



Harry Fuchs

**Spektral hochaufgelöste Untersuchung von
Pikosekundenimpulsen aus modengekoppelten
Hochleistungsdiodenlaser Oszillator-
Verstärker-Systemen mit der Methode des
Frequency Resolved Optical Gating**

**Spektral hochaufgelöste Untersuchung von
Pikosekundenimpulsen aus modengekoppelten
Hochleistungsdiodenlaser Oszillator-
Verstärker-Systemen mit der Methode des
Frequency Resolved Optical Gating**

Harry Fuchs

Dissertation

D386

Vom Fachbereich Physik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
„Doktor der Naturwissenschaften“
genehmigte Dissertation

Betreuer: Prof. Dr. Richard Wallenstein
Zweitgutachter: Prof. Dr. René Beigang

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 02.09.2005

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2005

Zugl.: (TU) Kaiserslautern, Univ., Diss., 2005

ISBN 3-86537-682-7

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2005

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2005

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-682-7

Für Anikó, Lennard und Henry

Abstract

Spectral high resolution investigation of picosecond pulses from mode-locked high-power diode-laser master-oscillator power-amplifier systems with the method of Frequency Resolved Optical Gating.

The aim of this work was the investigation of the temporal, spectral and spatial properties of mode-locked radiation, emitted by high-power diode-laser master-oscillator power-amplifier (MOPA) systems. These diode-laser systems are of special interest as a basis for compact sources of visible laser radiation based on efficient frequency conversion in periodically poled nonlinear optical crystals with quasi-phase matching.

The used MOPA-systems typically consist of three stages: One single stripe oscillator, followed by a single stripe preamplifier and finally a high-power-amplifier. These high-power-amplifiers with a tapered geometry of the active area are the key components of the MOPA systems. The temporal, spectral and spatial quality of their emitted radiation depends critically on both, the amplifier geometry and the operation conditions of the MOPA system. In order to identify an optimal amplifier geometry, detailed investigations of the spatial and spectral beam quality of different tapered amplifier structures were carried out. In the course of these investigations, a diode-laser MOPA system was demonstrated, emitting continuous near-infrared radiation with average output powers up to 3.4 W, containing as much as 75 % of the total optical power in a diffraction-limited beam.

The generated powerful laser radiation of high spatial quality is well suited for nonlinear frequency conversion. This was demonstrated by frequency-doubling the infrared output power of the MOPA-system in a 30 mm long periodically poled crystal of potassium titanyl phosphat (pp-KTP). In this configuration as much as 370 mW of continuous blue laser radiation at 460 nm were generated, corresponding to a conversion slope efficiency of 3.2 %/W or a conversion efficiency of 10.9 %. This is the highest power in the blue spectral range achieved by single-pass frequency-doubling of radiation, emitted by a continuous wave diode laser system.

However, a further improvement in the conversion efficiency can be achieved by frequency doubling ultrashort optical pulses with high peak powers. In order to generate mode-locking picosecond pulses, the injection current of the diode laser oscillator was modulated with a radio-frequency-signal (RF). The RF frequency was adapted to the round-trip time of the external cavity. The generated picosecond pulses were amplified in a two-stage amplifier-system yielding mode locked radiation with average output powers in the multi-watt regime.

The amplification of picosecond pulses in semiconductor optical amplifiers, however, changes the tempo-spectral properties of the radiation. The strong coupling between charge carrier density and refractive index causes nonlinear phase changes during the amplification, resulting in dyna-

mic frequency changes. The main goal of this thesis was the complete characterization of the amplified pulses. The most important point was to determine the influence of individual system parameters on amplitude and phase of the amplified optical pulses. An established method to characterize the temporal and spectral properties of ultrashort pulses is the method of Frequency Resolved Optical Gating. With this method the pulses are resolved in a two-dimensional spectrogram by spectral resolution of the autocorrelation. On the basis of the measured spectrogram, amplitude and phase of the pulses can be reconstructed. In this work a picosecond diode-laser MOPA-system, with typical spectral widths even in the range of 0.1 nm and pulse durations of more than 10 ps was examined in detail for the first time. The temporal scanning range was as large as 80 ps, whereas the spectral resolution was less than 2 GHz. Both temporal scanning range and spectral resolution are two orders of magnitude higher than in any previous FROG systems.

In the course of the investigations the influence of individual amplifier components on amplitude and phase of the amplified pulses was experimentally characterized for the first time. The measurements show an increasing asymmetry in the temporal amplitude shape at higher output power levels, i.e. a steep leading edge and a flat trailing edge of the pulse. These effects can be attributed to substantial gain depletion in the amplification stages. In addition the temporal phase changed from a parabolic to a cubic shape, with increasing saturation in the amplifier. The FROG analysis of systematically varied system parameters made it possible to identify optimal parameters for the amplification of picosecond pulses in diode laser amplifiers with minimal degradation of the tempo-spectral pulse quality.

Mode-locked 19 ps pulses with an average power of 2.7 W at a repetition rate of 4.3 GHz were generated with optimal spectral and temporal properties. By single-pass frequency-doubling of these pulses in a 20 mm long pp-KTP crystal, as much as 550 mW of blue laser radiation at 460 nm was generated, corresponding to a conversion slope efficiency of 7.6 %/W and a conversion efficiency of 20.3 %. To date, this is the highest power in the blue spectral range generated by single-pass frequency-doubling of a diode-laser MOPA-system. The diode laser system with subsequent frequency conversion, demonstrated and characterized in the present work, is a powerful, compact, and efficient source of visible radiation with a high spatial, temporal and spectral quality. The results of this work show the potential of such systems for numerous applications and point the way to increase the visible output power into the Watt region.

The experimentally achieved information on amplitude and phase of the amplified pulses have contributed substantially to a better comprehension of the physical processes inside the active semiconductor components. This allows a systematic optimization of the used semiconductor elements. Furthermore, theoretical models can be examined by the detailed experimental results, measured with high spectral resolution.

Publikationen

Zeitschriftenbeiträge

1. A. Robertson, H. Fuchs, U. Ernst, and R. Wallenstein, Universität Kaiserslautern, Germany, V. Scheuer and T. Tschudi, Institut für Angewandte Physik, Technische Hochschule Darmstadt, „*Prismless femtosecond Cr:forsterite laser*”, J. Opt. Soc. Am. B, vol. **17**, No. 4 April 2000.
2. O. Casel, H. Fuchs, M. A. Tremont, D. Woll and R. Wallenstein, Technische Universität Kaiserslautern, „*Broadband InGaAs tapered diode laser sources for optical coherence radar and coherence tomography*”, Appl. Phys. Lett., vol. **86**, No. 191101, April 2005.
3. D. Woll, M. A. Tremont, H. Fuchs, O. Casel, and R. Wallenstein, Technische Universität Kaiserslautern, „*Intensity-modulated blue light generated by frequency doubling of wavelength-modulated high-power diode-laser radiation*”, Appl. Phys. Lett., vol. **86**, No. 151101, April 2005.
4. O. Casel, D. Woll, M. A. Tremont, H. Fuchs, R. Wallenstein, Technische Universität Kaiserslautern, E. Gerster, P. Unger, Universität Ulm, M. Weyers, M. Zorn, Ferdinand-Braun-Institut, Berlin „*Blue 498 nm picosecond pulses generated by intracavity frequency doubling in a passively mode-locked optically pumped semiconductor disk laser*”, zur Veröffentlichung eingereicht bei Appl. Phys. B, April 2005.

Internationale Tagungsbeiträge

1. M.A. Tremont, H. Fuchs, O. Casel, and R. Wallenstein, „*Compact visible laser systems based on frequency doubled diodes*”, LEOS 2002 invited paper, vol. **2**, p. 442, 2002.
2. S. Zelt, H. Fuchs, J.-P. Meyn, and R. Wallenstein, „*Efficient generation of blue light by second harmonic generation in MgO doped near-stoichiometric LiTaO₃*”, in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America Washington D. C., 2003)
01.06.-06.06.2003 in Baltimore, Maryland, USA.

3. M.A. Tremont, H. Fuchs, O. Casel, and R. Wallenstein, „*Investigation of active mode-locking of a DBR-diode laser in an external resonator*”, in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America Washington D. C., 2004), Paper CThL5
16.05.-21.05.2004 in San Francisco, California, USA.
4. O. Casel, H. Fuchs, M.A. Tremont, and R. Wallenstein, „*Multi-watt cw broadband light sources for optical coherence radar and coherence tomography based on InGaAs tapered laser amplifiers*”, in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America Washington D. C., 2004), Paper CMJ3
16.05.-21.05.2004 in San Francisco, California, USA.
5. H. Fuchs, O. Casel, M.A. Tremont, L. Frieß and R. Wallenstein, „*Amplitude and phase measurement of 20 ps pulses from a mode-locked high-power InGaAs diode laser MOPA system using frequency-resolved optical gating*”, in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America Washington D. C., 2004), Paper CTuP9
16.05.-21.05.2004 in San Francisco, California, USA.

Nationale Tagungsbeiträge

1. H. Fuchs, A. Robertson, U. Ernst, M.A. Tremont, R. Wallenstein, Universität Kaiserslautern, V. Scheuer T. Tschudi Institut für Angewandte Physik, Technische Hochschule Darmstadt, „*Kompakter KLM Cr^{4+} : Forsterit Femtosekundenlaser mit GTI-Spiegeln zur Dispersionskompensation*”, DPG Frühjahrstagung Berlin, 2001.
2. S. Zelt, H. Fuchs, J.-P. Meyn, and R. Wallenstein, „*Periodische Domäneninversion in $MgO: LiTaO_3$ zur Erzeugung von blauer 455 nm Strahlung*”, DPG Frühjahrstagung Hannover, 2003.
3. O. Casel, M.A. Tremont, H. Fuchs, and R. Wallenstein, „*Resonatorinterne Frequenzverdopplung von optisch angeregten InGaAs Halbleiterscheibenlasern in den blau-grünen Spektralbereich*”, DPG Frühjahrstagung München, 2004.

Sonstige Veröffentlichungen

1. R. Wallenstein, H. Fuchs, A. Robertson, U. Ernst, M.A. Tremont, Abschlusspräsentation des BMBF- Verbundprojektes „ *Grundlegende Untersuchungen zu neuen Konzepten für Ultrakurzpuls-Laser, Teilvorhaben: Diodengepumpte durchstimmbare Femtosekunden-Lasersysteme*“, 27.03.2001 Freiburg i. Brsg.
2. H. Fuchs, A. Robertson, U. Ernst, R. Knappe, R. Wallenstein, Abschlussbericht BMBF-Projekt „*Grundlegende Untersuchungen zu neuen Konzepten für Ultrakurzpuls -Laser, Teilvorhaben: Diodengepumpte durchstimmbare Femtosekunden- Lasersysteme*“, FKZ 13 N 7209/ 0, Juni 2001.
3. M.A. Tremont, H. Fuchs, O. Casel, P. Haag, R. Wallenstein, Abschlusspräsentation des BMBF Verbundprojektes „ *MISTRAL, Teilvorhaben: Erforschung von neuen Konzepten für miniaturisierte Strahlquellen aus Hochleistungshalbleiterlasern für den sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich*“, 27.01.2004 Regensburg.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Physikalische Grundlagen der Halbleiter-Laser	5
2.1.1	Vertikale Struktur	8
2.1.2	Laterale Struktur	8
2.1.3	Theorie der Halbleiter-Verstärker	11
2.2	Erzeugung Ultrakurzer Lichtimpulse	15
2.2.1	Prinzip der Modenkopplung	15
2.2.2	Aktive Modenkopplung in Diodenlasern	18
2.3	Nichtlineare Optik	20
2.3.1	Polarisation	20
2.3.2	Frequenzverdopplung	21
2.3.3	Die gekoppelten Amplitudengleichungen	22
2.3.4	Phasenanpassung durch Doppelbrechung	25
2.3.5	Quasiphasenanpassung	27
2.3.6	Physikalische Eigenschaften von KTP	28
2.3.7	Frequenzverdopplung mit gaußschen Strahlen	30
2.3.8	Frequenzkonversion ultrakurzer Lichtimpulse in dispersiven Medien	32
3	Untersuchung im kontinuierlichen Betrieb	35
3.1	Einstreifen- Diodenlaser in Littrow-Anordnung	36
3.2	Charakteristik des Einstreifenverstärkers	41
3.3	Untersuchung der verwendeten Hochleistungsverstärker	44
3.3.1	Leistungskennlinien	44
3.3.2	Spektrales ASE- und Verstärkungsprofil	48
3.3.3	Räumliche Strahlqualität	52
3.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	56

4	Erzeugung von Impulsen in Hochleistungsdiodenlaser MOPA Systemen	59
4.1	Modengekoppelter Oszillator in Littrow-Anordnung	60
4.2	Verstärkung in den Multiwatt-Bereich	63
5	Methoden zur Charakterisierung von Impulsen	67
5.1	Grenzen herkömmlicher Verfahren	68
5.2	Theoretische Grundlagen von FROG	70
5.2.1	Beschreibung von Impulsen durch Spektrogramme	70
5.2.2	Die Methode des Frequency Resolved Optical Gatings	71
5.2.3	Experimentelle Erzeugung von FROG-Signalen	72
5.2.4	Methoden für <i>multishot</i> -Aufbauten	74
5.2.5	Rekonstruktion des E-Feldes	81
5.2.6	Algorithmen zur Auswertung von FROG-Signalen	84
5.2.7	Optimale Abtastrate zur Aufnahme von FROG-Signalen	85
6	Experimentelle Erzeugung der Spektrogramme	87
6.1	Impulsabtastung durch Überlagerung	87
6.2	Erzeugung der zweiten Harmonischen	88
6.3	Detektion des FROG-Signals	89
6.3.1	Das Spektrometerkonzept	90
6.3.2	Experimentelle Realisierung des Spektrometers	92
6.3.3	Kalibrierung des Spektrometers	93
6.3.4	Experimentelle Bestimmung des Auflösungsvermögens	94
6.3.5	Aufnahme des Spektrogramms	95
6.3.6	Übersichtsdarstellung des realisierten FROG-Aufbaus	97
7	Experimentelle Ergebnisse bei unterschiedlichen Systemparametern	99
7.1	Variation der Impulsform	103
7.1.1	Modulationsfrequenz 4,304 GHz	104
7.1.2	Modulationsfrequenz 4,307 GHz	108
7.1.3	Modulationsfrequenz 4,29 GHz	112
7.2	Kalibrierung durch Streakkamera-Messung	115
7.3	Einfluss des Trapezverstärker-Stromes	117
7.4	Einfluss der Eingangsleistung	121
7.5	Einfluss des Vorverstärkers	125
7.6	Einfluss der Repetitionsrate	129
7.7	Impulse eines DBR-Oszillators	138
7.8	Zusammenfassende Interpretation der FROG-Messungen	142

8	Frequenzverdopplung mit Diodenlaser-MOPA-Systemen	147
8.1	Frequenzverdopplung kontinuierlicher Strahlung	148
8.1.1	Experimenteller Aufbau des MOPA-Systems	148
8.1.2	Ergebnisse im kontinuierlichen Betrieb	150
8.2	Frequenzverdopplung modengekoppelter Strahlung	152
8.2.1	Experimenteller Aufbau des MOPA-Systems	152
8.2.2	Optimierung der Systemparameter	152
8.2.3	Ergebnisse im modengekoppelten Betrieb	154
8.2.4	Zusammenfassung und Ausblick	155
9	Zusammenfassung	157
A	III-V Halbleiter	161
B	KTP-Sellmeierkoeffizienten	163
C	KNbO₃ Kristallparameter	165
	Literaturverzeichnis	167

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 μm 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 μm .

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 in 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 Festkörpermateriale, 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

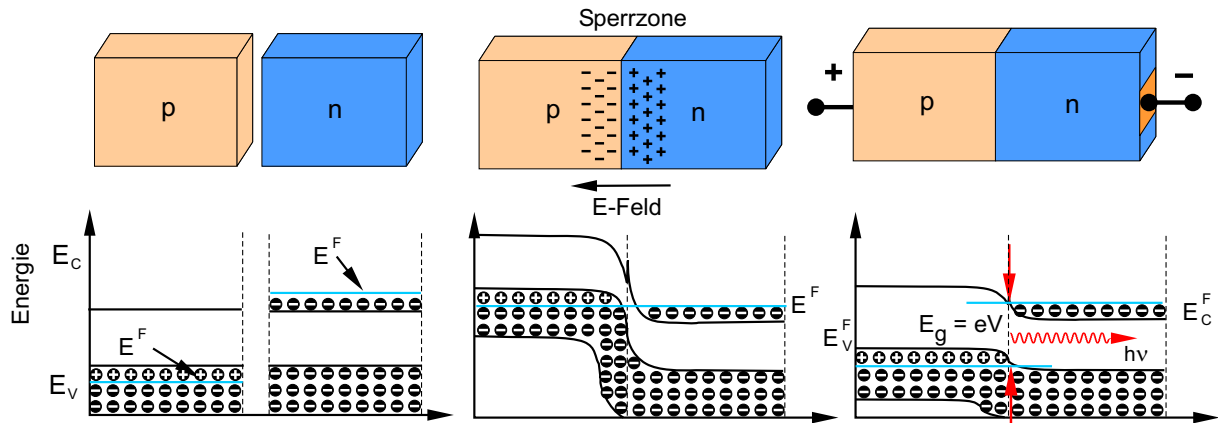


Abbildung 2.1: p-n-Übergang: Ohne Kontakt ist in den p- und n-dotierten Materialien die Lage der Fermi-niveaus unterschiedlich (links). Eine Kontaktierung führt zur Angleichung der Fermi-niveaus (Mitte). Das Anlegen einer Spannung führt zu einer Aufspaltung in die Quasi-Fermi-niveaus E_C^F und E_V^F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