

Kapitel 1

Einleitung

Die optischen Technologien haben sich seit der ersten Realisierung eines Lasers durch Maiman [Mai60] rasant weiterentwickelt und gelten mittlerweile als Schlüsselkomponenten in vielen Bereichen der Wissenschaft und Technik des 21. Jahrhunderts [OSE98, AOT00].

Strahlquellen auf Basis von Diodenlasern zeichnen sich durch herausragende technologische Eigenschaften aus. Aufgrund ihrer hohen Effizienz von bis zu aktuell 70% [Las04], ihrer kompakten Bauweise und der geringen Herstellungs- und Betriebskosten haben sie sich in vielfältigen Anwendungsgebieten, wie beispielsweise der Materialbearbeitung und der Laser-Messtechnik oder im Bereich der Unterhaltungselektronik (CD und DVD) bewährt. Weitere Vorteile liegen in der großen Verstärkungsbandbreite von typischerweise etwa 30 nm [Fou94] und der hiermit ermöglichten Durchstimmbarkeit sowie in der Modulierbarkeit bis in den GHz-Bereich. Damit eröffnen sich für diese Systeme weite Anwendungsfelder im Bereich der optischen Nachrichtentechnik, der Sensortechnik sowie der Spektroskopie [Dem93].

Seit der Entwicklung der ersten GaAs-Halbleiter-Laser im Jahre 1962 [Hal62, Nat62, Hol62] konnte die Ausgangsleistung immer weiter, bis in den Multiwatt-Bereich, gesteigert werden und es wurden neue Wellenlängen-Bereiche erschlossen. Dazu haben insbesondere neue Materialien und grundlegende Verbesserungen in den Epitaxiestrukturen und -verfahren beigetragen.

Eine oft verwendete Methode zur Steigerung der Ausgangsleistung eines Halbleiter-Lasers ist die Vergrößerung der Emitterfläche. Bei Einstreifenemittern führt dies jedoch mit zunehmender lateraler Verbreiterung zur Strahlfilamentierung und somit zu inhomogenen optischen Leistungsverteilungen im Halbleiter-Material. Dabei treten so genannte *hotspots* auf, die zu einer Degradation des Halbleiter-Materials beitragen und schließlich eine Zerstörung des Halbleiter-Lasers verursachen können. Daher kann die Ausgangsleistung durch Verbreiterung des Emitterstreifens über $200\ \mu\text{m}$ hinaus nicht weiter signifikant

gesteigert werden [Die00].

Höhere optische Ausgangsleistungen sind durch monolithische Integration vieler (20-70) Emittier in so genannten Diodenlaser-Barren erreichbar. Die Einzelemittier sind dabei sowohl optisch als auch elektrisch voneinander getrennt und können mit jeweils moderaten Ausgangsleistungen betrieben werden, wodurch sich die Lebensdauer entscheidend erhöht und Gesamtausgangsleistungen bis 100 W erreicht werden [Dai97a]. Solche Systeme eignen sich aufgrund ihrer Kompaktheit, der hohen Konversionseffizienz von elektrischer zu optischer Energie sowie einer Lebensdauer von bis zu 10.000 h in hervorragender Weise zur optischen Anregung von Festkörper-Laserkristallen und haben blitzlampengepumpte Systeme weitgehend ersetzt [Had95, Bot96].

Die geringe räumliche Strahlqualität mit hohen Beugungsmaßzahlen ($M^2 \gg 1$) schränkt die Anwendung solcher Systeme in der nichtlinearen Optik stark ein. So erfordert beispielsweise die Frequenzkonversion oder das Pumpen von optisch parametrischen Oszillatoren (OPO's) eine exzellente räumliche Strahlqualität, um möglichst hohe Intensitäten und somit Konversionswirkungsgrade zu erzielen [Die00]. Des Weiteren werden auch für die direkte Materialbearbeitung und *free-space* Kommunikation Strahlquellen mit hervorragender räumlicher Strahlqualität benötigt [Loo95, Lam95].

Eine sehr gute Strahlqualität ($M^2 \leq 1,5$) bei gleichzeitig hohen Ausgangsleistungen bieten die so genannten Trapezlaser bzw. Trapezverstärker. Bei diesen Komponenten weitet sich die aktive Zone in lateraler Richtung mit Zunahme der optischen Leistung von einer anfangs streifenförmigen Geometrie trapezförmig auf, um so die optische Leistungsdichte während der Verstärkung zu begrenzen. Dies verhindert eine signifikante Degradation der räumlichen Strahlqualität sowie eine Zerstörung der Austrittsfläche. Der Trapezwinkel wird dabei dem Beugungswinkel beim Übergang vom Einstreifen-Wellenleiter in die Trapezzone angepasst und beträgt typischerweise 6° . Somit verbreitert sich die aktive Zone solcher Komponenten lateral entlang der Ausbreitungsrichtung von anfangs wenigen Mikrometern bis zu mehreren $100 \mu\text{m}$.

Seit Mitte der 90er Jahre [Meh94] finden solche Trapezverstärker zunehmend in Oszillator-Verstärker-Systemen Verwendung wobei die in den Hochleistungstrapezverstärker injizierte Strahlung des Oszillators unter Erhaltung der hohen spektralen und räumlichen Strahlgüte verstärkt wird. Somit werden hohe räumlich-spektrale Leistungsdichten bei Ausgangsleistungen bis zu 5 W erreicht [Hag98]. Aufgrund dieser Eigenschaften besitzen solche Systeme ein hohes Potential im Bereich der nichtlinearen Optik, um mittels Frequenzkonversion spektrale Bereiche zu erschließen, in denen Halbleiter-Laser nicht direkt emittieren bzw. bei der Direktmission keine hohen Leistungen erreicht werden können [Wol01].

Die im Rahmen dieser Arbeit realisierten und untersuchten Diodenlaser Oszillator-Verstärker-Systeme (*Master-Oscillator Power-Amplifier*, MOPA) im Materialsystem InGaAs emittieren im Wellenlängenbereich um 920 nm. Durch die nichtlineare Frequenzverdopplung kann somit Laserstrahlung im blauen Spektralbereich nahe 460 nm erzeugt werden. Direkt emittierende Diodenlaser in diesem Wellenlängenbereich auf Gallium-Nitrid-Basis [Nak00] sind zwar mittlerweile kommerziell erhältlich [Top04], allerdings ist deren optische Ausgangsleistung auf wenige 10 mW beschränkt. Wesentlich höhere optische Leistungen im sichtbaren Spektralbereich werden durch nichtlineare Frequenzkonversion infraroter Strahlung erzielt. Laser-Systeme in diesem Spektralbereich eignen sich z.B. für die Laserkühlung [Hän75], *fast DNA screening* [OSE98], die holographische Datenspeicherung [Bie01], die Drucktechnik [Goy99] und die Displaytechnologie [Ruf99].

Der Konversionswirkungsgrad nichtlinearer Prozesse ist in hohem Maße Intensitätsabhängig. Neben der örtlichen Steigerung der Intensität aufgrund einer sehr guten Strahlqualität und somit Fokussierbarkeit lassen sich bei moderaten mittleren Ausgangsleistungen hohe Spitzenintensitäten erzeugen, indem die Strahlung im Form von kurzen Impulsen emittiert wird. Mit aktiver Modenkopplung durch die Modulation der Verstärkung lassen sich in Diodenlasern Impulse im Pikosekundenbereich erzeugen.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Charakterisierung von neuartigen Hochleistungs-Trapez-Verstärkern verschiedener Geometrien und Hersteller bezüglich der räumlichen Strahlqualität, des Sättigungsverhaltens sowie der Ausgangsleistung. Des Weiteren werden die zeitlichen und spektralen Eigenschaften der erzeugten und verstärkten Pikosekundenimpulse insbesondere im Hinblick auf die effiziente Frequenzkonversion in den sichtbaren Spektralbereich untersucht. Die bisher höchste durch Frequenzkonversion von modengekoppelter Strahlung aus Diodenlaser MOPA-Systemen erreichte optische Leistung im blauen Spektralbereich beträgt 250 mW [Wol02].

Im Gegensatz zu der Verstärkung von kontinuierlicher Strahlung, bei der die spektralen Eigenschaften der injizierten Oszillatorstrahlung erhalten bleiben, werden die zeitlichen und spektralen Eigenschaften bei der Verstärkung von Impulsen signifikant modifiziert. Die Kopplung von Ladungsträgerdichte und Brechungsindex verursacht während der Verstärkung nichtlineare Phasenänderungen, die mit dynamischen Frequenzänderungen einhergehen. Die experimentelle Messung und Analyse dieser Änderungen sowie deren Auswirkungen im Hinblick auf eine effiziente Frequenzkonversion in den sichtbaren Spektralbereich sind ein Schwerpunkt dieser Arbeit.

Die vollständige Charakterisierung der verstärkten Impulse beinhaltet die Untersuchung, wie die einzelnen Systemparameter Amplitude und Phase der verstärkten Impulse sowohl zeitlich als auch spektral verändern. Anhand dieser Messungen sollen Systemparameter

identifiziert werden, welche die Erzeugung optimaler Impulse für die Frequenzkonversion ermöglichen.

Die Analyse der Impulse erfolgt mit der Methode des *Frequency Resolved Optical Gating (FROG)* [Tre97]. Hierbei werden die Impulse durch spektrale Auflösung der Autokorrelation zeitlich-spektral erfasst. Anhand der gemessenen Spektrogramme lassen sich Amplitude und Phase der Impulse eindeutig rekonstruieren. Die mit dieser Methode gemessene maximale Impulsdauer betrug bisher 2 ps mit einer spektralen Breite von 12 nm [Ric97]. Für die messtechnische Erfassung dieser Impulse genügt ein Auflösungsvermögen von 1 nm. Kommerziell erhältliche Messgeräte sind ausschließlich zur Analyse von spektral breitbandigen Impulsen ≥ 1 nm konzipiert und besitzen ein maximales Auflösungsvermögen von 0,1 nm [Pho05]. Impulse aus modengekoppelten Diodenlaser MOPA-Systemen haben jedoch typische Impulsdauern von wenigen zehn Pikosekunden mit spektralen Breiten um 0,1 nm und stellen somit wesentlich höhere Anforderungen an die spektrale Auflösung und den zeitlichen Abtastbereich des Messsystems.

Zusammenfassend besteht das Ziel dieser Arbeit in der erstmaligen Erfassung der vollständigen Impulseigenschaften eines modengekoppelten Diodenlaser Oszillator-Verstärker-Systems durch Bestimmung von Amplitude und Phase der Impulse. Der Einfluss einzelner Systemkomponenten und -parameter wird insbesondere im Hinblick auf eine effiziente Frequenzverdopplung in den blauen Spektralbereich eingehend analysiert. Die durch diese Messungen gewonnenen Informationen über den Verlauf von Amplitude und Phase innerhalb der verstärkten Impulse liefern zudem wichtige Beiträge zur Überprüfung theoretischer Modelle und tragen somit zu einem besseren Verständnis der physikalischen Prozesse im Halbleitermaterial bei.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen an Hochleistungs-Diodenlaser Oszillator-Verstärker-Systemen (MOPA) im Materialsystem InGaAs durchgeführt. Halbleiterlaser dieses Materialsystems emittieren Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich von 800 - 1100 nm [Die00]. Die MOPA-Systeme bestehen aus mehreren verschiedenen Halbleiterkomponenten, deren Bauformen und physikalische Eigenschaften in Abschnitt 2.1 beschrieben werden. Diese Laser-Systeme konnten sowohl im kontinuierlichen Modus (cw, *continuous wave*), als auch modengekoppelt betrieben werden. Die Erzeugung von Impulsen durch das Verfahren der aktiven Modenkopplung wird in Abschnitt 2.2 erläutert. Abschließend werden in Abschnitt 2.3 die theoretischen Grundlagen der nichtlinearen Optik sowie Verfahren zur effizienten Frequenzkonversion in den sichtbaren Spektralbereich beschrieben. Dabei werden vor allem die bei der Frequenzkonversion von Impulsen dominanten physikalischen Effekte erläutert.

2.1 Physikalische Grundlagen der Halbleiter-Laser

Halbleiter sind Festkörpermaterialien, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen derjenigen von Metallen und Isolatoren liegt. Durch die periodische Kristallstruktur dieser Materialien entstehen Energiebänder mit erlaubten Zuständen, aber auch Bandlücken in denen keine Energiezustände für Elektronen existieren. Ein wichtiges Charakteristikum eines Halbleiters ist seine Energiebandlücke E_g zwischen dem obersten besetzten Energieniveau im Valenzband und dem untersten unbesetzten Energieniveau im Leitungsband. Diese Bandlückenenergie liegt bei gängigen Halbleitern zwischen 0,1 eV und 3 eV (s. Anhang A). Damit wird der gesamte Spektralbereich vom Infrarot bis zum nahen UV abgedeckt. Die halbleitende Eigenschaft beruht auf der Anregung von Elektronen aus dem Valenzband über die Bandlücke hinweg in das Leitungsband. In diesem Band können sich die

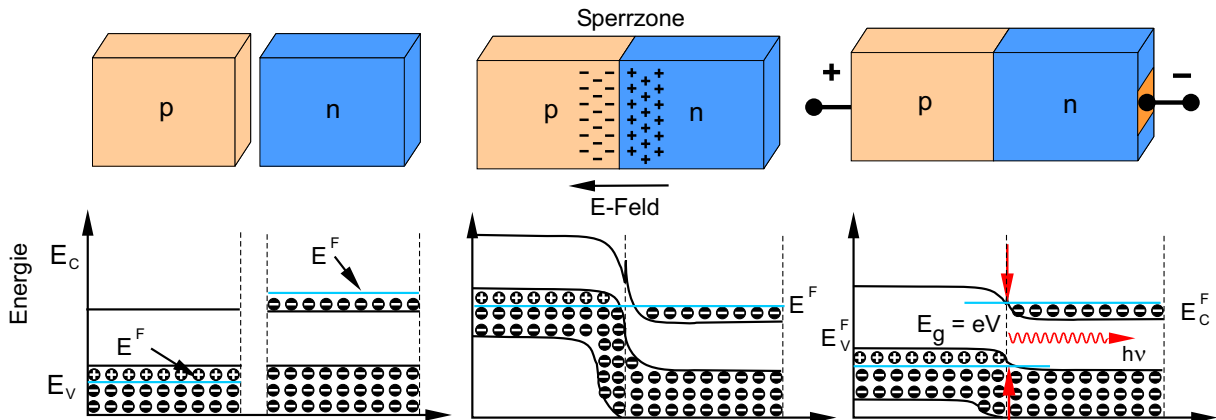


Abbildung 2.1: p-n-Übergang: Ohne Kontakt ist in den p- und n-dotierten Materialien die Lage der Fermi-niveaus unterschiedlich (links). Eine Kontaktierung führt zur Angleichung der Fermi-niveaus (Mitte). Das Anlegen einer Spannung führt zu einer Aufspaltung in die Quasi-Fermi-niveaus E_C^F und E_V^F (rechts).

Elektronen nahezu frei bewegen und somit zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen. Die thermische Anregung sowie die Anregung von Elektronen durch elektromagnetische Strahlung stellen die am häufigsten genutzten Möglichkeiten dar. Ferner kann durch gezielte Dotierung mit Fremdatomen, den so genannten Donatoren (n-Dotierung) und Akzeptoren (p-Dotierung), die elektrische Leitfähigkeit des Halbleiters über mehrere Größenordnungen gezielt eingestellt werden.

Die n-Dotierung erfolgt bei einem Wirtskristall aus Atomen der IV. chemischen Hauptgruppe durch das Einbringen von Fremdatomen der V. Gruppe mit 5 Valenzelektronen. Somit steht das überschüssige Elektron, welches für die kovalente Bindung im Wirtsgitter nicht benötigt wird, durch eine geringe Energiezufuhr dem Leitungsband zum Ladungstransport zur Verfügung. Bei der Dotierung mit Atomen der III. Gruppe, welche nur 3 Valenzelektronen besitzen, sog. Akzeptoren, erfolgt der Ladungstransport durch Löcher.

Bringt man einen p-dotierten und einen n-dotierten Halbleiter in Kontakt, so führt dies zu einem Diffusions-Strom von Elektronen aus dem n-dotierten in den p-dotierten Bereich. Gleichzeitig diffundieren Löcher in die umgekehrte Richtung (Abb. 2.1 Mitte).

Ohne äußere Potentialdifferenz führt die Ladungsträgerdiffusion zu einer Angleichung der Fermi-niveaus der unterschiedlich dotierten Halbleiter zu einem gemeinsamen Fermi-niveau E^F .

Liegt an dem p-n-Übergang eine elektrische Spannung in Durchlassrichtung an, so führt dies zu einer Aufspaltung des gemeinsamen Fermi-niveaus in zwei Quasi-Fermi-niveaus E_C^F

und E_V^F . Dadurch wird die Potentialbarriere erniedrigt und es fließt ein Strom von Elektronen aus der n-Region bzw. ein Strom von Löchern aus der p-Region in den p-n-Übergang, in dem diese rekombinieren. Die Quasi-Ferminiveaus liegen dann innerhalb des Leitungs- bzw. Valenzbandes, d.h. es liegt eine Besetzungsinversion vor.

Die Lichtemission in Halbleitern erfolgt aus der Übergangszone zwischen n-dotiertem und p-dotiertem Bereich durch eine strahlende Rekombination von Elektronen aus dem Leitungsband und Löchern aus dem Valenzband. Die Wellenlänge der emittierten Strahlung wird durch die Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband eingeschränkt.

$$E_g \leq h\nu \leq E_C^F - E_V^F \quad (2.1)$$

mit

- E_g = Energielücke zwischen den Bändern
- ν = Frequenz des emittierten Lichts
- h = plancksches Wirkungsquantum
- E_C^F = Quasi-Ferminiveau des Leitungsbandes
- E_V^F = Quasi-Ferminiveau des Valenzbandes

Von großer Bedeutung für die Optoelektronik sind die so genannten III-V Verbindungshalbleiter (siehe Anhang A, Abb. A.1) ¹. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass das Leitungsbandminimum wie das Valenzbandmaximum im Impulsraum an der gleichen Stelle lokalisiert sind. Halbleiter, in denen Elektronen ohne eine Änderung ihres Impulses, d.h. ohne phononische Streuprozesse, die Bandlücke überwinden können, werden als direkte Halbleiter bezeichnet. Für optoelektronische Anwendungen eignen sich direkte Halbleiter ausgezeichnet, da keine Wechselwirkung mit Phononen benötigt wird und die Übergangswahrscheinlichkeit für strahlende Rekombination um ca. drei Größenordnungen höher ist im Vergleich zu einem indirekten Halbleiter [Gro77].

In dem verwendeten Materialsystem InGaAs beträgt die Bandlücke $E_g = 1,34$ eV. Die Emissionswellenlänge von Diodenlasern aus diesem Materialsystem lässt sich durch Änderung des Indium-Gehalts über einen Bereich von etwa 800 bis 1080 nm einstellen.

¹Wie die meisten III-V Halbleiter kristallisieren auch die hier verwendeten ternären Verbindungshalbleiter InGaAs in der Zinkblendestruktur (siehe Anhang A, Abb. A.2). Diese besteht aus zwei um ein Viertel der Raumdiagonalen gegeneinander verschobenen kubisch flächenzentrierten Gittern (face center cubic, fcc). Atome der Gruppe III besetzen dabei das eine Untergitter, während das andere ausschließlich von Atomen der Gruppe V besetzt ist.

2.1.1 Vertikale Struktur

Bei den ersten Halbleiter-Lasern besaßen die für den p-n-Übergang verwendeten Materialien, mit Ausnahme der Dotierung, die gleiche Zusammensetzung (sog. *homojunctions*). Bei diesen Typen verhinderte die sehr hohe Schwellstromdichte bei Raumtemperatur einen kontinuierlichen Betrieb. Die Schwellstromdichte gibt die Stromdichte an, bei der die Lasertätigkeit einsetzt und das breite Spektrum der Spontanemission in ein schmales Spektrum kondensiert. Oberhalb der Schwelle ist die Strahlung auch wesentlich stärker räumlich gerichtet. Für GaAs beträgt die Schwellstromdichte bei Raumtemperatur beispielsweise 100 kA/cm^2 . Um die Schwellstromdichte herabzusetzen, wurden Konzepte entwickelt, um die Ladungsträgerkonzentration innerhalb der aktiven Schicht zu erhöhen.

Dies wird durch die so genannte *Doppel-Heterostruktur* (Abb. 2.2) erreicht. Sie besteht aus einer Schichtstruktur mit zwei Übergängen aus verschiedenen Materialien. Dies führt zur Ausbildung von Potentialbarrieren sowohl für die injizierten Elektronen als auch für die Löcher, so dass ein Diffundieren über die aktive Zone hinaus verhindert wird. Da die Konzentration innerhalb der aktiven Schicht stark erhöht wird, hat dies eine drastische Reduktion der Laserschwelle um zwei Größenordnungen gegenüber der Homo-Struktur zur Folge [Kne95]. Zudem kann diese Schicht-Struktur zur Ausbildung eines dielektrischen Wellenleiters (typ. $0,5 \mu\text{m}$) genutzt werden, wodurch die vertikale Ausdehnung der Laserintensität eng begrenzt wird.

Eine weitere Reduktion der Schwellstromdichte um einen Faktor 2-3 wird durch spezielle **Quantenfilm-Strukturen** erreicht. Bei diesen Halbleiter-Strukturen ist die Dicke der aktiven Schicht ($< 30 \text{ nm}$) in der Größenordnung der de-Broglie-Wellenlänge der Elektronen, und die injizierten Ladungsträger erfahren Quanteneffekte ähnlich einem Teilchen im Potentialtopf. Diese Halbleiterlaser zeichnen sich weiterhin durch eine geringe Temperaturabhängigkeit des Schwellstromes und eine hohe Lebensdauer von $> 10^5 \text{ h}$ aus [Kne95].

2.1.2 Laterale Struktur

Um die aktive Zone auch in lateraler Richtung zu begrenzen und somit die Ladungsträgerkonzentration weiter zu erhöhen, wird die wirksame Elektrodenfläche auf der Oberseite auf einen streifenförmigen Bereich von unter $10 \mu\text{m}$ Breite begrenzt. Daraus resultiert ein gewinngeführter (*gain-guiding*) Diodenlaser, der die Laseremission im Grundmode ermöglicht.

Eine weitere Verbesserung der optischen Wellenführung wird durch elektrisch sperrende Schichten seitlich des aktiven Bereiches erzielt. Somit wird der elektrische Stromfluss auf