

Kapitel 1

Einleitung

Die stetig wachsende Vielfalt an Kommunikationsmöglichkeiten, insbesondere der rasant zunehmende Einfluss des Internets, führt seit einigen Jahren zu einem ständig steigenden Bedarf an Übertragungsbandbreite. Faseroptische Nachrichtensysteme verwenden dazu parallel eine immer größere Anzahl an Übertragungssignalen bei unterschiedlichen Wellenlängen (Wellenlängenmultiplex), die in regelmäßigen Abständen verstärkt werden. Zur Vergrößerung des nutzbaren Wellenlängenbereichs werden in jüngster Zeit *Ramanverstärker* eingesetzt [1]. Hierbei wird kurzwelliges Pumplicht hoher optischer Intensität in die Übertragungsfaser eingekoppelt. Durch stimulierte Ramanstreuung [2] findet ein Energietransfer zum Übertragungssignal statt, der bei einem Frequenzunterschied von rund 13 THz optimal ist. Bei den am häufigsten verwendeten Signalwellenlängen um 1550 nm bewegen sich relevante Pumpwellenlängen zwischen 1.4 und 1.5 μm . Die Entwicklung solcher *14xx-Laser*, die auch die zukünftig an sie gestellten Anforderungen erfüllen, ist Gegenstand dieser Arbeit.

Die Einkopplung des Pumplichts in die Einmodenfaser setzt eine gute Fokussierbarkeit, d.h. ein annähernd ideal gaußsches Strahlverhalten voraus. Diese Eigenschaft lässt sich z.B. mit Rippenwellenleiter-Lasern (engl. *Ridge Waveguide Laser*) und Buried-Heterostructure-Lasern realisieren, die für optische Leistungen bis ca. 500 mW gut geeignet sind [3]. Zunehmende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Verstärker machen jedoch Pump Laser mit immer höherer Ausgangsleistung notwendig. Mit den genannten Lasertypen konnten zwar bereits Leistungen von rund 1 W demonstriert werden [4–6], allerdings erfordern solche Bauelemente ein aufwendiges epitaktisches Design, häufig einen zweiten Wachstumsschritt, und sie bewegen sich an der Grenze der technologischen Realisierbarkeit.

Diese Beschränkungen lassen sich aufheben durch das hier gewählte Konzept des *gewinngeführten Rippen-Trapezlasers*. Er stellt eine Kombination aus Rippenwellenleiter-Laser und Breitstreifenlaser dar und kann damit die Vorteile beider Lasertypen, nämlich die räumliche Einmodigkeit und die hohe optische Ausgangsleistung, kombinieren. Damit handelt es sich um ein einfaches und zugleich höchst erfolgreiches Konzept. Es benötigt nur einen einzigen Epitaxieschritt und keine sonderlich aufwendige Montage, ermöglicht aber dennoch eine Skalierung zu hohen optischen Ausgangsleistungen.

Die Ursprünge des Trapezlasers liegen beim sog. MOPA-System (*MOPA – Master Oscillator Power Amplifier*), das aus einem räumlich einmodigen Oszillator und einem Nachverstärker besteht. Durch monolithische Integration beider Elemente erhält man den Trapezlaser, der erstmals 1992 bei einem GaAs-basierten Laser bei 980 nm Wellenlänge demonstriert wurde [7,8].

Die Herstellung der inzwischen etablierten GaAs-basierten Trapezlaser wird durch die Molekularstrahlepitaxie (*MBE – Molecular Beam Epitaxy*) dominiert. Aufgrund ihrer niedrigen Wachstumstemperatur erlaubt sie eine sehr genaue Kontrolle der Epitaxie, was entscheidend ist für das Wachstum einzelner Monolagen, Herstellung von sehr exakten Grenzflächen, Einbau hoher Dotierstoffkonzentrationen sowie die Epitaxie von Quantenpunktstrukturen [9]. So konnten erst kürzlich, basierend auf MBE-gewachsenen Vertikalstrukturen, Rekordwerte in Leistung und Brillanz (optischer Leistungsdichte) bei 980 nm-Trapezlasern demonstriert werden [10].

Für die Herstellung von 14xx-Lasern stellt InGaAsP/InP das etablierteste und zuverlässigste Materialsystem dar. Das Wachstum solcher Laser wurde bisher fast ausschließlich mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (*MOVPE – Metal Organic Vapor Phase Epitaxy*) durchgeführt [5,11–15], in einem Fall auch durch eine Kombination aus Gasquellen-MBE und MOVPE [16]. Die Handhabung elementaren Phosphors galt jedoch lange Zeit als zu kritisch für ein zuverlässiges Schichtwachstum. Erst mit dem Aufkommen moderner Feststoffquellen-MBEs (*SSMBE – Solid Source MBE*) gewinnt die Molekularstrahlepitaxie bei InP-basierten Strukturen langsam an Einfluss [17–19]. Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag dazu, die Erfolge des MBE-Wachstums bei GaAs-basierten Lasern auf das Materialsystem InGaAsP zu übertragen. Erstmals kann hier die erfolgreiche Realisierung eines 14xx nm-Pumplasers mittels Feststoffquellen-MBE demonstriert werden.

Vorgehensweise und Aufbau

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines 14xx-Trapezlasers mit optimierter Brillanz. Dabei ist diese Arbeit im Kontext verschiedener Veröffentlichungen zu sehen: Mehrere am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik entstandene Dissertationen beschäftigen sich mit dem Thema des GaAs-basierten MOPA [20,21] bzw. Trapezlasers [20,22]. Daneben existieren verschiedene Veröffentlichungen zu InGaAsP-Trapezlasern [23–26], die mittels MOVPE bzw. Gasquellen-MBE realisiert wurden.

Die vorliegende Arbeit baut in mehreren Aspekten auf [20–22] auf. Die dort untersuchten Bauelemente basieren auf einer Mesa-Trapez-Struktur mit tief geätzttem Rippenbereich. Dagegen wird hier eine Rippen-Trapez-Struktur (Kapitel 3) gewählt, die eine flexiblere Gestaltung der Strahlpropagation ermöglicht. Im Unterschied zu früheren Arbeiten liegt hier ein Schwerpunkt auf der Entwicklung eines Modells zur Strahlausbreitung, das simulationsgestützt und experimentell untersucht wird und die genaue gegenseitige Anpassung von Rippen- und Trapezbereich zum Ziel hat.

Auch mit der Wahl des Materialsystems setzt sich diese Arbeit von früheren ab, in denen mit GaAs-basierten Strukturen kürzerwellige Laser realisiert wurden. Daher mussten hier zunächst die Epitaxieparameter des Materialsystems InGaAsP/InP erarbeitet werden, wo-

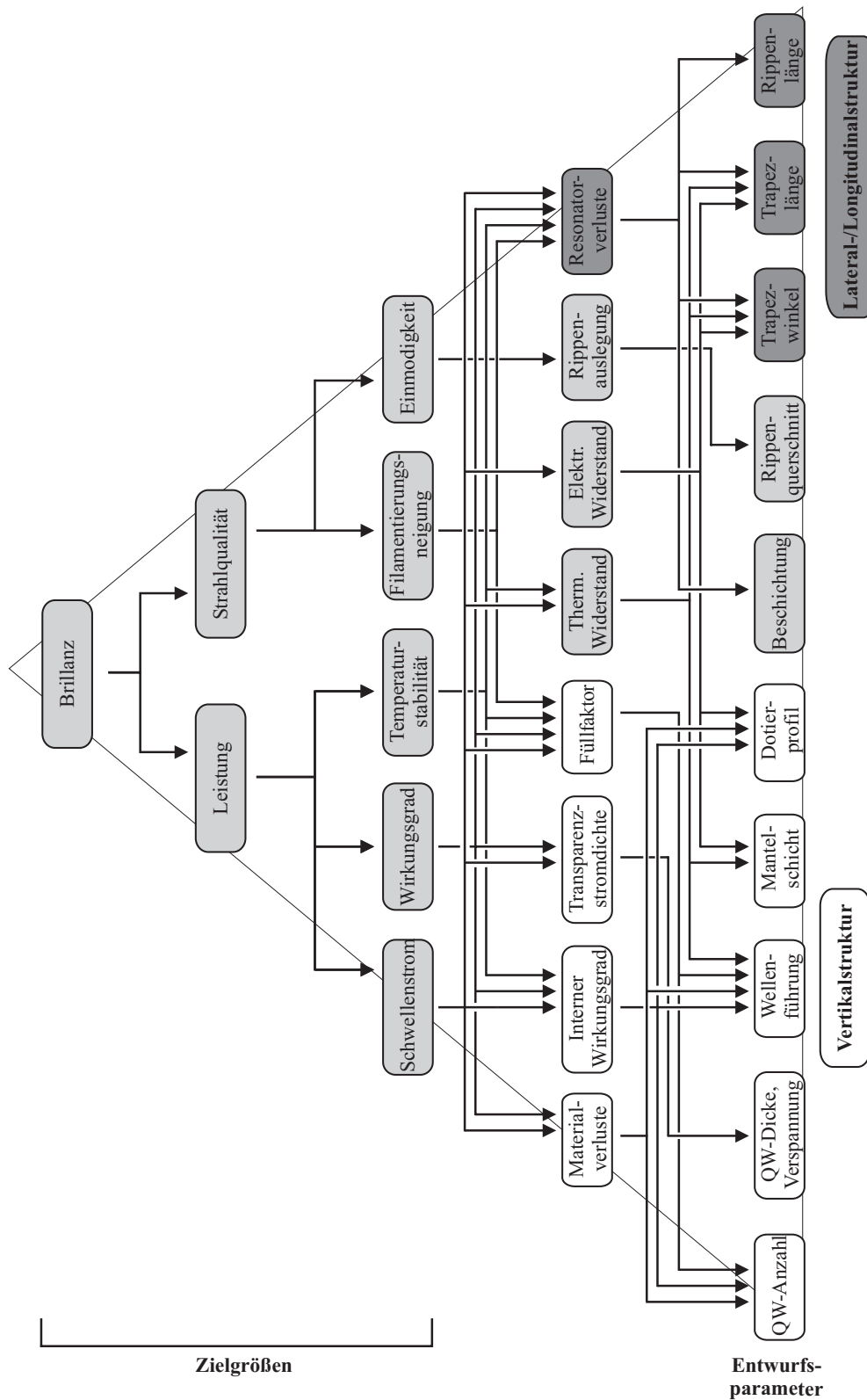


Abbildung 1.1: Übersichtsdiagramm für den Entwurf hochbrillanter Diodenlaser. Dargestellt sind die wichtigsten in dieser Arbeit berücksichtigten Entwurfsparameter und die dominierenden Zusammenhänge mit den Zielgrößen.

bei Literaturwerte in [27,28] zur Orientierung dienen. Die Entwicklung der Vertikalstruktur stellt folglich einen wesentlichen Bestandteil dieser Arbeit dar (Kapitel 4). Ein wichtiges Instrument zur Optimierung der Epitaxiestruktur bildet dabei die Schnellprozess-Analyse. Sie ermöglicht eine rasche Bestimmung der wichtigsten physikalischen Parameter und erlaubt vor der aufwendigen Prozessierung des Bauelements eine schnelle Rückkopplung in den Optimierungszyklen aus Simulation, Epitaxie und Charakterisierung.

Bisher existieren keine Veröffentlichungen anderer Gruppen zu SSMBE-gewachsenen 14xx nm-Lasern. Es finden sich jedoch verschiedene Arbeiten zu MOVPE-gewachsenen Trapezlasern in diesem Wellenlängenbereich, deren optische Ausgangsleistungen bis zu 1.8 W betragen [14, 23–26]. In dieser Arbeit sind Vertikalstruktur und Auslegung des Resonators am ehesten vergleichbar mit [24], wobei dort beugungsbegrenzt rund 1 W optischer Leistung erzielt wurde. Entsprechend wurde dieser Wert als Entwicklungsziel der vorliegenden Arbeit definiert.

Abbildung 1.1 zeigt den Zusammenhang zwischen den Zielgrößen der Optimierung und den wichtigsten Entwurfparametern, die in dieser Arbeit berücksichtigt werden. Weiß unterlegt sind Parameter, die nur der Vertikalstruktur zuzurechnen sind, dunkel unterlegte Parameter werden ausschließlich durch die Lateral- und Longitudinalstruktur bestimmt. Sämtliche Zielgrößen werden durch beides zugleich beeinflusst (grau unterlegt), zudem wirkt sich ein Teil der Optimierungsschritte gegenläufig aus. Eine vollständige Bauelementoptimierung würde in einem entsprechend vieldimensionalen Parameterraum stattfinden und über die vorhandenen experimentellen Möglichkeiten weit hinausgehen. Erfahrungen mit GaAs-Trapezlasern zeigen jedoch, dass sich mit einer schwerpunktmäßigen Betrachtung einzelner Aspekte bereits eine weitgehende Optimierung des Bauelements erreichen lässt. Dazu wird im ersten Schritt eine Vertikalstruktur entwickelt, die allgemein gute elektrooptische Eigenschaften aufweist und zugleich an die speziellen Anforderungen des Trapezlasers angepasst ist.

Bei der Dimensionierung des Resonators stehen zwei Aspekte im Vordergrund: Die Untersuchungen an Trapezlasern (Kapitel 6) zeigen, dass die lateralen Strahleigenschaften einerseits stark von der Ladungsträgerverteilung beeinflusst werden, andererseits von der oben erwähnten Anpassung zwischen Rippen- und Trapezbereich. Die Fokussierung auf diese Kernaspekte ermöglicht, wie in Kapitel 6 erläutert wird, das Erreichen des oben gesetzten Entwicklungsziels.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 und 3 gehen auf die theoretischen Grundlagen des Halbleiterlasers allgemein und auf die Eigenheiten des Trapezlasers ein. Kapitel 4 erläutert den Entwurf der Vertikalstruktur, gestützt auf theoretische Vorüberlegungen, Simulationen und Schnellprozess-Analysen. Die praktische Realisierung der Bauelemente wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Die Analyse und schrittweise Optimierung der Trapezlaser schließlich wird in Kapitel 6 vorgestellt. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

Es lässt sich zusammenfassen, dass im Rahmen dieser Arbeit erstmals die Realisierung eines 14xx-Pumplaser mittels Feststoffquellen-MBE dargestellt wird. Basierend auf dem Konzept des Rippen-Trapezlasers erzielen die untersuchten Bauelemente eine optische Ausgangsleistung von 1 W bei quasi beugungsbegrenztem Strahlverhalten.

Kapitel 2

Phänomenologisches Modell eines Halbleiterlasers

Mit diesem Kapitel sollen zwei Absichten verfolgt werden: Zum einen führt es phänomenologisch auf die wichtigsten bei Halbleiterlasern verwendeten Messgrößen hin, die ihre elektrooptischen, thermischen und spektralen Eigenschaften beschreiben. Zum anderen schafft es eine begriffliche Grundlage, um darauf aufbauend in Kapitel 3 verschiedene Parameter für den Sonderfall des Trapezlasers zu erweitern.

2.1 Erzeugung und Rekombination von Ladungsträgern

Optischer Gewinn entsteht in der aktiven Zone eines Halbleiterlasers durch Rekombination von Elektronen und Löchern bei Energieabgabe in Form von stimulierter Emission. Die dazu benötigten Ladungsträger werden über die elektrischen Kontakte des Bauelements injiziert. Nur ein gewisser Teil, beschrieben durch die interne Quanteneffizienz η_i , rekombiniert tatsächlich im aktiven Bereich; die restlichen Ladungsträger gehen in den dazwischen liegenden Halbleiterschichten durch Grenzflächenrekombination und parasitäre Strompfade verloren.

Der Abbau der Ladungsträger in der aktiven Zone erfolgt strahlend und nichtstrahlend auf verschiedenen Rekombinationspfaden. Die wichtigsten Mechanismen sind hierbei unterhalb der Laserschwelle die spontane Emission sowie die Auger-, Grenzflächen-, Oberflächen- und defektassistierte Rekombination, die alle nichtstrahlend erfolgen [29]. Auch Leckströme über die Barrieren werden zu diesen Verlustmechanismen hinzugezählt [30]. Die Abhängigkeit der Rekombinationsrate R von der Ladungsträgerdichte N im aktiven Bereich lässt sich unterhalb der Laserschwelle gut durch einen polynomialen Zusammenhang beschreiben,

$$R = AN + BN^2 + CN^3 + R_l. \quad (2.1)$$

Dabei skaliert die spontane Emission mit N^2 und wird durch den Rekombinationskoeffizienten B beschrieben. Der kubische Anteil wird durch Auger-Rekombination

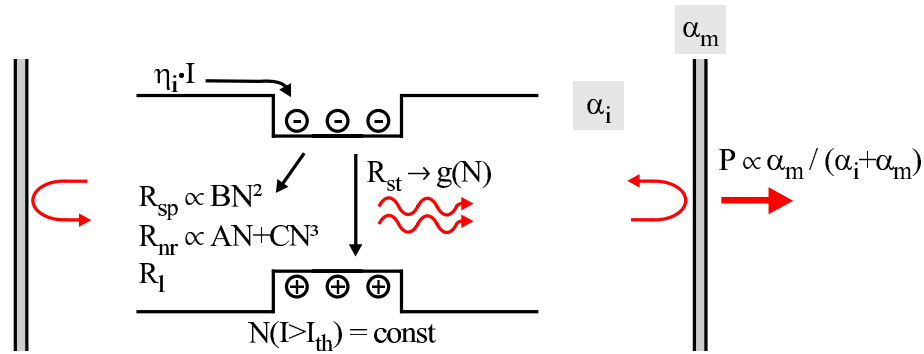


Abbildung 2.1: Modell eines Halbleiterlasers mit vereinfachter Darstellung der wesentlichen Verlustmechanismen. R_{st} beschreibt die Rate der stimulierten Emission, R_{sp} , R_{nr} und R_l bezeichnen die spontane und nichtstrahlende Rekombinationsrate sowie die Leckrate.

verursacht. Die restlichen nichtstrahlenden Verlustmechanismen lassen sich bis auf die Leckrate R_l , die separat betrachtet wird, durch einen linearen Term zusammenfassen.

In modernen InGaAsP-Lasern ist die Schichtqualität so hoch, dass die Grenzflächen- und defektassistierte Rekombination praktisch keinen Einfluss haben [29]. Leckströme können bei Raumtemperatur noch vernachlässigt werden [31]. Damit genügt es, die Koeffizienten B und C zu berücksichtigen. Typische Werte liegen bei $B = 1 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ für die spontane Rekombination [32]. Der Auger-Koeffizient nimmt mit der Wellenlänge zu und bewegt sich bei InGaAsP im Bereich von ca. $2\text{--}8 \cdot 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$ bei $1.3\text{--}1.55 \mu\text{m}$ [32, 33].

Wird der Laser elektrisch gepumpt, dann steigt die Ladungsträgerdichte an, bis die Laserschwelle erreicht ist. Bei höheren Strömen trägt jedes weitere Elektron-Loch-Paar in der aktiven Zone zur stimulierten Emission bei. N bleibt also konstant beim Schwellenwert N_{th} . Die Laserschwelle wird erreicht, wenn die Verstärkung der optischen Mode durch stimulierte Emission gerade die Gesamtverluste kompensiert. Diese setzen sich zusammen aus den internen Verlusten α_i im Halbleitermaterial und den Resonatorverlusten α_m , die durch Auskopplung von optischer Leistung aus den Spiegeln entstehen. Man erhält als Schwellenbedingung

$$\begin{aligned} \Gamma g_{mat} &= \alpha_i + \alpha_m \\ &= \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right), \end{aligned} \quad (2.2)$$

wobei L die Resonatorlänge und R_1 und R_2 die Reflektivitäten der Spiegel kennzeichnen. Verstärkung findet dabei nur in Bereichen statt, in denen die optische Mode mit der aktiven Zone überlappt. Entsprechend ist in Gleichung 2.2 der *modale* Gewinn Γg_{mat} aufgeführt. Dieser ergibt sich aus dem Materialgewinn g_{mat} der aktiven Zone durch Multiplikation mit dem Füllfaktor, d.h. dem Überlapp in vertikaler (y -)Richtung

$$\Gamma = \frac{\int_{-d_z/2}^{d_z/2} |E(y)|^2 dy}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(y)|^2 dy} \quad (2.3)$$

zwischen der optischen Mode und der aktiven Zone mit Dicke d_z . Die Abhängigkeit des Materialgewinns von der Stromdichte lässt sich durch eine logarithmische Beziehung der Form

$$g_{mat} = g_0 \ln \left(\frac{\eta_i J}{J_{tr}} \right) \quad (2.4)$$

mit dem Gewinnparameter g_0 beschreiben, wenn man sich auf Bereiche positiven Gewinns beschränkt [29] und von einer dünnen aktiven Zone ausgeht (vgl. hierzu Kapitel 4.1.2). J_{tr} bezeichnet dabei die Stromdichte, bei der das Material für eine durchlaufende Welle transparent wird. Der Faktor η_i berücksichtigt, dass nur der Bruchteil η_i der Stromdichte J die aktive Zone erreicht und dort zum Gewinn beiträgt. Abbildung 2.1 fasst die aufgeführten Zusammenhänge anschaulich zusammen.

2.2 Elektrooptische Kenndaten

Ein Teil der im Resonator gespeicherten Photonenenergie tritt durch die Spiegel aus und wird damit nutzbar. Die ausgekoppelte optische Leistung hängt oberhalb des Schwellenstroms I_{th} davon ab, welcher Teil des Stroms zur stimulierten Emission beiträgt ($\propto \eta_i$), sowie von der Quantenenergie und dem Verhältnis zwischen internen und Resonatorverlusten. Vernachlässigt man den Beitrag der spontanen Emission zur optischen Ausgangsleistung, erhält man

$$P = \eta_d \frac{hc}{\lambda q} (I - I_{th}) \quad (I > I_{th}) \quad (2.5)$$

Dabei wird

$$\eta_d = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \quad (2.6)$$

als differenzielle Quanteneffizienz bezeichnet. Der Schwellenstrom lässt sich unter Verwendung von Gleichung 2.1 als Funktion der verschiedenen Verlust- und Gewinnparameter schreiben, wenn man eine ebenfalls logarithmische Beziehung $g_{mat}(N) = g_{0,N} \ln(N/N_{tr})$ zwischen Materialgewinn und Ladungsträgerdichte annimmt [29]:

$$I_{th} = \frac{qVBN_{tr}^2}{\eta_i} e^{2(\alpha_i + \alpha_m)/\Gamma g_{0,N}} + \frac{qVCN_{tr}^3}{\eta_i} e^{3(\alpha_i + \alpha_m)/\Gamma g_{0,N}}. \quad (2.7)$$

Der erste Term beschreibt den Anteil der spontanen Rekombination an der Laserschwelle, der zweite den der Auger-Rekombination. V steht für das Volumen der aktiven Zone. Die Transparenzladungsträgerdichte N_{tr} wird erreicht bei der Stromdichte J_{tr} in der aktiven Zone (Gleichung 2.4).

Neben der optischen Leistung ist auch die dafür benötigte elektrische Leistung von Interesse, da sich daraus der elektrooptische Konversionswirkungsgrad

$$\eta = \frac{P}{P_{el}} \quad (2.8)$$

des Bauelements ergibt. Dabei hängt die elektrische Leistung $P_{el} = U \cdot I$ vom Spannungsabfall am Bauelement,

$$U = U_d + U_p + R_s I \quad (2.9)$$

ab. U_d ist die ideale Diodenspannung, die dem Abstand der Quasiferminiveaus entspricht und oberhalb der Schwelle konstant bleibt. U_p beschreibt einen stromunabhängigen Spannungsanteil, der z.B. durch Potenzialspitzen an Heteroübergängen entsteht (siehe Kap. 4.4.2). Die Summe von U_d und U_p an der Schwelle wird als Einsatzspannung des Lasers bezeichnet. Der letzte Term beschreibt den Spannungsabfall aufgrund des ohmschen Serienwiderstands des Bauelements [29].

Beim Entwurf von Hochleistungslasern steht ein möglichst hoher Leistungswirkungsgrad η im Vordergrund. Nach den vorangestellten Überlegungen sind dafür folgende Optimierungen notwendig, die über die Auslegung der Vertikalstruktur steuerbar sind:

- Eine *hohe Kennliniensteigung* wird erreicht durch hohe Injektionseffizienz η_i und niedrige interne Verluste α_i .
- Für eine *niedrige Laserschwelle* werden ein hoher modaler Gewinnparameter $\Gamma \cdot g_{0,N}$, ein hohes η_i , ein niedriges α_i , eine geringe Transparenzladungsträgerdichte N_{tr} und eine geringe Auger-Rekombination $\propto C$ benötigt.
- Ein *geringer Spannungsabfall* lässt sich erzielen durch niedrige parasitäre Spannungen U_p und einen niedrigen Serienwiderstand R_s .

In Kapitel 4 wird diskutiert, wie sich die Vertikalstruktur des Lasers im Hinblick auf diese Punkte optimieren lässt.

Weiterhin kann auch über die Resonatorverluste, d.h. Länge und Verspiegelung des Bauelements, Einfluss auf die Kennliniensteigung und Laserschwelle genommen werden. Hierbei sind konkurrierende Effekte zu beobachten: Höhere Spiegelverluste erhöhen die Kennliniensteigung, zugleich aber auch die Laserschwelle. Zusätzlich muss die Aufheizung durch Verlustleistung berücksichtigt werden. Eine Optimierung des Leistungswirkungsgrads über α_m bezieht sich daher immer auf einen bestimmten Arbeitspunkt des Bauelements [34].

2.3 Temperaturverhalten der Laser

Während der unvollständigen Umwandlung von elektrischer in optische Leistung wird die Differenz $(1 - \eta)P_{el}$ in Wärme umgesetzt. Bei Betrieb des Lasers im Dauerstrich-Betrieb (*cw - continuous wave*) führt dies zu einer Aufheizung der aktiven Zone um

$$\Delta T = (1 - \eta)P_{el} Z_T, \quad (2.10)$$

wobei Z_T der thermische Widerstand zwischen der aktiven Zone und dem nächsten Element konstanter Temperatur (z.B. wassergekühlte Halterung) ist. Dabei kann die Betriebstemperatur der aktiven Zone deutlich über der Umgebungstemperatur liegen. Es ist daher wünschenswert, die Auswirkungen auf die externen Parameter des Bauelements abschätzen zu können.