



Oliver Casel (Autor)

**Experimentelle Untersuchung und Modellierung des
Einflusses der Epitaxiestruktur auf die
physikalischen Eigenschaften optisch angeregter
Halbleiterscheibenlaser**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2451>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Kapitel 1

Einleitung

Der elektrisch angeregte Diodenlaser ist eine Schlüsselkomponente der Optoelektronik. Aufgrund seiner Kompaktheit und der Verfügbarkeit von Halbleitermaterialien für weite Wellenlängenbereiche wird er standardmäßig in der breitbandigen optischen Nachrichtenübertragung verwendet. Mit einer Effizienz von derzeit bis zu 70% [LAS04] ist er in besonderer Weise für die optoelektronische Systemintegration geeignet. Seine kostengünstige Massenproduzierbarkeit hat den Diodenlaser auch im Endanwendermarkt (CD- und DVD-Laufwerke) längst etabliert.

Die oben genannten Anwendungen basieren auf Diodenlasern geringer Leistung unterhalb von 100 mW. Darüber hinaus existieren Diodenlasersysteme im Leistungsbereich oberhalb von 1 W, zu denen beispielsweise Breitstreifenlaser, Diodenlaserbarren und Oszillator-Verstärker-Systeme zählen. Während Diodenlaser die höchste Effizienz aller Laserformen bei der Umwandlung von elektrischer Leistung in optische erreichen, so stellt die Erzielung einer hohen räumlichen Strahlgüte mit zunehmender Ausgangsleistung eine Herausforderung dar: Da die optische Leistungsdichte auf den Laserfacetten nicht die Zerstörschwelle von typischerweise $50 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ [BEI99] erreichen darf, müssen kantenemittierende Hochleistungsdiodenlaser mit zunehmender maximaler Ausgangsleistung größere Facettenflächen aufweisen. Da jedoch die vertikale Ausdehnung der aktiven Zone auf typischerweise $1 \mu\text{m}$ beschränkt ist, muss bei Ausgangsleistungen oberhalb von 100 mW die Facettenbreite deutlich größer sein. Damit einher geht eine deutliche Degradation der räumlichen Strahlgüte aufgrund anschwingender höherer Transversalmoden und zunehmendem Astigmatismus. Im Hochleistungsbereich werden schließlich Einzelemitter monolithisch in einer Zeile zu einem so genannten Barren zusammengefasst ($P \approx 100 \text{ W}$) [DIE00]. Die Stapelung mehrerer Barren ermöglicht optische Ausgangsleistungen im einstelligen Kilowatt-Bereich. Diese Systeme geringer räumlicher und spektraler Strahlgüte dienen meist zur effizienten optischen Anregung von Festkörperlasern, die ihrerseits hervorragende räumliche Strahleigenschaften erzielen.

Diodenlaser mit hoher Strahlgüte im einstelligen Watt-Bereich basieren auf Oszillator-

Verstärker-Systemen, bei denen die geringe Leistung eines Einstreifen-Diodenlasers in einem nachfolgenden optischen Verstärker von typischerweise weniger als 100 mW auf 2 bis 4 W erhöht wird [FUC05]. Bei der Verstärkung bleibt die hohe räumliche Güte der Oszillatorstrahlung weitgehend erhalten. Einer deutlichen Steigerung der verstärkten Ausgangsleistung auf ≥ 10 W steht neben der Zerstörschwelle der Facetten die zunehmende Strahlfilamentierung im Verstärker entgegen, welche die Strahlgüte stark reduziert.

Eine grundsätzliche Alternative zu solchen mehrstufigen Diodenlasersystemen bietet die Übertragung des Scheibenlaser-Konzepts [GIE94] aus dem Bereich optisch angeregter Festkörperlaser auf Halbleiterlaser. Das Scheibenlaser-Konzept ermöglicht aufgrund einer flachen Geometrie des aktiven Mediums eine hocheffiziente Kühlung und damit eine Flächenskalierung der Ausgangsleistung, sodass bei Festkörperscheibenlasern Leistungen bis in den Kilowatt-Bereich im Dauerstrichbetrieb erreicht werden [STE00]. Der prinzipielle Vorteil des Scheibenlaser-Konzepts liegt in der Wahrung einer hohen räumlichen Strahlgüte bei der Flächenskalierung der Ausgangsleistung.

Die neuartigen Halbleiterscheibenlaser (*vertical external cavity surface emitting laser*, VECSEL) basieren auf Vielfach-Quantenfilm-Strukturen, die wie Festkörperlaser optisch angeregt werden [KUZ99]. Bei hoher räumlicher Strahlgüte konnten jüngst Ausgangsleistungen bis in den zweistelligen Watt-Bereich demonstriert werden [COH04]. Im modenkoppelten Betrieb wurden mittlere Leistungen um 1 W erzielt [ASC04]. Die hohe Strahlgüte prädestiniert diese Laser für Anwendungen in der nichtlinearen Optik [RAY99, COH04]. Weiterhin werden optisch angeregte Halbleiterscheibenlaser bereits erfolgreich in der Absorptionsspektroskopie eingesetzt [CAM03, BER03, DIN03], wobei Nachweisgrenzen der Absorption bis 10^{-10} cm^{-1} erreicht wurden [GAR00].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Charakterisierung solcher Halbleiterscheibenlaser im Materialsystem Indium-Gallium-Arsenid/Aluminium-Gallium-Arsenid auf Gallium-Arsenid-Substrat (InGaAs/AlGaAs-GaAs) und die Untersuchung der zugrundeliegenden physikalischen Eigenschaften. Die Charakterisierung erstreckt sich neben fundamentalen Laserkenngrößen wie Schwelleistung, differentieller Wirkungsgrad, Emissionsspektrum und räumliche Strahlgüte auf spezifische Eigenschaften dieser neuartigen Laserform. Dazu zählen Messungen und Simulationen zur thermischen Belastung der Halbleiterstruktur sowie zum Wärmefluss, welche maßgeblich die Flächenskalierbarkeit der Ausgangsleistung beeinflussen. Weiterhin wird der Einfluss der Pumpwellenlänge auf den Laserprozess experimentell untersucht. Betrachtungen zu Degradationserscheinungen zeigen die Anforderungen an den epitaktischen Schichtaufbau der Scheiben auf. An diese fundamentale Charakterisierung schließen sich Experimente zur resonatorinternen Frequenzverdopplung in den blau-grünen Spektralbereich an, die eine wichtige Anwendung dieser Laser darstellt [COH01]. Aufgrund der hohen Anforderungen an die räumlich-spektrale Strahlqualität [WOL01] ist die optische Frequenzkonversion besonders geeignet, die hervorragenden Eigenschaften der vom Halbleiterscheibenlaser erzeugten Strahlung zu demonstrieren.

Neben den Untersuchungen im Dauerstrichbetrieb werden die Halbleiterscheibenlaser mittels sättigbarer Absorber passiv modengekoppelt und so zur Emission von ultrakurzen Impulsen im Pikosekunden-Bereich angeregt. Umfangreiche Arbeiten zu diesem Thema wurden von den Gruppen um *Keller* [HÄR01, HÄR02] und *Tropper* [PAS02] veröffentlicht. Die Messungen in der vorliegenden Arbeit konzentrieren sich auf einen Vergleich systematisch variiertes sättigbarer Absorber in Hinblick auf die zeitlich-spektralen Strahleigenschaften und die mittlere Ausgangsleistung. Daran schließen sich erstmalige Experimente zur Frequenzkonversion derart erzeugter Impulse an. Bei der externen Frequenzverdopplung ist die nichtlineare Konversionseffizienz von besonderem Interesse, um das Leistungspotential solcher Lasersysteme hinsichtlich der Erzeugung von modengekoppelter Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich abzuschätzen. Zusätzlich wird erstmalig die resonatorinterne Frequenzverdopplung eines modengekoppelten Halbleiterscheibenlasers demonstriert, die einen besonders kompakten Aufbau ermöglicht.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der quantitativen Untersuchung der Abhängigkeit der Lasereffizienz vom epitaktischen Schichtaufbau. Ziel ist ein vertieftes Verständnis der physikalischen Prozesse innerhalb der Halbleiterscheibe, um so die Lasereffizienz anhand der Epitaxiestruktur vorhersagen zu können. Die Untersuchungen umfassen sowohl experimentelle Messungen an definiert variierten Schichtstrukturen als auch eine Modellierung des Laserprozesses unter Berücksichtigung des jeweiligen Schichtaufbaus. Die Gültigkeit eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten numerischen Modells wird durch Vergleich mit der experimentellen Charakterisierung systematisch variiertes Strukturen überprüft. Hierzu werden spezielle Halbleiterscheiben mit definiert variiertem Schichtaufbau im Rahmen dieser Arbeit charakterisiert. Variiert wird die Quantenfilmkonfiguration (Einzel- oder Doppelquantenfilme), die Anzahl der Quantenfilmperioden und die Reflektivität des Braggspiegels bei der Pumpwellenlänge.

Die Interpretation der gewonnenen experimentellen Daten erfolgt anhand einer umfangreichen Modellierung. Dazu werden ein analytisches und ein numerisches Modell zur Beschreibung des Anregungs- und Laserprozesses entwickelt. Diese beschreiben erstmalig die räumlich inhomogene Anregung und Verteilung der generierten Ladungsträger in der Vielfach-Quantenfilm-Struktur. Das umfassendere numerische Modell beschreibt darüber hinaus Umverteilungsprozesse zwischen den Besetzungen der einzelnen Quantenfilme, die durch das optische Feld vermittelt werden. Ein Abgleich zwischen dem numerischen Modell und den experimentellen Daten ermöglicht, die dominanten Ladungsträger-Transportmechanismen zu identifizieren. Dies erlaubt, den Schichtaufbau hinsichtlich einer hohen Lasereffizienz gezielt optimieren zu können.

Zusammenfassend liegt das Ziel dieser Arbeit in einer umfassenden experimentellen Charakterisierung und Modellierung von InGaAs/AlGaAs-GaAs - Halbleiterscheibenlasern hinsichtlich fundamentaler Lasereigenschaften, spezifischer Größen und dem Einfluss des epitaktischen Schichtaufbaus auf die Lasereffizienz.

Kapitel 2

Fundamentale Eigenschaften der Basiskomponenten

2.1 Hochleistungshalbleiterlaser hoher Strahlgüte

2.1.1 Laseremission in Halbleiterlasern

Die Funktionsweise des Halbleiterlasers beruht wie die meisten Laser auf elektronischer Besetzungsinversion im aktiven Medium. Der Laserbetrieb wird erreicht, wenn die optische Verstärkung durch die Besetzungsinversion im Halbleitermaterial die Resonatorverluste kompensiert. Meist bilden die Endfacetten der Halbleiterstruktur den Laserresonator. Die Besetzungsinversion wird zwischen Valenz- und Leitungsband aufgebaut, welche auf der kristallinen Struktur des Halbleiters basieren [KOP93].

Die epitaktische Strukturierung eines Halbleiterlasers erfordert stets verschiedene Schichtmaterialien. Die Notwendigkeit eines kristallinen Wachstums setzt voraus, dass diese Schichten unterschiedlicher Materialzusammensetzung untereinander nur geringe Gitterfehlanpassungen aufweisen. Dazu werden Materialsysteme wie beispielsweise AlGaAs/GaAs eingesetzt. Dort ist der Austausch von Gallium- gegen Aluminiumatome aufgrund nahezu gleicher Atomgrößen für beliebige Zusammensetzung $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ gitterangepasst möglich, sodass unterschiedliche Schichten hergestellt werden können. Durch den gezielten Einsatz derartiger Schichtsysteme können Zielparameter wie beispielsweise Bandlücke oder Brechzahl variiert werden [DIE00].

Als Bandlücke wird der energetische Abstand der beiden Bänder bezeichnet; diese legt die Wellenlänge der emittierten Laserstrahlung fest. Angeregt wird der Halbleiterlaser meist elektrisch durch Ladungsträgerinjektion in eine pn-Grenzschicht im Halbleiter; in diesem Fall handelt es sich um einen Diodenlaser. Alternativ kann ein Halbleiterlaser auch optisch angeregt werden, was die Dotierung des Halbleiters bzw. die pn-Grenzschicht erspart. Im Folgenden werden der elektrisch angeregte Diodenlaser und der optisch angeregte Halbleiterlaser vorgestellt.

Diodenlaser

Der *Diodenlaser* basiert auf der strahlenden Rekombination von per elektrischem Strom zugeführten Ladungsträgern in einem pn-Übergang. Durch Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung des pn-Übergangs spaltet das gemeinsame Fermi-Energie-Niveau des thermischen Gleichgewichtszustandes in zwei Quasi-Fermi-Niveaus auf: das des p-dotierten Bereichs und das des n-dotierten. Sind diese Quasi-Fermi-Niveaus im pn-Übergangsbereich innerhalb der beiden Bänder (Valenz- und Leitungsband) lokalisiert, so ist Besetzungsinversion gegeben und damit ein stimulierter Laserübergang möglich [EBE92, FOU94]. Der zum Überwinden der Laserschwelle nötige Ladungsträgerfluss wird als Schwellstrom bezeichnet. Diesen gilt es beim Entwurf eines Diodenlasers zu minimieren. Dazu werden verschiedene Techniken eingesetzt, die allesamt auf einer räumlichen Einschränkung des Rekombinationsgebietes basieren. Dies kann durch eine Lokalisierung der Ladungsträger (*gain guiding*) als auch durch eine Lichtwellenführung (*index guiding*) realisiert werden.

Darüber hinaus nutzen moderne Diodenlaser einen oder mehrere Quantenfilme in der aktiven Zone für erhöhte spektrale Zustandsdichten an den Subbandkanten, die mit einer stärkeren Inversion und geringeren Schwellströmen einhergehen [FOU94].

Optisch angeregte Halbleiterlaser

Neben den elektrisch angeregten Diodenlasern gibt es die Klasse der *optisch angeregten* Halbleiterlaser. Das Funktionsprinzip der optischen Verstärkung ist dabei unverändert. Anstatt die Ladungsträger elektrisch von außen zu injizieren, werden hier jedoch die freien Ladungsträger durch Absorption von eingestrahltm Pumplicht direkt im Halbleiter erzeugt. Mit der Absorption eines eingestrahltm Pumpphotons, dessen Energie die Bandlücke übersteigt, geht die Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares einher. Während die optische Anregung im Volumenmaterial des Halbleiters stattfindet, ist die Laserverstärkung auf eigens in diesen Bereich eingebrachte Quantenfilme (*multiple quantum wells*, MQW) beschränkt.

Im Vergleich zur elektrischen Anregung erfordert die optische einen größeren experimentellen Aufwand¹, jedoch vereinfacht sie die epitaktische Struktur des Halbleiterlasers erheblich: p- und n-Dotierungen können entfallen, da in der Umgebung oder bisweilen sogar innerhalb der Quantenfilme die Ladungsträgerpaare direkt erzeugt werden. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Halbleiterscheibenlasern ist darüber hinaus jegliche Lateralstrukturierung entbehrlich.² Auch die aufwendige elektrische Kontaktierung der Halbleiterstruktur entfällt. Aufgrund dieser Vereinfachungen bei der *Herstellung* wird die optische Anregung bei der Entwicklung neuer Diodenlaser meist als Vorstufe eingesetzt, um die vereinfachten Laserstrukturen zunächst bezüglich optischer Qualität, Verstärkung und

¹Meist wird mit einem weiteren Laser optisch angeregt.

²siehe Abschnitt 2.2.1

spektraler Eigenschaften charakterisieren und optimieren zu können. Eine eigenständige Anwendung hat die optische Anregung von Halbleiterlasern erst durch die Einführung des Halbleiterscheibenlasers erfahren, wie er in Abschnitt 2.2 vorgestellt wird. Dabei werden grundsätzliche Vorteile der optischen Anregung gegenüber der elektrischen ausgenutzt, die auch durch aufwendige Epitaxiестrukturierung von Diodenlasern bis dato nicht erreicht werden.

2.1.2 Kanten- und Oberflächenemitter

Neben der Art der Anregung können Halbleiterlaser auch nach der Emissionsrichtung in Kantenemitter und Oberflächenemitter klassifiziert werden. Die Vorteile des oberflächenemittierenden Halbleiterlasers lassen sich nur im Vergleich zum konkurrierenden Kantenemitter verstehen.

Kantenemitter

Kantenemitter stellen die mit Abstand häufigste Bauform des Diodenlasers dar. Die Strahlführung erfolgt hier entlang des verstärkenden pn-Übergangs parallel zu den Schichtebenen und senkrecht zum Ladungsträgerfluss. Ein Vorteil dieser Bauform ist die sehr hohe Laserverstärkung pro Weglänge in der Größenordnung von 1000 cm^{-1} , sodass selbst bei hohen Transmissionsverlusten an unbeschichteten Facetten von typischerweise 70% Lasertätigkeit möglich ist [DIE00]. Zudem kann die gesamte Länge des Bauteils zur Verstärkung genutzt werden. Verglichen mit anderen Lasertypen wie Gas- oder Festkörperlaser erreicht der kantenemittierende Diodenlaser aufgrund der direkten Umwandlung von elektrischer in optische Leistung die höchsten Wirkungsgrade (*wall-plug-efficiency*) mit Werten zwischen 30% und über 70% [LAS04]. Der kantenemittierende Diodenlaser ist mit Abmessungen von typischerweise $0,3 \times 0,1 \times 0,1\text{ mm}^3$ sehr kompakt [KNE95].

Während die Lasereffizienz des kantenemittierenden Diodenlasers die anderer Laserformen übertrifft, so stellt die räumliche Strahlqualität einen kritischen Parameter dar. Da die Strukturierung der epitaktischen Schichten beim Kantenemitter nur rechteckige Querschnitte der aktiven Zone zulässt, wird die bestmögliche Strahlqualität bei quadratischem Querschnitt erreicht. Tatsächlich werden mit so genannten Einstreifenlasern gute bis sehr gute Strahlqualitäten mit M^2 -Werten $\leq 1,2$ [TRE05] bei bis zu 150 mW Ausgangsleistung erreicht [WOL05].

Deutlich höhere Leistungen sind mit solchen Bauteilen wegen der geringen Fläche der Laserfacetten von typischerweise $1 \times 3\text{ }\mu\text{m}^2$ kaum möglich, da die Facetten bei Leistungsdichten von etwa $50\text{ mW}/\mu\text{m}^2$ [BEI99] irreversibel degradieren (*catastrophic optical mirror damage*, COMD). Einer Flächenskalierung der optischen Leistung durch einen vergrößerten, möglichst *quadratischen* Querschnitt des aktiven Wellenleiters sind prinzipbedingt enge Grenzen gesetzt: Die vertikale Ausdehnung der aktiven Zone ist auf typischerweise

0,3 bis 3 μm begrenzt [DEM96], da ansonsten die Rate der stimulierten Emission der von oben und unten zugeführten Ladungsträger stark sinkt und somit die Quanteneffizienz des Lasers reduziert [EBE92]. Eine Flächenskalierung zur Erhöhung der maximalen Ausgangsleistung ist daher nur in der lateralen Dimension möglich. Dies wird bei Breitstreifenlasern angewandt, die mit einem Querschnitt der aktiven Zone von beispielsweise $1 \times 150 \mu\text{m}^2$ Leistungen von typischerweise 2 W generieren. Die räumliche Strahlqualität leidet dabei jedoch insbesondere in lateraler Dimension aufgrund anschwingender höherer Transversalmoden erheblich: Hier werden meist Beugungsmaßzahlen $M^2 > 10$ gemessen.

Bessere Strahlqualitäten des Kantenemitters bei optischen Leistungen im Watt-Bereich können durch spezielle Geometrien des aktiven Wellenleiters erzielt werden. So ermöglicht eine Trapezgeometrie in lateraler Richtung das Anpassen der aktiven Zone an den lateralen Beugungswinkel der propagierenden Strahlung.³ Neben Trapezlasern werden insbesondere Trapezverstärker eingesetzt, die in Oszillator-Verstärker-Systemen (*master oscillator power amplifier*, MOPA) die Laserstrahlung eines Einstreifenlasers hoher Strahlgüte von typischerweise 10 mW bis in den Multi-Watt-Bereich verstärken und dabei höhere Strahlgüten erzielen als Trapezlaser vergleichbarer Leistung. Wird der nicht-beugungsbegrenzte Strahlungsuntergrund (20 – 30 % der Strahlleistung) in der Fourierebene ausgeblendet, so erreichen solche MOPA-Systeme im Leistungsbereich bis 3 W Beugungsmaßzahlen bis hinunter zu $M^2 \leq 1,3$ [FUC05, WOL01]. Bei höheren Ausgangsleistungen führt die zunehmende Strahlfilamentierung auch bei Trapezgeometrien zu einer drastischen Abnahme der räumlichen Strahlgüte. Die Strahlfilamentierung ist zunächst auf inhomogene Stromdichten in der aktiven Zone zurückzuführen, die insbesondere bei hohen Strömen oder hohen optischen Leistungsdichten auftreten. Zusätzlich tritt bei hohen Spitzenleistungen > 10 W im modengekoppelten Impulsbetrieb Selbstphasenmodulation [GEH00, GEH99] auf, die zu weiterer Filamentierung aufgrund von Selbstfokussierung führen kann und zusätzlich eine spektrale Verbreiterung von typischerweise 50 GHz verursacht [OLS89].

Letztlich können spezielle Geometrien der aktiven Zone wie die Trapezstruktur im Leistungsbereich weniger Watt die räumliche Strahlqualität deutlich verbessern. Fundamentale Beschränkungen wie die Strahlfilamentierung und die eingeschränkte Flächenskalierbarkeit setzen dem Ansatz des Kantenemitters mit hoher Strahlgüte im Multi-Watt-Bereich aber grundlegende Grenzen. Es ist deshalb damit zu rechnen, dass kantenemittierende Diodenlasersysteme mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlemission (M^2 -Werten $\leq 1,5$) auf absehbare Zeit im Leistungsbereich von deutlich unter 10 W bleiben werden.

Die optische Anregung von *Kantenemittern* bietet gegenüber der elektrischen keinen grundsätzlichen Vorteil, insbesondere hinsichtlich der emittierten räumlichen Strahlgüte. Die Anwendung dieser Konfiguration beschränkt sich auf Kantenemitter in neuen Mate-

³Bei der Trapezstruktur wird allein die laterale Ausdehnung des Querschnitts senkrecht zur Strahlpropagationsrichtung variiert; der Querschnitt bleibt jedoch entlang dieser Achse rechteckig.

rialsystemen, in denen die elektrische Anregung (noch) nicht möglich ist.⁴

Oberflächenemitter

Der Oberflächen- oder Vertikalemitter stellt eine Alternative zum gängigen Kantenemitter dar. Bei diesem Konzept erfolgt die Strahlpropagation und -emission nicht parallel zu den epitaktischen Schichten, sondern senkrecht. Somit wird die vertikal propagierende optische Welle nur bei Passieren der typischerweise $1\ \mu\text{m}$ dünnen aktiven Zone verstärkt. In allen anderen Schichten erfährt die zu verstärkende Welle idealerweise vernachlässigbare Verluste. Folglich gibt der Bruchteil der aktiven Schichtdicke an der gesamten Resonatorlänge den Faktor an, um den die *mittlere* Verstärkung pro Weglänge kleiner ist als beim Kantenemitter. Im Gegensatz zum Kantenemitter sind deshalb Facettenreflektivitäten oberhalb von 90% für das Erreichen der Laserschwelle notwendig. Diesem Nachteil geringerer mittlerer Verstärkung steht eine prinzipbedingt höhere räumliche Strahlqualität gegenüber: Die vertikale Strahlpropagation senkrecht zur epitaktischen Schichtfolge ermöglicht beliebige Aperturformen der aktiven Zone. Beim *elektrisch angeregten Oberflächenemitter* (*vertical cavity surface emitting laser, VCSEL*) wird dies durch Prozessierung der Epitaxiestruktur mit entsprechender Maskenform erreicht. Eine kreisförmige Strukturierung der aktiven Zone mit einem Durchmesser weniger Mikrometer ermöglicht die selektive Anregung der räumlichen Grundmode durch optimierten Modenüberlapp; konkurrierende Moden werden effektiv unterdrückt [LI03]. Für Telekommunikationsanwendungen ist der elektrisch angeregte Oberflächenemitter zudem aufgrund der extrem kurzen Resonatorlänge von einigen Mikrometern und der damit bis in den zweistelligen GHz-Bereich erhöhten Modulationsfrequenz interessant [HEC01]. Die Facettenreflektivitäten werden entweder durch epitaktisch integrierte Braggspiegel oder nachträglich aufgebraute dielektrische Spiegel realisiert, die entweder aufgedampft oder aufgesputtert werden. Die Ausgangsleistungen von elektrisch angeregten Oberflächenemittern liegen meist im einstelligen mW-Bereich. In Abbildung 2.1 ist ein typischer Aufbau schematisch dargestellt.

Da die Laseremission aus der Epitaxieoberfläche erfolgt, über die auch externe Ladungsträger in die Epitaxiestruktur injiziert werden müssen, ergeben sich beim elektrisch angeregten Oberflächenemitter zwei mögliche Kontaktierungen: Zum einen kann die kreisrunde Laserfacette von der Kontaktierung ausgespart werden. In diesem Fall müssen die Ladungsträger von einer Ringelektrode seitlich durch die Epitaxie in die aktive Zone injiziert werden. Zum anderen kann eine transparente, flächige Elektrode verwendet werden, die eine streng vertikale Ladungsträgerzuführung zur aktiven Zone ermöglicht. Für Ausgangsleistungen im 100 mW-Bereich ist der oberflächenemittierende Diodenlaser ungeeignet. Zur Vermeidung einer irreversiblen Facettendegradation (COMD) wäre auch hier eine Flächenskalierung nötig. Eine Vergrößerung des Durchmessers geht jedoch mit dem

⁴Insbesondere die elektrische Kontaktierung neuartiger Halbleiterlaser stellt oft eine Herausforderung dar.