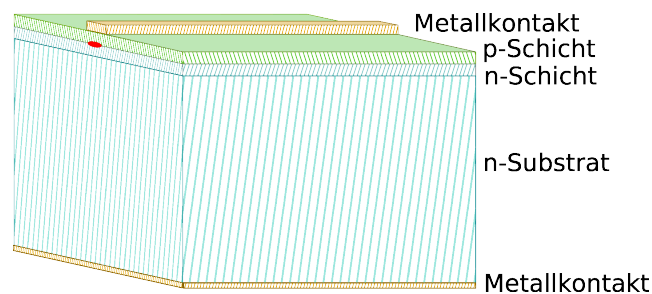


Abbildung 5: Aufbau eines Halbleiterlasers mit einfachem p-n-Übergang. Durch die Geometrie des oberen Metallkontakts wird der Strom auf einen schmalen Streifen eingeschränkt, in diesem Bereich des p-n-Übergangs erzielt man Inversion und damit auch Verstärkung (Zeichnung aus Wikipedia).

Es stellt sich die in Abbildung 6 skizzierte Bandstruktur ein (Ortsraum-bild, aufgetragen ist die energetische Lage von Valenzband und Leitungsband als Funktion der relevanten Ortskoordinate). Schematisch mit eingezeichnet ist die Besetzung der Elektronenzustände für den Fall einer in Durchlassrichtung angelegten Spannung.

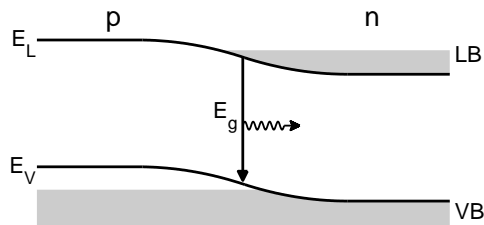


Abbildung 6: Bandstruktur eines p-n-Übergangs bei in Durchlassrichtung anliegender Spannung, Bandenergien im Ortsraum. Inversion im Übergangsbereich erreicht man durch genügend hohe Spannung. E_L und E_V sind Unterkante des Leitungsbands (LB) und Oberkante des Valenzbands (VB), E_g die Bandlücke.

Bei kleinem Durchlassstrom arbeitet die p-n-Struktur wie eine Lumineszenzdiode, im Übergangsbereich rekombinieren Elektronen aus dem Leitungsband mit Löchern im Valenzband, die Rekombinationsenergie wird zum Teil in Licht umgesetzt. Dessen Photonenenergie entspricht in etwa der Bandlückenenergie des verwendeten Halbleitermaterials.

Bei genügend hohem Strom wird in einem schmalen Bereich am Übergang Besetzungsinversion erreicht, eine hohe Besetzung im Leitungsband steht dort einer geringen Besetzung im Valenzband gegenüber. Stimulierte Emission verstärkt dann vorhandenes Licht. Die beiden Endflächen der Struktur wirken als ebene Endspiegel für den aus dem Halbleiterkristall gebildeten Resonator⁶. In Resonatorrichtung laufende Lichtwellen werden vielfach reflektiert, dadurch bevorzugt verstärkt, in schiefer Richtung laufende Wellen verlassen die Struktur. Verstärkung etabliert sich nur in dem Bereich, in dem eine ausreichende Inversion vorhanden ist, Lasertätigkeit konzentriert sich dadurch auf diesen Bereich. Der Laser arbeitet *gewinngeführt* (*gain guided*).

Die Abhängigkeit der Laserintensität vom Diodenstrom ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Unterhalb des *Schwellstroms* arbeitet die Diode

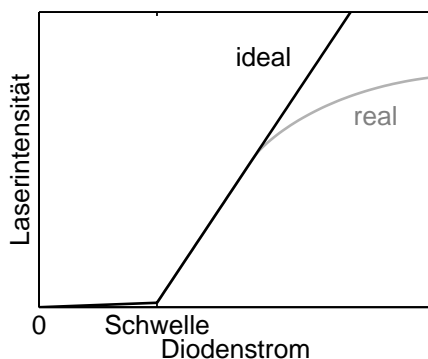


Abbildung 7: Lichtintensität in Abhängigkeit vom Diodenstrom bei einer Laserdiode (schematisch). Unterhalb der Schwelle Lumineszenz, dann ein linearer Intensitätsanstieg. Für reale Dioden knickt der lineare Anstieg bei höheren Strömen ab.

⁶Durch die hohen Brechungsindizes von Halbleitern ($n=3-4$) ist es nicht unbedingt nötig, die Endflächen zusätzlich zu verspiegeln, die mit dem Brechungsindexsprung verbundene Reflektivität ist meist ausreichend.

wie eine Lumineszenzdiode, an der Schwelle setzt dann Lasertätigkeit ein, die Intensität steigt nahezu linear mit dem Strom an.

Aus der Steigung im linearen Bereich definiert man die *differentielle Quanteneffizienz* (*slope efficiency*) des Diodenlasers als Quotient aus der Zunahme der Photonenzahl und der Zunahme der injizierten Ladungsträger

$$QE = \frac{d(\text{Photonenzahl})}{d(\text{Ladungsträger})} = \frac{dP}{h\nu} \bigg/ \frac{dI}{e} = \frac{e}{h\nu} \frac{dP}{dI}. \quad (1)$$

Darin ist P die Laserleistung, I der Diodenstrom und ν die Lichtfrequenz; e , h sind die üblichen Konstanten.

Bei höheren Strömen weicht die Lasercharakteristik vom idealen linearen Verlauf ab. Gründe sind thermische Effekte, die bei geringen Strömen reversibel sind, bei höheren Strömen aber letztlich zu einer Schädigung und Zerstörung der Diode führen.

Die einfache p-n-Struktur weist verschiedene Nachteile auf, die zur Entwicklung verbesserter Strukturen geführt haben. Nachteilig sind insbesondere

- Ladungsträger diffundieren aus der aktiven Zone heraus und sind damit für die Lasertätigkeit verloren,
- der Resonator ist in seitlicher Richtung nicht begrenzt, dadurch sind auch die optischen Verluste hoch.

Die beiden Effekte führen dazu, dass relativ hohe Stromdichten notwendig sind, um eine einfache p-n-Laserstruktur zur Laseremission zu bringen. Der Schwellstrom ist häufig so hoch, dass solche Laser sinnvoll nur gepulst betrieben werden können.

2.2 Doppelheterostruktur

Um die durch die genannten Mechanismen bedingten Verluste zu vermeiden oder zumindest deutlich zu verringern, wurden *Heteroübergänge* entwickelt, Strukturen, bei denen man Materialien mit unterschiedlicher Bandlücke geeignet kombiniert. Der Aufbau einer solchen Diode ist in Abbildung 8 skizziert. Am p-n-Übergang ist eine Zwischenschicht aus einem Material B mit geringerer Bandlückenenergie eingebaut.

Ein einfaches Beispiel ist die Kombination $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ als Material A mit größerer Bandlücke und GaAs als Material B mit kleinerem E_g . Oder A und B als $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ mit unterschiedlichem x .

Die Bandstruktur für den Doppelheteroübergang ist in Abbildung 9 dargestellt. Durch die Energiestufe zwischen den Materialien B und A wird

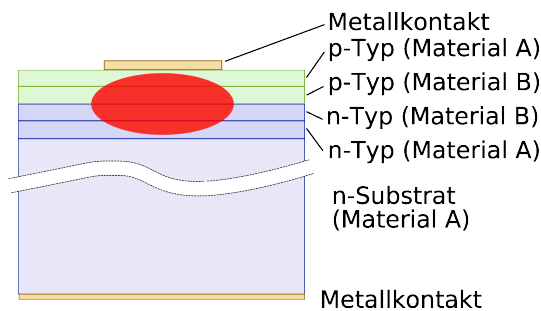


Abbildung 8: Diodenlaser mit Doppelheterostruktur. Zwischen den p- und n-Schichten des Materials A liegt eine Zwischenschicht aus einem anderen Material B (Zeichnung aus Wikipedia).

es Ladungsträgern deutlich erschwert, aus dem Bereich des Materials B wegzudiffundieren. Die Ladungsträger werden zusammengehalten (*Carrier Confinement*).

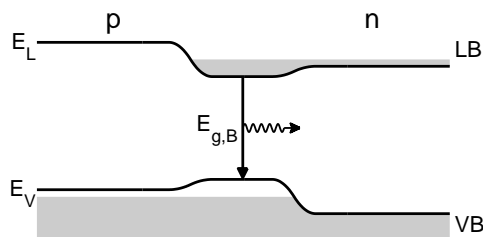


Abbildung 9: Bandstruktur für den Doppelheteroübergang, Darstellung im Ortsraum, energetische Lage von Valenz- und Leitungsband als Funktion der relevanten Ortskoordinate.

Die unterschiedlichen Bandlückenenergien bedingen auch unterschiedliche Brechungsindizes für die Laserfrequenz. Generell gilt für ähnliche Halbleitermaterialien, dass der Brechungsindex umso größer wird, je näher die Lichtfrequenz an der Bandlücke liegt. Im Falle des Doppelheteroübergangs heißt das, dass der Brechungsindex im Material B größer ist als im Material A. Durch den größeren Brechungsindex im Material B wird das Licht dort geführt (Totalreflexion an den Grenzflächen, Ausbildung von Wellenleitermoden). Der Verlauf der Brechungsindex und die Intensitätsverteilung des Lichts, jeweils über der Ortskoordinate senkrecht zum p-n-Übergang, sind in Abbildung 10 schematisch dargestellt.

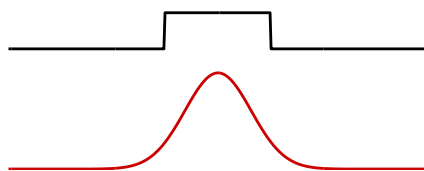


Abbildung 10: Brechungsindexverlauf in der Doppelheterostruktur (oben) und die sich darin einstellende Lichtintensitätsverteilung (unten), jeweils als Funktion der relevanten Ortskoordinate.

2.3 Quantentopfstruktur

Je dünner man bei der Doppelheterostruktur die Zwischenschicht aus dem Material B macht, umso besser werden die Ladungsträger konzentriert, umso niedriger wird die Laserschwelle. Bis zu Dimensionen von etwa 100 nm kann man noch vom gewohnten Bändermodell ausgehen. Wird die Schicht deutlich dünner, werden Quanteneffekte deutlich, das sonst dreidimensionale Elektronengas wird zweidimensional. Die Bewegungsenergie senkrecht zur Schicht ist quantisiert. Die Bauform einer Laserdiode mit einer solch dünnen Doppelheterostruktur ist in Abbildung 11 skizziert.

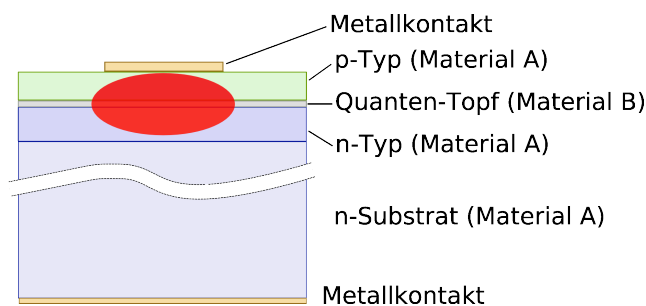


Abbildung 11: Bauform einer Laserdiode mit Quantentopfstruktur (Zeichnung aus Wikipedia).

Wegen der Energiequantisierung bezeichnet man solche Strukturen als *Quantentopf* oder auf Englisch als *Quantum Well (QW)*. Gebräuchlich sind auch andere Bezeichnungen wie *Quantenfilm* (verdeutlicht die zweidimensionale Geometrie) oder *Quantentrog*.

In der Bandstrukturdarstellung (Abbildung 12) erkennt man den Effekt der Quantentopfstruktur auf die Ladungsträgerkonzentration. Ladungsträger werden in einem sehr schmalen Bereich gesammelt, dort ist Inversion schon durch vergleichsweise geringe Stromdichten zu erreichen.

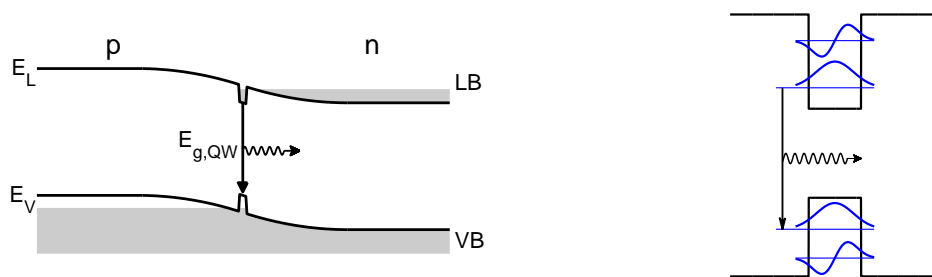


Abbildung 12: Quantentopfstruktur im Bändermodell. Links: Valenz- und Leitungsbandenergien am p-n-Übergang mit einer sehr dünnen Heteroschicht. Rechts: Quantisierte Energiezustände im Quantentopf (atomähnliche Wellenfunktionen in dieser Ortskoordinate).

Wie bei der konventionellen Doppelheterostruktur wird auch bei der Quantentopfstruktur der Brechungsindex im Bereich des Materials B vergrößert.

Die Schicht ist jedoch zu dünn, um Licht effizient zu führen. Nur durch die höhere Verstärkung bildet sich der Lasermode im Bereich der Quantentopfschicht aus. Der Laser arbeitet – wie die einfache p-n-Struktur gewinngeführt. Die Situation ist in [Abbildung 13](#) skizziert.

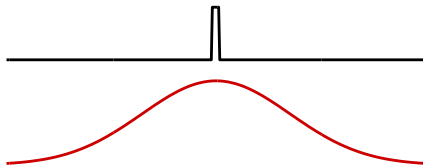


Abbildung 13: Brechungsindex in der einfachen Quantentopfstruktur (oben) und die Lichtintensitätsverteilung (unten), jeweils als Funktion der relevanten Ortskoordinate.

Aufgrund der mangelnden Lichtführung sind einfache Quantentopfstrukturen nur eingeschränkt verwendbar und haben daher keine große Bedeutung.

2.4 Index-geführte Quantentopfstruktur

Um die Lichtführung zu verbessern, baut man Quantentopfstrukturen in breitere Doppelheterostrukturen ein. Den schematischen Aufbau einer solchen Diode zeigt [Abbildung 14](#).

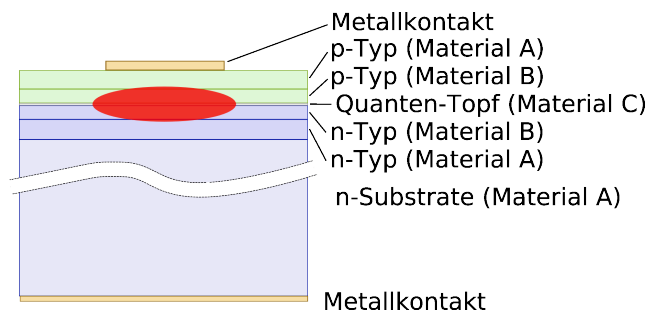


Abbildung 14: Struktur einer Laserdiode mit Mehrfachheterostruktur – Quantentopf innerhalb einer Doppelheterostruktur (Zeichnung aus Wikipedia).

Die Bandstruktur einer solchen Quantentopfstruktur mit getrennter Lichtführung (*Separate Confinement Heterostructure*) ist in [Abbildung 15](#) skizziert. Die Bandenergien sind im Bereich der umgebenden Heterostruktur und dann nochmals im Bereich des Quantentopfes abgesenkt.

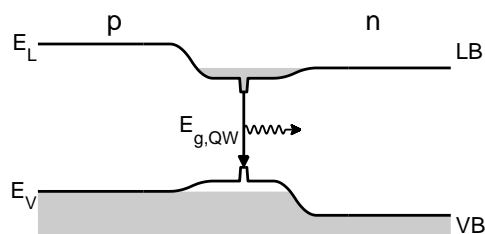


Abbildung 15: Bandstruktur – Valenz- und Leitungsbandkante – in einer *Separate Confinement Heterostructure*.

Der Einfluss der Struktur auf den Brechungsindex und die Lichtführung

ist in [Abbildung 16](#) dargestellt. Die breite Heterostruktur gewährleistet eine gute Wellenleitung für das Laserlicht.

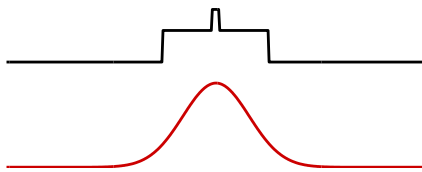


Abbildung 16: Schematische Verlauf des Brechungsindex in einer *Separate Confinement Heterostruktur* (oben) und resultierende Lichtführung (unten), jeweils als Funktion der relevanten Ortskoordinate.

Abgesehen von der Lichtführung erreicht man durch die Mehrfachstruktur eine zweistufige Ladungsträgerkonzentrierung, zunächst in der äußeren Heterostruktur, dann im Quantentopf. Ein Vergleich mit [Abbildung 12](#) macht die Vorteile deutlich.

Mehrfach-Quantentöpfe: Die geringe Dicke der Quantentopfstruktur hat ein relativ geringes Volumen des aktiven Mediums zur Folge. Das hat einerseits den Vorteil, dass Inversion und Laserbetrieb schon mit sehr geringen Strömen erreicht werden, andererseits aber auch den Nachteil, dass wegen des kleinen Verstärkungsvolumens keine großen Laserleistungen möglich sind. Dieser Nachteil kann dadurch behoben werden, dass man die günstige Struktur innerhalb des Heteroübergangs vielfach wiederholt und so zu einem großen aktiven Volumen kommt. Das Bänderschema einer solchen *Multiple-Quantum-Well-Struktur* (MQW) zeigt [Abbildung 17](#).

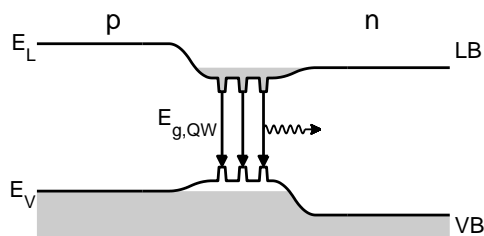


Abbildung 17: Energetischer Verlauf von Valenz- und Leitungsband einer *Multiple-Quantum-Well-Struktur*. Mit eingezeichnet sind die Laserübergänge.

Die offensichtlichen Vorteile der MQW-Struktur haben dazu geführt, dass dieser Typ inzwischen in vielen Bereichen der Optoelektronik verwendet wird. Die typischen Schichtdicken der Quantentöpfe und der Zwischenschichten liegen in der Größenordnung von 5 nm.

Quantendrähte und Quantenpunkte: Die Reduktion der Strukturgröße in weiteren Dimensionen führt zum ein- oder gar nulldimensionalen Elektrogenas. Dann ist die Energie auch in diesen weiteren Dimensionen quantisiert. Durch diese laterale Strukturierung kommt man zu *Quantendrähten* und *Quantenpunkten*. Technologisch ist das deutlich aufwändiger als die Schichtenstrukturierung bei den MQW-Strukturen, die man durch die Steuerung des Schichtenwachstums realisieren kann. Um Quantendrähte und Quantenpunkte herzustellen, müssen die MQW-Schichten durch

lithographische Verfahren zusätzlich strukturiert werden. Aktuelle Verfahren der optischen Lithographie sind dazu nicht in der Lage, da Strukturgrößen im Nanometerbereich erforderlich sind, möglich sind Elektronenstrahl- oder Röntgenverfahren. Denkbar ist auch, solche Strukturen durch Selbstorganisationsmechanismen der Nanotechnologie herzustellen.

2.5 Laterale Strukturierung

Alle beschriebenen Diodenstrukturen sind seitlich breit ausgedehnt. Das hat den Nachteil, dass in seitlicher Richtung das Licht nur gewinngeführt, nicht aber wie in einem Wellenleiter indexgeführt wird. Um auch in lateraler Richtung Indexführung zu erreichen, wird das Halbleitermaterial an den Seiten des gewünschten Wellenleiters abgetragen und durch ein Material mit kleinerem Brechungsindex ersetzt. Man kann dazu die für die *Planartechnik* der Mikroelektronik entwickelten Lithographie-Verfahren verwenden.

Die so hergestellten Strukturen bezeichnet man als *vergrabene Heterostrukturen* (*buried heterostructures*).

2.6 Moden, Frequenzselektion

Die kurze Resonatorlänge bedingt beim Halbleiterlaser einen großen Modenabstand; bei einer Resonatorlänge von 1 mm und einem Brechungsindex von $n = 3$ sind dies 50 GHz. Die Verstärkungsbandbreite ist jedoch so groß (sie liegt im THz-Bereich), dass trotz des großen Modenabstands viele Moden konkurrieren. Bei den meisten Anwendungen ist dies relativ unproblematisch, so dass man bei der relativ einfachen Bauweise bleiben kann. Bei einigen Anwendungen, unter anderem bei der breitbandigen optischen Nachrichtenübertragung, ist man jedoch auf Einzelmodebetrieb angewiesen, man muss die Bandbreite des Diodenlasers geeignet begrenzen.

Eine nahe liegende Möglichkeit, dies zu tun, besteht darin, dass man die Laserdiode an einen externen schmalbandigen Resonator koppelt. Schmalbandigkeit wird beispielsweise durch ein Reflexionsgitter erreicht. Dadurch lässt sich in der Laserdiode Einzelmodebetrieb erzwingen. Die Technik hat den Vorteil, dass sich die Laserwellenlänge kontinuierlich im Verstärkungsbereich durchstimmen lässt, indem man das Gitter verdreht. Der große Nachteil ist jedoch der hohe Aufwand und die Komplexität; die Kompaktheit des "einfachen Bauelements" geht verloren.

Oft ist die Durchstimbarkeit nicht erforderlich, es reicht aus, wenn der Diodenlaser stabil bei einer festgelegten Frequenz arbeitet. So beispielsweise bei der optischen Nachrichtenübertragung. Dann kann man durch eine

zusätzliche frequenzselektive Strukturierung des Bauelements die Arbeitsfrequenz festlegen. Zwei Techniken sind gebräuchlich, *Distributed Bragg Reflection* (DBR) und *Distributed FeedBack* (DFB). Bei beiden Techniken wird der Brechungsindex periodisch moduliert, bei DBR-Lasern in einem der Reflektoren oder in beiden, bei DFB-Lasern im aktiven Medium selbst. Das Prinzip verdeutlicht Abbildung 18.

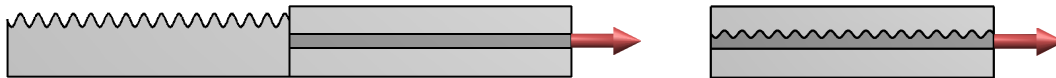


Abbildung 18: Prinzip der *verteilten Rückkopplung*. Links *Distributed Bragg Reflection*, ein Reflektor mit periodisch ortsabhängigem Brechungsindex reflektiert wellenlängenselektiv. Rechts *Distributed FeedBack*, das aktive Medium ist periodisch strukturiert.

Verteilte Bragg-Reflexion wird durch einen geeignet strukturierten zusätzlichen Reflektor erreicht. Dieser kann mit auf dem Chip integriert sein. Denkbar ist auch, eine Glasfaser anzuschließen, deren Brechungsindex periodisch moduliert ist.

Ohne zusätzliche Komponenten kommt man bei den DFB-Lasern aus, dort ist die *verteilte Rückkopplung* im aktiven Medium integriert. Eine solche Struktur ist primär *wellenlängenselektiv*, nicht unbedingt *frequenzselektiv*. Nach der Bragg-Bedingung ist die selektierte Lichtwellenlänge gleich der doppelten Strukturperiode. Im Resonator bildet sich eine stehende Welle mit genau dieser Wellenlänge. Welche Frequenz gehört dazu?

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c_{\text{vak}}}{n\lambda} . \quad (2)$$

In der Struktur ist nun aber der Brechungsindex n nicht einheitlich. Die stehende Welle "erfährt" einen gewichtet gemittelten Brechungsindex, die Gewichtungsfunktion ist die lokale Amplitude der stehenden Welle.

Je nach Phasenlage der Wellenbäuche zur Brechungsindexstruktur wird mithin der gemittelte Brechungsindex irgendwo zwischen minimalem und maximalem liegen. Damit könnte sich die Frequenz ν grundsätzlich in einem Bereich einstellen, der größenordnungsmäßig durch den minimalen und den maximalen Brechungsindex begrenzt wird

$$\frac{c_{\text{vak}}}{n_{\text{max}}\lambda} < \nu < \frac{c_{\text{vak}}}{n_{\text{min}}\lambda} . \quad (3)$$

Es lässt sich zeigen, dass nur zwei Frequenzen zu stabilen Moden führen, die minimale und die maximale. Die räumliche Lage dieser beiden Moden ist in Abbildung 19 skizziert.

Die beiden Moden sind um $\lambda/4$ gegeneinander versetzt. Bei einem Mode liegen die Schwingungsbäuche an den Brechungsindexmaxima, beim an-

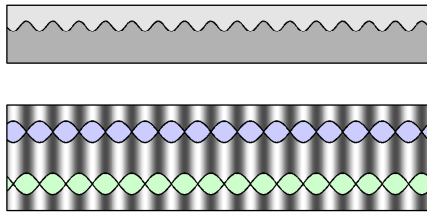


Abbildung 19: Einfache DFB-Struktur, zwei Moden können stabil schwingen, sie gehören zum minimalen bzw. maximalen Brechungsindex, d. h. zur maximalen bzw. minimalen Frequenz.

deren an den Brechungsindexminima. Die beiden Moden werden konkurrierend schwingen; man hat zwar eine deutliche spektrale Einengung, aber keinen Einzelmodenbetrieb erreicht.

Den erreicht man erst mit einem zusätzlichen Trick. Durch einen Phasenversatz um eine Viertelwellenlänge in der Mitte der Brechungsindexstruktur wird dafür gesorgt, dass die beiden extremen Moden nicht mehr auf die Struktur "passen". Durch den Phasenversatz im Brechungsindexgitter wird die Lage von Bäuchen und Knoten zur Brechungsindexstruktur vertauscht. Links und rechts der Mitte würden die bisherigen Moden unterschiedliche effektive Brechungsindizes sehen, d. h. mit unterschiedlichen Frequenzen schwingen oder bei einheitlicher Frequenz außer Phase mit der Brechungsindexstruktur geraten. Deutlich stabiler schwingt ein Mode, der über die gesamte Struktur einen einheitlichen effektiven Brechungsindex sieht. Dieser Mode ist um $\lambda/8$ gegenüber den beiden vorherigen Moden und gegenüber der Brechungsindexstruktur versetzt (Abbildung 20).

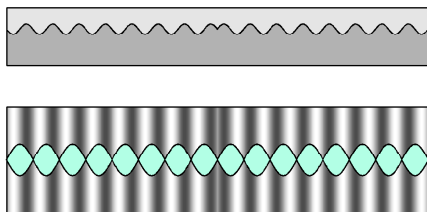


Abbildung 20: DFB-Struktur mit $\lambda/4$ -Phasenversatz in der Mitte des Resonators, nur noch ein stabiler Mode.

2.7 VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser

Die bisher diskutierten Bauformen für Diodenlaser – so genannte *Kantenemitter (edge emitter)* – sind durch ungefähr rechteckige Strahlaustrittsflächen gekennzeichnet. Die Beugung daran führt zu einem etwa elliptischen Strahlprofil mit unterschiedlichen Divergenzwinkeln parallel und senkrecht zum p-n-Übergang.

Diesen Nachteil vermeidet eine andere Bauform für Halbleiterlaser, der *Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)*. Abbildung 21 skizziert das Prinzip. Eine Quantentopfschicht wird von p- und n-Multischichten begrenzt, die als Bragg-Reflektoren fungieren.

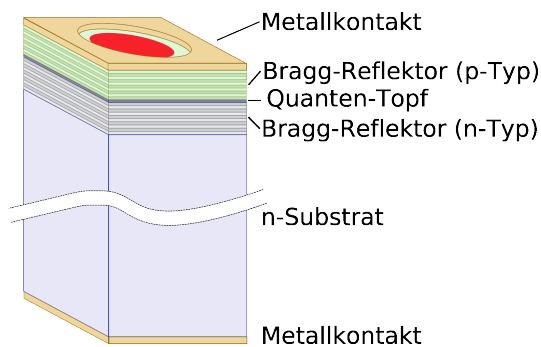


Abbildung 21: Struktur einer *Vertical Cavity Surface Emitting Laserdiode* (Zeichnung aus Wikipedia).

Die Bauweise hat – neben der günstigeren Strahlform – verschiedene Vorteile. So können VCSEL in großer Stückzahl auf einem Substrat hergestellt werden und während der Herstellung noch auf dem Substrat getestet und optimiert werden, während Kantenemitter erst nach der Fertigstellung getestet werden können.

2.8 Quantenkaskadenlaser

Relativ neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Halbleiterlaser sind die Quantenkaskadenlaser. Bei diesem Lasertyp wird nicht die Rekombination von Elektronen und Löchern ausgenutzt wie sonst bei Halbleitern. Stattdessen nutzt man Elektronenübergänge zwischen unterschiedlichen Zuständen in einer Quantenstruktur. Das Prinzip zeigt Abbildung 22.

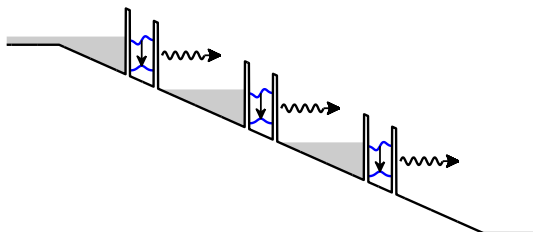


Abbildung 22: Quantenkaskadenlaser, Lumineszenz durch Übergänge zwischen Elektronenzuständen innerhalb von Quantentöpfen.

Im Leitungsband eines Halbleiters werden Quantentöpfe dadurch realisiert, dass dünne Barrierschichten aus einem Material mit größerer Bandlückenenergie eingebaut werden. Die Barrierschichten müssen so dünn sein, dass die Tunnelwahrscheinlichkeit für Elektronen groß genug ist. Die Breite der Quantentöpfe ist durch die gewünschten Energieabstände für die Elektronenniveaus bestimmt.

Wird an die Struktur Spannung angelegt, so werden die höheren Zustände mit größerer Wahrscheinlichkeit gefüllt als die tief liegenden (Höhe der Tunnelbarriere). Die Besetzungsinversion führt zu stimulierter Emission. Wegen der für die Herstellung verfügbaren Halbleiter sind Quantenkaskadenlaser bisher auf den Bereich des mittleren Infrarot beschränkt, kürzlich

wurden Wellenlängen von knapp 3 μm erreicht.

2.9 Hochleistungslaser

Wie bei allen Lasern skaliert auch bei Halbleiterlasern die Leistung bis zu einem gewissen Grad mit der Größe des aktiven Volumens. Aus verschiedenen Gründen lässt sich das bei Diodenlasern nicht beliebig vergrößern. Um hohe Leistungen zu erreichen, addiert man die Leistungen vieler Einzeldioden, die man geeignet anordnet. Typische Anordnungen sind *Arrays* – Dioden werden auf einem gemeinsamen Substrat parallel nebeneinander angeordnet und in Parallelschaltung betrieben – und *Stacked Arrays* – Arrays werden parallel aufeinander gestapelt und so in Serienschaltung betrieben. Abbildung 23 zeigt eine solches Diodenanordnung mit einer kontinuierlichen Ausgangsleistung von 1.45 kW (Bild aus Wikipedia⁷).

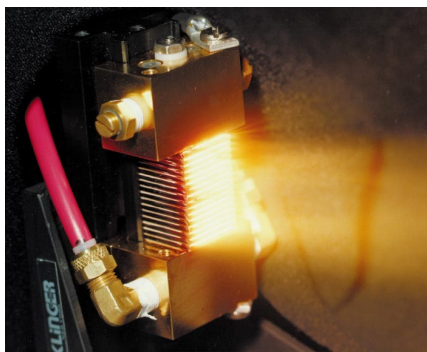


Abbildung 23: Erstes Hochleistungs-Diodenlaser-Array mit einer kontinuierlichen Ausgangsleistung von mehr als 1 kW (1.45 kW), entwickelt am *Lawrence Livermore National Laboratory* (1990).

2.10 Anwendungen von Halbleiterlasern

Ohne den Anspruch auch nur annähernder Vollständigkeit im Folgenden ein paar Stichworte zu den Anwendungen von Halbleiterlasern.

Optische Datenspeicher: Tiefrote Laserdioden (780 nm) für CDs, rote (650 nm) für DVDs, blaue (405 nm) für Blue-Ray Discs.

Optische Nachrichtenübertragung: Bereiche geringer Absorption in Glasfasern bei 1350 nm und 1550 nm. Pumpen von *Erbium Doped Fiber Amplifiers* (EDFA) bei 980 nm.

Laserpointer: Rote (635–670 nm) direkt als Laserdioden, grüne (532 nm) über den Umweg Nd:YAG und Verdopplung.

⁷Das Original entstammt einer Veröffentlichung des *Lawrence Livermore National Laboratory*: "Laser Programs, The First 25 Years. . . 1972–1997" (<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/16710-UOC0xx/native/16710.pdf>)

Pumpen von Festkörperlasern: Z. B. Nd:YAG, gepumpt bei 808 nm, Emission bei 1064 nm.

Pumpen von Faserlasern: Faserlaser mit Neodym, Ytterbium oder Thulium/Holmium zur Materialbearbeitung.

Materialbearbeitung: Direkte Verwendung von Hochleistungsdiodenlasern.

Umweltanalytik: Halbleiterlaser im mittleren Infrarot (Bleisalzlaser) zum spektroskopischen Nachweis von Schadstoffen.

Scanner: Ersatz von He-Ne-Lasern in Barcode-Scannern.

Entfernungsmessung, Längenmessung: Auch 3D-Erfassung durch Triangulation.

Displays: Laserdisplays als Ersatz für Beamer und Bildschirme aller Art. Problem sind (noch) günstige grüne Diodenlaser.

In der nächsten Auflage

3 Faserlaser und Faserverstärker

4 Farbstofflaser

5 Gaslaser

5.1 He-Ne-Laser

5.2 Ionen-Laser

5.3 Excimer-Laser

5.4 CO₂-Laser

6 Chemische Laser

7 Freie-Elektronen-Laser

8 Röntgen-Laser