Christian Theobald

Diodengepumpte Ultrakurzpuls-Strahlquellen zur Erzeugung von Pikosekunden-Impulszügen hoher mittlerer Leistung und Energie durch gütegeschaltete Modenkopplung

Cuvillier Verlag Göttingen

Diodengepumpte Ultrakurzpuls-Strahlquellen zur Erzeugung von Pikosekunden-Impulszügen hoher mittlerer Leistung und Energie durch gütegeschaltete Modenkopplung

Dissertation

Christian Theobald

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: 23.05.2007

D 386

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, 2007
Zugl.: (TU) Kaiserslautern, Univ., Diss., 2007

978-3-86727-278-0

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2007
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, 2007
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-278-0

Kurzzusammenfassung

Diodengepumpte Ultrakurzpuls-Strahlquellen zur Erzeugung von Pikosekunden-Impulszügen hoher mittlerer Leistung und Energie durch gütegeschaltete Modenkopplung

Neuere Untersuchungen zur Präzisionsbearbeitung von Metallen haben gezeigt, dass durch die Verwendung von Lasersystemen mit Impulsdauern im Bereich von 10 ps hinsichtlich der Bearbeitungsqualität sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Gegenüber den bisher eingesetzten fs-Systemen haben die ps-Laser den Vorteil, dass sie deutlich höhere mittlere Ausgangsleistungen liefern. Daneben können sie erheblich einfacher, robuster und kostengünstiger aufgebaut werden. Um die für bestimmte Anwendungen sehr hohen Anforderungen an die Qualität der bearbeiteten Oberflächen und Kanten zu erfüllen, sollte die Energie der Laserimpulse nur knapp oberhalb der Abtragsschwelle der Metalle liegen. Aufgrund der guten Fokussierbarkeit der Strahlung reichen dazu Impulsenergien von wenigen μJ aus. Dadurch ist die pro Impuls erreichbare Abtragstiefe und damit die Bearbeitungsgeschwindigkeit stark herabgesetzt. Durch die Erhöhung der Repetitionsrate der ultrakurzen Impulse in den Bereich von einigen hundert kHz kann eine wirtschaftlich akzeptable Prozeßgeschwindigkeit erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit zu einer deutlichen Steigerung der Abtragsraten ist der Einsatz von Lasersystemen die Gruppen von modengekoppelten Impulsen sogenannte Bursts emittieren. Erste Untersuchungen zur Mikrobearbeitung mit Bursts zeigen zusätzlich eine Verbesserung der Bearbeitungsqualität im Vergleich zum Einsatz von Einzelimpulsen.
Eine vielversprechende Methode zur Erzeugung von Bursts aus ultrakurzen Impulsen ist der Aufbau eines Oszillators mit stabiler gütegeschalteter Modenkopplung (Q-switch mode locking, QML). Ein solcher Laser liefert zudem aufgrund der Amplitudenmodulation der ultrakurzen Impulse höhere Impulsenergien im Vergleich zu kontinuierlich modengekoppelten Lasern und höhere mittlere Ausgangsleistungen als ps-Oszillator-Verstärkersysteme. Die QML wurde bisher als unerwünschte Störung des kontinuierlichen Modenkopplungsbetriebs betrachtet, da die hohen Spitzenintensitäten in der Regel zur Zerstörung von resonatorinternen optischen Komponenten führten. Die Realisierung eines Lasers mit definierter stabiler QML erfordert die exakte Identifizierung und Beherrschung der Parameter, die einen gezielten Übergang von der kontinuierlichen zur gütegeschalteten Modenkopplung ermöglichen.
Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung einer Pikosekunden-Strahlquelle mit stabiler gütegeschalteter Modenkopplung, die eine hohe mittlere Leistung, Energie und Repetitionsrate liefert. Um einen QML-Laser realisieren zu können, musste zuerst ein geeignetes passives Modenkopplungsverfahren ausgewählt werden. Dazu wurden die Modenkopplung mit sättigbarem Halbleiterabsorber und das Verfahren der Phase-Selfadjust-Modenkopplung (PSM) untersucht. Für jedes der beiden Verfahren wurde als Basis für die QML ein kontinuierlich modengekoppelter Oszillator aufgebaut und charakterisiert. Durch die Anpassung der Laserparameter erfolgte der Übergang in den gütegeschalteten Betrieb. Der Oszillator mit PSM konnte durch Verstimmung des angekoppelten Resonators in den QML-Betrieb überführt werden. Der Stabilitätsbereich der Verstimmung war sehr klein, so dass kleine Fluktuationen der Resonatorlängen aufgrund des interferometrischen Prinzips des PSM-Verfahrens bereits zu starken Störungen des QML-Betriebs führten. Die gütegeschaltete Modenkopplung konnte für den Oszillator mit sättigbarem Halbleiterabsorber durch die Reduzierung der Impulsenergiedichte

auf dem Absorber erreicht werden. Im Experiment wurde dies durch Anpassung der Transmission des Auskoppelspiegels, der Pumpleistung und des Strahldurchmessers auf dem Absorber umgesetzt. Ein definierter QML-Betrieb konnte für einen sehr kleinen Parameterbereich realisiert werden. Die mittlere Ausgangsleistung des Lasers betrug 17,2 W mit einer sehr guten Strahlqualität (M^2 <1,1). Die Wiederholrate der Q-switch Impulse lag mit 290 kHz im Bereich der Relaxationsfrequenz des Lasers. Die maximale Energie der ultrakurzen Impulse konnte etwa um einen Faktor sechs auf 0,74 μJ im Vergleich zur Energie im kontinuierlichen Betrieb erhöht werden. Die Dauer der modengekoppelten Impulse wurde auf einen Wert von 22 ps bestimmt. Die Langzeitstabilität wurde in dieser ersten Realisierung noch durch Beschädigungen des Absorbers infolge hoher nichtsättigbarer Verluste begrenzt. Die experimentellen Ergebnisse zeigten jedoch, dass insgesamt die Modenkopplung mit sättigbaren Halbleiterabsorbern besser für den Aufbau eines Lasers mit gütegeschalteter Modenkopplung geeignet ist.

Auf der Grundlage der gesammelten experimentellen Erfahrungen wurde ein neuer Oszillator mit sättigbarem Halbleiterabsorber zur Realisierung eines langzeitstabilen QML-Lasers konzipiert. Zur Vermeidung von Beschädigungen des Absorbers und somit zur Erhöhung der Langzeitstabilität wurde die resonatorinterne Leistung durch Reduzierung der Pumpleistung verringert. Zusätzlich standen für die weiteren Arbeiten Absorber mit geringeren nichtsättigbaren Verlusten und damit einer höheren Zerstörschwelle zur Verfügung. Um kürzere Impulsdauern zu erzielen, wird eine Gain-at-the-End Konfiguration verwendet. Die Erzeugung der gütegeschalteten Modenkopplung wurde hier durch den Einsatz eines zusätzlichen Verlustmodulators erreicht. Ausgehend vom kontinuierlichen Modenkopplungsbetrieb wird durch einen akustooptischen Modulator (AOM) die Güte des Resonators variiert. Die Anpassung der Verluste und der Modulationsfrequenz des AOM erlaubte die Realisierung eines stabilen QML-Betriebs ohne Beschädigung des Absorbers. Die mittlere Ausgangsleistung betrug 7,2 W mit einem nahezu beugungsbegrenzten Strahl (M^2 <1,1). Der Wert für die maximale Impulsenergie lag bei 0,5 μJ. Dies entspricht einer Überhöhung im Vergleich zur kontinuierlichen Modenkopplung von 5,5. Die Wiederholrate der Q-switch Einhüllenden konnte durch die Modulationsfrequenz des AOM zwischen 180 und 200 kHz variiert werden. Die Dauer der ultrakurzen Impulse mit einer Wiederholrate von etwa 80 MHz wurde zu 12,8 ps bestimmt.

Die theoretische Beschreibung der Q-switch Modenkopplung war nur durch numerische Simulation möglich. Dazu wurde die Mastergleichung für einen langsamen sättigbaren Absorber mit Hilfe der Split-Step-Fourier-Methode gelöst. Die Ergebnisse der Simulationen stimmen gut mit denen aus dem Experiment überein. Darüberhinaus bestätigt das numerische Modell, dass eine deutliche Steigerung der Überhöhung durch die Anpassung der Eigenschaften des Absorbers in Verbindung mit den Laserparametern nicht möglich ist.

Mit dem realisierten Laser mit gütegeschalteter Modenkopplung wurden abschließend Demonstrationsexperimente zur Mikrobearbeitung von Metallen durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass der QML-Laser für die Mikrobearbeitung geeignet ist. Für den industriellen Einsatz des Konzeptes der gütegeschalteten Modenkopplung ist eine weitere Optimierung der Prozessparameter notwendig.

Die durchgeführten Arbeiten belegen, dass die Realisierung einer Strahlquelle mit stabiler gütegeschalteter Modenkopplung möglich ist. Die duch die Güteschaltung maximal erreichbare Erhöhung der Impulsenergie wird jedoch durch Störung der Modenkopplung begrenzt.

Abstract

Diode-pumped ultrafast lasers for the generation of picosecond pulse-bursts with high average power and energy using Q-switch mode locking

Recent publications have shown, that laser systems with pulse durations of about 10 ps provide a very good processing quality for micromachining of metals. Compared to femtosecond systems used so far, these picosecond lasers have the advantage to deliver higher average output powers. They are also less complex, more robust and less expensive. To satisfy the high requirements to the quality of certain applications, the pulse energy should only be slightly above the ablation threshold of the metals. Due to the good focussability of the diffraction-limited laser light, pulse energies of a few μJ are sufficient. Thus the ablation rate per pulse and the resulting processing speed is strongly reduced. A cost-effective processing speed is achievable by increasing the repeptition rate of the ultrashort pulses in the order of several hundreds of kHz. Another way to increase the ablation rate is to use lasers systems, emitting groups of pulses so called bursts. First investigations of material processing with bursts show also a quality enhancement compared to single-pulse experiments.
A promissing method to create bursts of ultrashort pulses is to develop an oscillator with stable Q-switch mode locking (QML). Such lasers offer higher pulse energies compared to continous wave (cw) mode-locked lasers and higher average output powers than ps oscilator-amplifier systems due to the amplitude modulation of the ultrashort pulses. In the past, the QML was considered as an unwanted disturbance of cw mode-locked operation, because often the high peak intensity cause damages to the optical elements in the resonator. The realisation of an oscilator with a well defined stable QML require the exact identification of the parameters which allow a controlled change from cw to Q-switch mode locking.
The aim of this thesis was the design of an ultrashort picosecond laser source with high average power, pulse energy and repetition rates based on Q-switch mode locking. The first step to realize a QML laser is to select a suitable modelocking technique. Therefore mode locking with semiconductor saturable absorbers and phase-selfadjust-mode locking (PSM) was investigated. For each of both techniques a cw-modelocked oscillator was built and characterized. By adjusting the laser parameters, the transition to QML was reached. For the oscillator with PSM, the QML operation was achieved by detuning the coupled resonator. The stability range for the detuning was very small, so that slightly fluctuations in the resonator lengths already induce strong perturbations of the QML operation because of the interferometric principle of the PSM-technique. For the the saturable absorber, the Q-switch mode locking could be realsized by reducing the pulse fluence on the absorber. In the experiment this was accomplished by optimizing the transmission of the output coupler, the pump power and beam diameter on the absorber. Controlled QML operation was achieved for a very small parameter range. The average output power was about 17.2 W with a high beam quality (M^2 <1.1). The Q-switch pulses had a repetition rate of 290 kHz close to the relaxation frequency of the laser. The maximum pulse energy was increased by a factor of six to 0.74 μJ compared to the energy during the cw mode locking. The duration of the modelocked pulses was measured to 22 ps. The long-term stability was limited through damages of the absorber due to the nonsaturable losses. The experimental results have shown, that mode locking by saturable absorbers is prefered for QML compared to the PSM technique.

Based on the experimental data, a new oscillator with semiconductor saturable absorber was designed for the implementation of QML with high long-term stability. To prevent damages of the absorber and to increase the stability, the intracavity power was reduced by using lower pump power. Furthermore new absorbers with a higher damage threshold resulting from lower non-saturable losses were available. For the generation of shorter pulses a gain-at-the-end configuration was used, which allows getting a pulse-shortening due to enhanced spatial hole burning. To realize a stable QML operation an additional loss modulator was used. Starting from cw mode locking, the quality factor of the cavity was changed with an acousto-optic modulator (AOM). By adjusting the losses and the modulation frequency of the AOM it was possible to realize stable QML operation without damaging the absorber. The average output power was 7.2 W with very good beam quality (M^2 <1.1). The maximum achievable pulse energy was 0.5 μJ. This value is 5.5 times higher than the energy of the cw mode-locked pulses. The repetition rate of the Q-switch envelope was tunable between 180 and 200 kHz. The pulse duration was measured to 12.8 ps at a repetition rate of 80 MHz.

A theoretical model of the Q-switch mode locking was done by numerical simulations. Therefore the master equation of a laser with a slow saturable absorber was solved using the split-step Fourier method. The results of the simulations are in good agreement with experimental data. The numerical model also confirmed a good experimental optimization, and showed, that a significant enhancement of the pulse energy by changing the absorber and the laser parameters is not possible.

The realized QML laser was tested in material processing with metals. The results show that the QML laser is suitable for micromachining. The industial application of the QML concept require an optimization of the process parameters.

The investigations performed in this thesis demonstrate that the reallisation of a laser source with stable Q-switch mode locking can be achieved. However the results also show that the maximum pulse energy resulting from Q-switching is limited by perturbations of the mode locking process.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Erzeugung ultrakurzer Impulse **5**

2.1 Zeitliche Emissionscharakteristik eines Lasers 5

2.2 Prinzip der Modenkopplung 7

2.3 Verfahren zur Modenkopplung 11

2.3.1 Aktive Modenkopplung 11

2.3.2 Passive Modenkopplung 12

2.3.2.1 Modenkopplung mit einem langsamen sättigbaren Absorber 12

2.3.2.2 Modenkopplung mit einem schnellen sättigbaren Absorber 14

2.3.2.3 Modenkopplung durch Bildung optischer Solitonen . . 16

2.4 Phase-Self-Adjusting Mode-locking (PSM) 16

2.4.1 Selbstphasenmodulation 17

2.4.2 Prinzip von APM und PSM 18

2.5 Sättigbare Halbleiterabsorberspiegel 21

2.5.1 Makroskopische Eigenschaften sättigbarer Halbleiterabsorber . . 22

2.5.2 Voraussetzungen für die Modenkopplung mit sättigbaren Halbleiterabsorbern 24

2.5.3 Schwelle für selbstgütegeschaltete Modenkopplung 26

2.5.4 Aufbauzeit für die Modenkopplung 27

2.5.5 Aufbau sättigbarer Halbleiterabsorberspiegel 28

3 Nd:$GdVO_4$ Oszillatoren mit selbstgütegeschalteter Modenkopplung **31**

3.1 Eigenschaften des Lasermaterials Nd:$GdVO_4$ 32

3.2 Nd:$GdVO_4$ -Oszillator mit Phase-Self-Adjusting-Mode-locking 34

3.2.1 Der kontinuierlich emittierende Nd:$GdVO_4$ -Laser 34

3.2.1.1 Charakterisierung der Diodenlaserpumpquellen 34
3.2.1.2 Thermische Belastung des Laserkristalls 37
3.2.1.3 Berechnung der Resonatorkonfiguration 42
3.2.1.4 Der experimentelle Aufbau 44
3.2.1.5 Der kontinuierliche Betrieb 45
3.2.2 Der Nd:$GdVO_4$ -Laser mit kontinuierlicher PSM 46
3.2.2.1 Der experimentelle Aufbau 46
3.2.2.2 Der modengekoppelte Betrieb 48
3.2.3 Der Nd:$GdVO_4$ -Laser mit selbstgütegeschalteter Modenkopplung 51
3.3 Selbstgütegeschaltete Modenkopplung des Nd:$GdVO_4$ -Lasers mit sättigbarem Halbleiterabsorber 56
3.3.1 Der experimentelle Aufbau 57
3.3.2 Experimentelle Ergebnisse zur cw-Modenkopplung 59
3.3.3 Experimentelle Ergebnisse zur selbstgütegeschalteten Modenkopplung 62
3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse 64
3.4.1 Vergleich von Nd:$GdVO_4$ und Nd:YVO_4 64
3.4.2 Vergleich der Modenkopplungsverfahren bei kontinuierlicher Modenkopplung und Selbstgüteschaltung 66

4 Gütegeschaltete Modenkopplung eines Nd:YVO_4 -Lasers mit sättigbarem Halbleiterabsorber 69
4.1 Kontinuierlicher Laserbetrieb 70
4.1.1 Charakterisierung der Diodenlaserpumpquellen 70
4.1.2 Thermische Belastung des Laserkristalls 72
4.1.3 Berechnung der Resonatorkonfiguration 74
4.1.4 Experimenteller Aufbau 76
4.1.5 Experimentelle Ergebnisse zum kontinuierlichen Betrieb 77
4.2 Kontinuierliche Modenkopplung mit sättigbarem Absorber 79
4.3 Selbstgütegeschaltete Modenkopplung 83
4.4 Q-switch-Modenkopplung mit akustooptischem Modulator 87
4.5 Numerische Simulation des Nd:YVO_4 -Lasers mit Q-switch-Modenkopplung 101
4.5.1 Theoretische Grundlagen 101
4.5.2 Das Simulationsmodell 103
4.5.3 Ergebnisse der Simulation 107

4.6 Materialbearbeitung mit dem QML-Laser 116
4.6.1 Der experimentelle Aufbau 117
4.6.2 Ergebnisse zur Materialbearbeitung 118

5 Zusammenfassung **125**

Literaturverzeichnis **129**

Kapitel 1

Einleitung

In der industriellen Fertigung hat sich die Mikromaterialbearbeitung in den letzten Jahren zu einem der Hauptanwendungsgebiete von optisch angeregten gepulsten Festkörperlasern entwickelt. Als Strahlquellen werden dabei überwiegend gütegeschaltete (Q-switch) Nanosekundensysteme eingesetzt. Die starke Verbreitung dieser Laser ist auf deren geringen Anschaffungspreis, den robusten Aufbau und die hohen Impulsenergien zurückzuführen. Der große Nachteil der gütegeschalteten Laser besteht in der relativ langen Wechselwirkungszeit der Nanosekundenimpulse mit der Materialprobe. Die Relaxationszeit der Temperatur, d.h. die Zeitdauer die das Elektronensystem für die Energieübertragung auf das Gitter des Materials benötigt, liegt jedoch im Pikosekundenbereich [1]. Dadurch findet während der Bearbeitung mit Nanosekundenimpulsen ein erheblicher Wärmeeintrag in das Material außerhalb des direkten Wechselwirkungsbereichs mit der Laserstrahlung statt. Dies führt zu Mikrorissen und starker Schmelzbildung, die eine Nachbearbeitung des Werkstücks erfordern. Für den Einsatz in der Präzisionsbearbeitung sind gütegeschaltete Laser daher nicht geeignet [2].
Eine erhebliche Verbesserung der Bearbeitungsqualität konnte durch die Verwendung von Ultrakurzpuls-Strahlquellen im Femtosekundenbereich erreicht werden. Da die Impulsdauer geringer ist als die Thermalisierungszeit zwischen Elektronen und Gitter, tritt eine deutlich geringere thermische Belastung des Materials außerhalb der Wechselwirkungszone auf [3]. Die durch den Einsatz von Femtosekundenimpulsen erzielte nahezu schädigungsfreie und damit sehr präzise Bearbeitung bot viele neue Anwendungsmöglichkeiten [4, 5, 6]. Die Femtosekunden-Strahlquellen basieren auf Ti:Saphir als aktivem Lasermaterial. Aufgrund der hervorragenden thermischen und optischen Eigenschaften ist dieses Material sehr gut für den Aufbau von Oszillator-Verstärkersysteme zur Erzeugung von Impulsdauern im Bereich weniger Femtosekunden geeignet [7]. Zwei wesentliche Nachteile verhindern jedoch den breiten industriellen Einsatz

dieser Systeme. Zum einen stehen für die Anregung von Ti:Saphir zwischen 500 und 550 nm keine Hochleistungs-Diodenlaser zur Verfügung. Üblicherweise werden zur Anregung daher aufwendige diodengepumpte frequenzverdoppelte Festkörperlaser eingesetzt. Der zweite Nachteil ergibt sich aus der Tatsache, dass die Impulsenergien von Ti:Saphir Oszillatoren für die Materialbearbeitung zu gering sind und daher in einem regenerativen Verstärker nachverstärkt werden müssen. Um Zerstörungen der optischen Komponenten des Verstärkers aufgrund der extrem hohen Spitzenintensitäten der fs-Impulse zu vermeiden, muss das Verfahren der Chirped Pulse Amplification (CPA) verwendet werden [8, 9]. Dabei werden die Impulse vor der Verstärkung zeitlich gestreckt und danach wieder komprimiert. Durch die CPA werden die Ti:Saphir-Systeme sehr komplex, kostenintensiv und relativ ineffizient. Zudem ist die Prozeßgeschwindigkeit im industriellen Einsatz aufgrund der Beschränkung der Repetionsrate der Impulse kommerziell erhältlicher Systeme auf unter 5 kHz begrenzt.
Die anhand vieler Untersuchungen belegte hohe Qualität bei der Bearbeitung mit Ti:Saphir Systemen führte zu der Annahme, dass dies nur durch die Verwendung von Impulsdauern im Bereich von 100 fs möglich wurde. Neuere Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass durch den Einsatz von Lasersystemen mit Impulsdauern im Bereich von 10 ps sehr gute Ergebnisse für die Präzisionsbearbeitung von Metallen erreicht werden können [3, 10]. Da der Temperaturaustausch des Elektronensystems auf die Atome und Ionen des Materials in einem Zeitintervall von einigen zehn Pikosekunden abläuft, sind die Pikosekundenimpulse ausreichend kurz, so dass der Wärmeeintrag in das Metall analog zu fs-Impulsen minimiert werden kann. Zusätzlich bietet die Bearbeitung mit Pikosekunden aufgrund der geringeren Spitzenintensitäten den Vorteil, dass Strahlverzerrungen im Fokus durch die nichtlineare Wechselwirkungen mit der Luft vermieden werden können. Die Nutzung von Pikosekunden-Impulsen erlaubt die Realisierung von Ultrakurzpuls-Strahlquellen mit denen die Nachteile von fs-Systemen beseitigt werden. Dabei handelt es sich um diodenlasergepumpte Systeme aus Seed-Oszillator und regenerativem Verstärker basierend auf Neodym dotierten Lasermaterialien, bei denen auf das CPA Verfahren aufgrund der geringeren Leistungsdichten verzichtet werden kann [12].
Für bestimmte Anwendungen, die sehr hohe Anforderungen an die Qualität der bearbeiteten Oberflächen und Kanten stellen, darf die Energie der Laserimpulse nur knapp oberhalb der Abtragsschwelle der Metalle liegen [10]. Aufgrund der guten Fokussierbarkeit der Laserstrahlung reichen Impulsenergien von wenigen μJ bereits aus. Infolge der reduzierten Energie nimmt die pro Impuls erreichbare Abtragstiefe und damit die Bearbeitungsgeschwindigkeit stark ab. Durch die Erhöhung der Repetitionsrate der ultrakurzen Impulse in den Bereich von einigen hundert kHz kann eine wirtschaft-

lich akzeptable Prozeßgeschwindigkeit erreicht werden. Kommerziell erhältliche ps-Lasersyteme aus Seedoszillator und regenerativem Verstärker lassen nur Wiederholraten bis 100 kHz zu [13]. Eine weitere Möglichkeit zu einer deutlichen Steigerung der Abtragsraten ist der Einsatz von Lasersystemen die Gruppen von modengekoppelten Impulsen, sogenannte Bursts, emittieren. Erste Untersuchungen zur Mikrobearbeitung mit Bursts zeigten zusätzlich eine Verbesserung der Bearbeitungsqualität im Vergleich zum Einsatz von Einzelimpulsen [14, 15].
Eine vielversprechende Methode zur Erzeugung von Bursts aus ultrakurzen Impulsen hoher Energie bildet ein Oszillator mit gütegeschalteter Modenkopplung (Q-switch mode locking, QML). Die durch Modenkopplung erzeugten ultrakurzen Impulse liegen dabei unter einer gütegeschalteten Einhüllenden. Ein solcher Laser mit QML verbindet den Vorteil der hohen Impulsenergien von Q-switch Lasern mit den ultrakurzen Impulsen und dem kompakten Aufbau von kontinuierlich modengekoppelten Oszillatoren. Die in der Vergangenheit realisierten Laser mit QML erfüllen die Anforderungen für den Einsatz in der Präzisionsbearbeitung hinsichtlich der Dauer der modengekoppelten Impulse, der Wiederholrate und der Stabilität der Maximalamplituden der gütegeschalteten Einhüllenden nicht [16, 17, 18, 19].

Das Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung und die Untersuchung der physikalischen Eigenschaften einer Ultrakurzpuls-Strahlquelle zur Erzeugung von Pikosekunden-Impulszügen hoher mittlerer Leistung und Energie durch gütegeschaltete Modenkopplung mit Impulsdauern im Bereich von 10 ps. Die Erzeugung der ultrakurzen Impulse erfolgte durch die passive Modenkopplung von diodengepumpten Lasern basierend auf Nd:YVO_4 und dem erst seit wenigen Jahren verfügbaren Nd:$GdVO_4$ als aktivem Material [20]. Neben der Impulserzeugung muss das Verfahren die Möglichkeit bieten, einen stabilen gütegeschalteten Betrieb zu erreichen. Dabei kann die Gütemodulation durch die Anpassung der Laserparameter durch das Modenkopplungselement selbst (Self-QML) oder durch einen zusätzlichen Verlustmodulator erzeugt werden. Die Amplitudenmodulation darf dabei nicht zur Störung der Impulsformung durch die Modenkopplung führen. Gleichzeitig wird durch die Stärke der Amplitudenmodulation jedoch der Wert der maximalen Impulsenergie festgelegt. Um einen QML-Laser mit hohen Impulsenergien und stabiler Modenkopplung zu realisieren, müssen die Laserparameter, die eine geeignete Beeinflußung der Laserdynamik erlauben, identifiziert werden.
Die vorliegende Arbeit gliedert sich daher wie folgt: Die Erzeugung ultrakurzer Impulse durch Modenkopplung wird in Kapitel 2 ausführlich erläutert, insbesondere die beiden in den Experimenten untersuchten Verfahren der Phase-Selfadjust-Modenkopplung (PSM) und der Modenkopplung mit sättigbaren Halbleiterabsorbern. In Kapitel 3

werden die Modenkopplungsverfahren auf ihre Eignung zur Realiserung eines stabilen QML-Betriebs hin untersucht. Ausgehend von zuerst realisierten kontinuierlich modengekoppelten Oszillatoren, erfolgt durch die Anpassung der Laserparameter der Übergang zur selbstgütegeschalteten QML. Basierend auf den Erfahrungen aus den vorrausgehenden Experimenten, folgt in Kapitel 4 die Darstellung der Ergebnisse eines neu konzipierten Systems zur langzeitstabilen QML. Neben der Selbstgüteschaltung wurde die QML durch das Einbringen eines zusätzlichen Verlustmodulators in den Resonator untersucht. Zum besseren Verständnis der physikalischen Zusammenhänge der QML und zur Optimierung des Betriebs hinsichtlich maximaler Impulsenergien der modengekoppelten Einzelimpulse wurden numerische Simulationen durchgeführt, deren Ergebnisse in Kapitel 4.3 dargestellt sind. Die Ergebnisse zur Materialbearbeitung mit Bursts durch den Einsatz des QML-Lasers werden in Abschnitt 4.4 diskutiert und bewertet. Abschließend werden in Kapitel 5 die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit noch einmal kurz zusammengefasst.

Kapitel 2

Erzeugung ultrakurzer Impulse

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen und die Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer Impulse durch Modenkopplung, wie sie in dieser Arbeit eingesetzt werden, vorgestellt.
Zuerst folgt ein kurzer Überblick der zeitlichen Laserdynamik anhand der möglichen Betriebszustände in denen ein Laser seine Strahlung emittieren kann. Danach wird das Prinzip der Impulserzeugung durch Kopplung der longitudinalen Resonatormoden erklärt. Anschließend wird eine Übersicht über die verschiedenen Methoden zur Realisierung der Modenkoppung gegeben. Dabei wird ausführlich auf die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten passiven Verfahren des Phase-Self-Adjusting-Mode-locking (PSM) und der sättigbaren Halbleiterabsorber zur Realisierung der gütegeschalteten Modenkopplung (QML) eingegangen.

2.1 Zeitliche Emissionscharakteristik eines Lasers

Anhand des zeitlichen Verlaufs der emittierten Leistung P(t) lassen sich Laser prinzipiell in vier verschiedene Klassen einteilen [22]. In Abbildung 2.1 sind diese mit ihrer typischen Leistungs-Zeit-Charakteristik dargestellt.
Ohne aktive oder passive Modulation der Verluste, der Verstärkung oder der Phase befindet sich ein Laser im kontinuierlichen Betrieb (cw), indem die Ausgangsleistung zeitlich konstant ist. Der Laser oszilliert auf einer oder mehreren longitudinalen Moden zwischen denen keine Phasenkopplung besteht.
Durch die Variation der Resonatorverluste wird die Güteschaltung (Q-switching) erreicht. Die Modulation der Resonatorgüte Q ermöglicht einen gepulsten Betrieb. Das Prinzip besteht darin, die Inversion und damit die Verstärkung durch Unterdrückung des Laserprozeßes aufgrund sehr hoher Verluste zu erhöhen. Nach einer bestimmten