

Marco Weitz

---

**Neuartige Konzepte und Anwendungen  
von diodengepumpten Hochleistungs-  
Ultrakurzpuls-Strahlquellen**

---

Cuvillier Verlag Göttingen

**Neuartige Konzepte und Anwendungen  
von diodengepumpten  
Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Strahlquellen**

Dissertation

Marco Weitz

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

978-3-86727-260-5

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2007

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://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

978-3-86727-260-5

---

## Abstract

### Novel concepts and applications of diode-pumped high average power ultrashort lasers

The generation of ultrashort light pulses in the pico- and femtosecond range allows for the investigation of extremely fast processes in biology, physics and chemistry [92]. Here the visible spectral region is of special interest, since many organic materials show absorption maxima in this range. Due to the limited wavelength tunability of most infrared solid-state lasers, there are no suitable laser sources for some applications even after frequency doubling into the visible spectral region.

In this thesis, laser sources emitting ultrashort pulses in new spectral ranges are demonstrated. An ultrashort light source based on Yb:YAG emitting at 1030 nm with high average power and repetition rate was developed. In the second part of this thesis, a new concept was demonstrated offering an ultrashort light source at a wavelength of 1176 nm utilizing the stimulated Raman-effect.

The realization of the Yb:YAG laser was possible only by the investigation and numeric modeling of the physical characteristics of the laser material. In high-performance systems large amounts of heat are deposited in the laser crystal due to the quantum defect. With increasing pump powers, thermally-induced birefringence and strong thermal lensing makes it difficult to find a suitable resonator and pump design. For the Yb:YAG cw laser, a maximum output power of 30 W for an absorbed pump power of 84 W was experimentally demonstrated, with a diffraction limited ( $M^2 < 1.1$ ) output beam. For the generation of ultrashort laser pulses the method of self-stabilizing additive-pulse mode locking was employed [40]. Additive-pulse mode locking requires a linearly polarized laser. High pump powers however result in strong thermally induced birefringence and therefore a depolarization of the laser mode. A concept was developed that delivered a highly polarized beam at high pump powers. In modelocked operation an average power of 25.5 W was obtained with a pulse duration of 648 fs and a spectral bandwidth of 2.4 nm. The pulse repetition rate was 122 MHz. The damage threshold of the fiber was identified as a limiting factor for further power scaling of the system.

Apart from the possibility to generate new wavelengths with new solid-state laser materials, one could use stimulated Raman-scattering to shift the wavelength of well-known Raman-active laser materials to new spectral regions. For an efficient conversion high peak powers are required, which can be provided by modelocked lasers. The Raman-active laser material Nd:YVO<sub>4</sub> was selected due to its physical laser properties, which allow the generation of ultrashort pulses. Stimulated Raman scattering in this mate-

rial results in the emission of radiation at 1176 nm. For the generation of ultrashort pulses, mode locking with a semiconductor saturable absorber was employed. The Raman-conversion in the Nd:YVO<sub>4</sub> laser crystal was achieved through synchronous pumping. The crystal was located in the overlapping part of two coupled cavities. Because the Raman-conversion works against the pulse stabilization in the absorber, a stable modelocking operation even at a low Raman-conversion is not possible. This could be demonstrated on the basis of a low-power system. In this thesis a concept was developed, which for the first time allowed the realization of a picosecond self-Raman laser with stable mode locking of the Nd:YVO<sub>4</sub> laser. This was achieved by a suitable detuning of the coupled cavities, which results in a shift of the main part of Raman-conversion to the edge of the Nd:YVO<sub>4</sub> pulses. This results similarly to the modulation of the pulse front by the slow saturable absorber to the stabilization of the mode locking. The pulse duration of the Nd:YVO<sub>4</sub> laser was thereby reduced to 5.9 ps (28 %) while the average output power increased to 340 mW with a repetition rate of 77 MHz. The pulse duration of the Raman-radiation was 3.8 ps with a spectral bandwidth of 85 GHz. By extending the length of the Nd:YVO<sub>4</sub> crystal the average power could be increased to 420 mW with a pulse duration of 4.8 ps and a repetition rate of 73 MHz. By nonlinear frequency doubling of the Raman-radiation in lithium-triborate (LBO) an average power of 41 mW with a pulse duration of 3.2 ps at a wavelength of 588 nm was demonstrated.

Apart from the cw mode locking operation, the Nd:YVO<sub>4</sub> laser could be switched to Q-switch mode locking though a suitable detuning of the cavities, which results in a shift of the main part of the Raman-conversion to the pulse front. Due to the increasing peak power, the average output power could be increased to 540 mW. The pulse duration was 6.2 ps with a repetition rate of the Q-switched envelope of 377 kHz. The repetition rate of the modelocked pulses was still 77 MHz.

In this thesis a concept was developed which for the first time makes the realization of a synchronously pumped picosecond Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser possible and thereby demonstrated the capability of these systems to generate radiation at new wavelengths.

---

# Kurzzusammenfassung

## Neuartige Konzepte und Anwendungen von diodengepumpten Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Strahlquellen

Die Erzeugung von ultrakurzen Lichtimpulsen im Piko- und Femtosekunden-Bereich eröffnet viele Anwendungsmöglichkeiten bei der Untersuchung von extrem schnellen Prozessen in der Biologie, Physik und Chemie [92]. Von besonderem Interesse ist hier der sichtbare Spektralbereich, in dem viele organische Stoffe Absorptionsmaxima zeigen. Aufgrund der begrenzten Abstimmbarkeit der Emissionswellenlänge typischer Lasermaterialien im Infrarot-Bereich stehen auch nach der Frequenzverdopplung in den sichtbaren Spektralbereich für viele Anwendungen keine geeigneten Strahlquellen zur Verfügung. Ziel dieser Arbeit war deshalb die Entwicklung und Charakterisierung neuartiger Ultrakurzpuls-Strahlquellen, die eine Erschließung neuer Wellenlängenbereiche ermöglichen. Dazu wurde zum einen eine Ultrakurzpuls-Strahlquelle hoher mittlerer Leistung, basierend auf dem Lasermaterial Yb:YAG, bei einer Wellenlänge von 1030 nm entwickelt. Zum anderen wurde, basierend auf dem physikalischen Effekt der stimulierten Raman-Streuung, ein neuartiges Konzept zur Erzeugung von ultrakurzen Lichtimpulsen bei neuen Wellenlänge demonstriert.

Die Realisierung des Yb:YAG Lasers war erst durch die Untersuchung und numerische Modellierung der physikalischen Eigenschaften des Lasermaterials möglich, da in Hochleistungssystemen aufgrund des Quantendefekts große Wärmemengen im Laserkristall deponiert werden. Die daraus resultierenden Effekte, wie spannungsinduzierte Doppelbrechung oder das Ausbilden von starken thermischen Linsen, steigern mit zunehmender Pumpleistung die Anforderungen an das Resonatordesign und die Pumptanordnung. Im kontinuierlichen Betrieb emittierte der Laser, bei einer absorbierten Pumpleistung von 84 W, eine maximale Ausgangsleistung von 30 W in einem nahezu beugungsbegrenzten Strahl ( $M^2 < 1,1$ ). Als Modenkopplungsverfahren wurde eine modifizierte selbststabilisierende Form der Additiv-Puls-Modenkopplung (APM) gewählt [40]. Voraussetzung für die APM ist ein linear polarisierter Laserbetrieb, welcher durch ein neues Konzept trotz der starken spannungsinduzierten Doppelbrechung erreicht werden konnte. Im modengekoppelten Betrieb wurde eine mittlere Ausgangsleistung von 25,5 W bei einer Impulsdauer von 648 fs und einer Wiederholrate von 122 MHz erzielt. Als limitierender Faktor für eine weitere Leistungsskalierung wurde das Erreichen der Zerstörschwelle der optischen Faser identifiziert.

Neben der Möglichkeit neue Wellenlängenbereiche durch neuartige Lasermaterialien zu erreichen, besteht die Möglichkeit durch stimulierte Raman-Streuung die Ausgangsstrahlung bekannter Raman-aktiver Lasermaterialien in der Wellenlänge zu verschie-

ben. Für eine effiziente Konversion sind dazu hohe Impulsspitzenleistungen notwendig, wie sie modengekoppelte Laser liefern. Als Lasermaterial wurde das Raman-aktive Material Nd:YVO<sub>4</sub> gewählt, da es aufgrund seiner laserphysikalischen Eigenschaften die Erzeugung modengekoppelter Impulse im Pikosekundenbereich ermöglicht. Durch stimulierte Raman-Streuung lässt sich so Strahlung bei einer Wellenlänge von 1176 nm erzeugen. Als Modenkopplungsverfahren für den Nd:YVO<sub>4</sub> Laser wurde die Modenkopplung mit sättigbarem Halbleiterabsorber gewählt. Die Raman-Konversion erfolgte dabei durch synchrones Pumpen im Nd:YVO<sub>4</sub> Laserkristall, welcher sich im überlappenden Teil zweier gekoppelter Resonatoren befand. Problematisch ist hierbei, dass die Raman-Konversion der Stabilisierung der modengekoppelten Impulse durch den Absorber entgegenwirkt, was anhand eines Systems mit geringer Raman-Konversion gezeigt werden konnte. Durch das hier entwickelte Konzept konnte erstmals ein Selbst-Raman-Laser mit einer Impulsdauer von wenigen Pikosekunden bei weiterhin stabiler Modenkopplung des Nd:YVO<sub>4</sub> Lasers realisiert werden. Dabei wurde durch eine geeignete Verstimmung der Resonatoren der Hauptanteil der Raman-Konversion in die Impulsflanke der Nd:YVO<sub>4</sub> Impulse verschoben. Dort führte sie analog zur Modulation der Impulsfront durch den langsamen sättigbaren Absorber zur Stabilisierung der Modenkopplung. Dies resultierte in einer Impulsverkürzung des Nd:YVO<sub>4</sub> Lasers um 28 % auf 5,9 ps und eine Steigerung der mittleren Ausgangsleistung des Selbst-Raman-Lasers auf 340 mW bei einer Wiederholrate von 77 MHz. Die Impulse hatten dabei eine Dauer von 3,8 ps und eine spektrale Breite von 85 GHz. Durch eine Verlängerung des Nd:YVO<sub>4</sub> Kristalls konnte die mittlere Ausgangsleistung der Raman-Strahlung auf 420 mW bei einer Impulsdauer von 4,8 ps und einer Wiederholrate von 73 MHz gesteigert werden. Durch nichtlineare Frequenzverdopplung der Raman-Strahlung in Lithiumtriborat (LBO) konnte eine mittlere Ausgangsleistung von 41 mW bei einer Wellenlänge von 588 nm und einer Impulsdauer von 3,2 ps erzielt werden.

Neben der kontinuierlichen Modenkopplung konnte durch eine Verstimmung, welche die Raman-Konversion in die Impulsfront der Nd:YVO<sub>4</sub> Impulse verschob, der Q-Switch-Modenkopplungsbetrieb (QML) erreicht werden. Aufgrund der Überhöhung konnte die mittlere Ausgangsleistung auf 540 mW gesteigert werden. Die Impulsdauer der Raman-Strahlung betrug 6,2 ps bei einer Repetitionsrate der Q-Switch-Einhüllenden von 377 kHz und einer Wiederholrate der modengekoppelten Impulse von 77 MHz.

Die erstmalige Realisierung und Untersuchung der hier vorgestellten synchron gepumpten pikosekunden Nd:YVO<sub>4</sub> Selbst-Raman-Laser belegt die Leistungsfähigkeit dieses Konzept zur Erschließung neuer Wellenlängen.

# Publikationen

## Internationale Tagungsbeiträge

- Marco Weitz, Sascha Reuter, Ralf Knappe, Richard Wallenstein  
*Passive mode-locked 21 W femtosecond Yb:YAG laser with 124 MHz repetition-rate*  
Conference on Lasers and Electro-Optics (2004),  
16.05.-21.05.2004 in San Francisco, California  
Technical Digest (Postconference Edition) CTuCC1
- Marco Weitz, Martin Nittmann, Christian Theobald, Ralf Knappe, Richard Wallenstein  
*Passively Q-Switched Mode-Locked Picosecond Nd:YVO<sub>4</sub> Self-Raman Laser*  
Conference on Lasers and Electro-Optics (2006),  
21.05.-26.05.2006 in Long Beach, California  
Technical Digest (Postconference Edition) CThU3



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse . . . . .	5
2.1.1 Theorie der Modenkopplung . . . . .	6
2.1.2 Modenkopplungsverfahren . . . . .	9
2.1.3 Eigenschaften und Aufbau sättigbarer Halbleiterabsorber . . .	15
2.1.4 Additiv-Puls-Modenkopplung . . . . .	20
2.2 Theoretische Grundlagen der Raman-Streuung . . . . .	26
2.2.1 Die spontane Raman-Streuung . . . . .	26
2.2.2 Die stimulierte Raman-Streuung . . . . .	27
2.2.3 Stimulierte Raman-Streuung im Bild der nichtlinearen Polarisierung	29
2.2.4 Raman-Streuung in Kristallen . . . . .	33
<b>3 Modengekoppelter fs Yb:YAG Laser hoher mittlerer Leistung</b>	<b>37</b>
3.1 Materialeigenschaften von Yb:YAG . . . . .	38
3.1.1 Spektroskopische Eigenschaften von Yb:YAG . . . . .	38
3.1.2 Thermische und mechanische Eigenschaften von Yb:YAG . . . .	42
3.2 Charakterisierung der Pumpquelle . . . . .	43
3.2.1 Charakterisierung des Diodenlasers . . . . .	44
3.2.2 Pumpgeometrie . . . . .	47
3.3 Modellierung der thermischen Effekte . . . . .	50
3.3.1 Wärmeentwicklung in Laserkristallen . . . . .	51
3.3.2 Modellierung der thermischen Effekte in Yb:YAG . . . . .	53
3.4 Der Yb:YAG Laser im kontinuierlichen Betrieb . . . . .	55
3.4.1 Experimenteller Aufbau . . . . .	55
3.4.2 Optimierung des Polarisationsgrades des Yb:YAG Lasers . . . .	56

3.5	Der modengekoppelte Yb:YAG Laser . . . . .	60
3.5.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	60
3.5.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Der synchron gepumpte pikosekunden Selbst-Raman-Laser</b>	<b>67</b>
4.1	Materialeigenschaften von Nd:YVO <sub>4</sub> . . . . .	69
4.1.1	Spektroskopische Eigenschaften . . . . .	69
4.1.2	Thermische und mechanische Eigenschaften . . . . .	71
4.2	Das Konzept des synchron gepumpten Selbst-Raman-Lasers . . . . .	71
4.3	Charakterisierung der verwendeten Pumpquellen . . . . .	74
4.3.1	Pumpquelle des 4 mm Nd:YVO <sub>4</sub> -Oszillators . . . . .	75
4.3.2	Pumpquelle der Nd:YVO <sub>4</sub> -Oszillatoren mit 12 mm und 30 mm Kristallen . . . . .	77
4.3.3	Berechnung der absorbierten Pumpleistungsverteilung . . . . .	79
4.3.4	Modellierung der thermischen Effekte . . . . .	83
4.4	Der 4 mm Nd:YVO <sub>4</sub> Selbst-Raman-Laser . . . . .	88
4.4.1	Der kontinuierlich emittierende Nd:YVO <sub>4</sub> Laser . . . . .	88
4.4.2	Der modengekoppelte Nd:YVO <sub>4</sub> -Laser . . . . .	91
4.4.2.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	91
4.4.2.2	Experimentelle Ergebnisse des modengekoppelten Sy- stems . . . . .	92
4.4.3	Der synchron gepumpte Nd:YVO <sub>4</sub> Selbst-Raman-Laser . . . . .	94
4.4.3.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	94
4.4.3.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	95
4.5	Der 12 mm Nd:YVO <sub>4</sub> Selbst-Raman-Laser . . . . .	101
4.5.1	Der kontinuierlich emittierende Nd:YVO <sub>4</sub> Laser . . . . .	101
4.5.2	Der modengekoppelte Nd:YVO <sub>4</sub> -Laser . . . . .	104
4.5.2.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	105
4.5.2.2	Experimentelle Ergebnisse des modengekoppelten Sy- stems . . . . .	105
4.5.3	Der synchron gepumpte Nd:YVO <sub>4</sub> -Selbst-Raman-Laser . . . . .	107
4.5.3.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	107
4.5.3.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	108
4.5.4	Einfluss der Verstimmung der Resonatoren auf den Betriebszu- stand des Lasers . . . . .	116
4.5.5	Der Q-Switch-modengekoppelte Nd:YVO <sub>4</sub> -Selbst-Raman-Laser .	123
4.6	Der 30 mm Nd:YVO <sub>4</sub> -Selbst-Raman-Laser . . . . .	131

---

4.6.1	Der synchron gepumpte Nd:YVO <sub>4</sub> Selbst-Raman-Laser . . . . .	131
4.6.1.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	131
4.6.1.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	133
4.6.2	Frequenzverdopplung des synchron gepumpten Nd:YVO <sub>4</sub> -Selbst- Raman-Lasers . . . . .	139
4.6.2.1	Theoretische Grundlagen der Frequenzkonversion . . .	139
4.6.2.2	Experimenteller Aufbau . . . . .	147
4.6.2.3	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	148
4.7	Der 2-Stab Nd:YVO <sub>4</sub> -Raman-Laser . . . . .	150
4.7.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	150
4.7.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	150
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>155</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

Seit der ersten Demonstration eines Lasers durch P. H. Maiman im Jahre 1960 [62] wurde eine Vielzahl von Lasertypen (Festkörperlaser, Gaslaser, Farbstofflaser, Diodenlaser etc.) entwickelt und untersucht. Erst die Entwicklung von leistungsstarken und zuverlässigen Halbleiterlasern Mitte der achtziger Jahre, verhalf den Festkörperlasern zu einem großen Aufschwung, da sie eine ideale Lichtquelle für das optische Pumpen darstellen. Von besonderem Interesse sind dabei longitudinal diodengepumpte Festkörperlaser, welche sich durch ihre exzellente Strahlqualität, ihren hohen Gesamtwirkungsgrad, sowie ihre kompakte Bauweise auszeichnen. Speziell die Erzeugung von ultrakurzen Lichtimpulsen im Piko- und Femtosekundenbereich eröffnet eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Dazu zählen zum Beispiel die zeitaufgelöste Spektroskopie, die fs-Chemie zur Kontrolle und Steuerung von chemischen Prozessen oder die Medizin. Aufgrund der hohen Spitzenleistung ultrakurzer Impulse ergeben sich aber auch Anwendungsgebiete in der Materialbearbeitung und der nichtlinearen Optik. Ein Nachteil vieler Festkörperlaser ist jedoch die schlechte Abstimmbarkeit der Emissionswellenlänge typischer Laserkristalle im Infrarot-Bereich. So stehen auch nach der Frequenzkonversion in den sichtbaren Bereich, in dem viele organische Verbindungen Absorptionsmaxima haben, für eine Reihe von Anwendungen keine geeigneten Strahlquellen zur Verfügung. So hat das am häufigsten verwendete laseraktive Ion Neodym ( $\text{Nd}^{3+}$ ), je nach verwendetem Wirtskristall, seine stärkste Emissionslinie bei einer Wellenlänge von ca. 1064 nm. Durch Frequenzkonversion können in der Folge auch im sichtbaren Spektralbereich nur diskrete Wellenlängen erreicht werden. Durch die Wahl anderer laseraktiver Ionen und Wirtskristalle lassen sich Strahlquellen bei neuen Wellenlängen realisieren. Hier besteht die Herausforderung in der Leistungsskalierung bestehender Systeme und der Identifizierung und Behebung der sich daraus ergebenden Probleme. So liegt die stärkste Emissionslinie des in dieser Arbeit eingesetzten Laser-

materials Yb:YAG beispielsweise bei einer Wellenlänge von ca. 1030 nm.

Weiterhin bietet sich die Möglichkeit, durch den physikalischen Effekt der stimulierten Raman-Streuung, die Emissionswellenlänge vorhandener Lasersysteme zu neuen Wellenlängen zu verschieben. Dies kann bei Raman-aktiven Laserkristallen im Laserkristall selbst erfolgen, solche Systeme werden dann als Selbst-Raman-Laser bezeichnet, oder durch das Einfügen eines zusätzlichen Raman-aktiven Kristalls in den bestehenden Laser.

Das erste Ziel dieser Arbeit ist die Leistungsskalierung eines modengekoppelten femtosekunden Yb:YAG Lasers mit einer Wiederholrate von  $> 120$  MHz. Aufgrund der laserphysikalischen Eigenschaften eignet sich Yb:YAG für den Einsatz in Hochleistungslasern. So konnte basierend auf diesem Lasermaterial ein kontinuierlich emittierender Multimode-Laser mit einer Ausgangsleistung von über 1 kW realisiert werden [43, 84]. Die große Verstärkungsbandbreite von ca. 5 nm ermöglicht die Erzeugung von Impulsdauern von bis zu 340 fs [44]. Ein Nachteil von Yb:YAG ist der kleine Emissionswirkungsquerschnitt und die damit verbundenen hohen Sättigungsintensitäten, welche die Entwicklung einer geeigneten Pumpgeometrie zur effizienten optischen Anregung notwendig machen. Aufgrund der hohen Pumpleistungen müssen die thermischen und mechanischen Belastungen des Laserkristalls modelliert und bei der Berechnung eines geeigneten Laserresonators berücksichtigt werden. Zur Modenkopplung des Lasers wird das Verfahren des Phase-Selfadjust-Modelocking (PSM) angewendet, welches eine modifizierte selbststabilisierende Form der Additiv-Puls-Modenkopplung (APM) ist, und erstmals für einen Nd:YVO<sub>4</sub> Laser demonstriert wurde [41]. Dabei konnten Impulse mit einer zeitlichen Dauer von 7,6 ps und einer mittleren Leistung von 18 W erzeugt werden. Die Repetitionsrate hatte einen Wert von 165 MHz. Da das Verfahren im Gegensatz zur APM selbststabilisierend ist, entfällt die Notwendigkeit einer aktiven Stabilisierung. Weiterhin hat es gegenüber der Modenkopplung mit sättigbaren Absorbieren den Vorteil der Vermeidung von Selbstgüteschaltung bei hohen Repetitionsraten und der einfachen Übertragbarkeit auf neue Wellenlängenbereiche ohne Entwicklung spezieller sättigbarer Absorber [55]. Voraussetzung für die Anwendung der APM ist ein linear-polarisierter Laserbetrieb. Hier muss ein Konzept gefunden werden, das trotz des steigenden Einflusses von spannungsinduzierter Doppelbrechung mit zunehmender Pumpleistung einen hohen Polarisationsgrad, bei gleichzeitig hoher Ausgangsleistung, gewährleistet. Mit steigender Ausgangsleistung muss auch der Parametersatz für die APM angepasst werden.

Das zweite Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines auf einem modengekoppelten Nd:YVO<sub>4</sub>-Laser basierten synchron gepumpten pikosekunden Selbst-Raman-Lasers. Die Herausforderung besteht darin ein Konzept zu entwickeln, das trotz der konkurrie-

renden Prozesse der Impulsstabilisierung durch den Modenkopplungsprozess und der Destabilisierung durch die Raman-Konversion eine stabile Modenkopplung ermöglicht. Aufgrund dieser Problematik wurden bis jetzt Systeme meist durch aktiv gütegeschaltete Laser realisiert, wodurch sich die Impulsdauer im Bereich von einigen zehn ns befand. Basierend auf dem Raman-aktiven Material Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> wurde so beispielsweise ein aktiv gütegeschalteter Selbst-Raman-Laser mit einer Impulsenergie von 340 μJ bei einer Wellenlänge von 1181 nm demonstriert [68]. Die Impulsdauer betrug 10 ns bei einer Wiederholrate von 10-90 Hz. Bei einem weiteren Ansatz wurde die Strahlung eines gütegeschalteten Nd:YVO<sub>4</sub> Lasers resonatorintern zunächst in Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> durch stimulierte Raman-Streuung (SRS) frequenzverschoben und anschließend in einem LBO Kristall frequenzverdoppelt. Hier wurde eine Ausgangsleistung von 110 mW bei einer Wellenlänge von 1197 nm, einer Impulsdauer von 20 ns und einer Wiederholrate von 1-45 kHz erzielt. Die frequenzverdoppelte Strahlung bei einer Wellenlänge von 598 nm erreichte eine Ausgangsleistung von 5 mW [82]. Findeisen erzielte mit einem aktiv gütegeschalteten Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Selbst-Raman-Laser eine Impulsenergie von 0,1 μJ bei einer Impulsdauer von 50 ns und einer Wiederholrate von bis zu 47 Hz [26]. Basierend auf Nd:YVO<sub>4</sub> zeigte Chen einen aktiv gütegeschalteten Selbst-Raman-Laser bei einer Wellenlänge von 1176 nm mit einer Ausgangsleistung von 1,5 W bei einer Impulsdauer von 18 ns und einer Wiederholrate von 20 kHz [15]. Mit einem ähnlichen Ansatz wurde mit Nd:GdVO<sub>4</sub> eine Ausgangsleistung von 1,18 W bei einer Wellenlänge von 1521 nm und einer Impulsdauer von > 5 ns erzielt [14].

Zur Realisierung eines Selbst-Raman-Lasers mit Impulsdauern im ps-Bereich wird in dieser Arbeit erstmals ein auf einem modengekoppelten Nd:YVO<sub>4</sub>-Laser basierendes System entwickelt und charakterisiert. Dazu muss zunächst eine Modenkopplungstechnik ausgewählt werden, welche einerseits die Erzeugung ultrakurzer Impulse erlaubt, andererseits trotz des impulsdestabilisierenden Effekts der Raman-Konversion eine möglichst hohe Modenkopplungsstabilität aufweist. Anhand eines Systems mit geringer Raman-Ausgangsleistung muss zunächst der Einfluss des Raman-Prozesses auf die Modenkopplung untersucht werden. Die sich daraus ergebenden Erkenntnisse sollen im nächsten Schritt die Leistungsskalierung des Selbst-Raman-Lasers ermöglichen. Dazu müssen die für die Steigerung der Ausgangsleistung zuständigen Parameter identifiziert, sowie deren Einfluss auf die Modenkopplungsstabilität untersucht werden. Dazu zählen unter anderem die Kristalllänge, die Verstimmung der beiden Resonatoren sowie die Impulsspitzenleistung. Um die für die Raman-Konversion nötigen hohen Spitzenintensitäten zu erreichen, muss eine geeignete Resonatorgeometrie entwickelt werden. Dies wird durch den Einsatz eines *Gain-at-the-End* Resonatordesigns erreicht. Eine Steigerung der Spitzenintensität ist aber auch durch Erhöhung der resonatorin-

ternen Leistung möglich. Dies soll zum einen durch die Steigerung der Pumpleistung und zum anderen durch die Minimierung der Resonatorverluste erfolgen.

Als Anwendungsbeispiel wird die erzeugte Raman-Strahlung durch Frequenzverdopplung in den sichtbaren Spektralbereich konvertiert.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

Zur Realisierung von Ultrakurzpuls-Strahlquellen ist ein genaues Kenntnis der theoretischen Grundlagen der zur Anwendung kommenden Modenkopplungsverfahren notwendig. Die Wahl der Modenkopplungstechnik hängt dabei von den Anforderungen, welche an das zu realisierende Lasersystem gestellt werden, ab. Deshalb wird hier zunächst das Prinzip der Modenkopplung, sowie ein Überblick über die unterschiedlichen Modenkopplungstechniken gegeben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den in dieser Arbeit zur Anwendung kommenden Modenkopplungsverfahren. Dazu zählt das PSM-Verfahren und die Modenkopplung mit sättigbarem Halbleiterabsorber.

Zum Abschluss des Kapitels werden die theoretischen Grundlagen der im zweiten Teil dieser Arbeit eingesetzten stimulierten Raman-Streuung diskutiert. Ein genaues Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge ist dabei Voraussetzung für die Realisierung eines synchron gepumpten Selbst-Raman-Lasers.

### 2.1 Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse

Die Methoden zur Erzeugung von kurzen Laserimpulsen lassen sich in zwei Hauptkategorien unterteilen. Die eine Kategorie umfasst die Verfahren der Güteschaltung, die andere Kategorie die unterschiedlichen Modenkopplungsverfahren. Bei den Güteschaltungsverfahren wird die Kreisgüte des Resonators moduliert. Hier kommen z.B. akustooptische oder elektrooptische Modulatoren zum Einsatz. Durch die begrenzte Schaltgeschwindigkeit solcher Modulatoren lassen sich so jedoch nur Impulsdauern bis in den ns-Bereich erzeugen [51]. Um kürzere Impulsdauern zu erreichen, wird das Verfahren der Modenkopplung angewendet. Hiermit können so genannte ultrakurze Impulse im ps- bis hin zum fs-Bereich erzeugt werden. In den folgenden Abschnitten wird zunächst auf die theoretischen Grundlagen der Modenkopplung eingegangen

und anschließend einige typische Verfahren der Modenkopplung vorgestellt. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei der Additiv-Puls-Modenkopplung (APM) bzw. dem PSM-Verfahren und der Modenkopplung mit Hilfe sättigbarer Halbleiterabsorber geschenkt, da beide in dieser Arbeit eingesetzt werden.

### 2.1.1 Theorie der Modenkopplung

In einem Stehwellenresonator der optischen Länge  $L$  stellen die longitudinalen Resonatormoden stabile Lösungen der Wellengleichung dar. Bei Lasermaterialien mit einer großen Verstärkungsbandbreite  $\Delta\nu$  können alle longitudinalen Moden innerhalb des Verstärkungsprofils anschwingen falls sie die Laserschwelle erreichen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt.

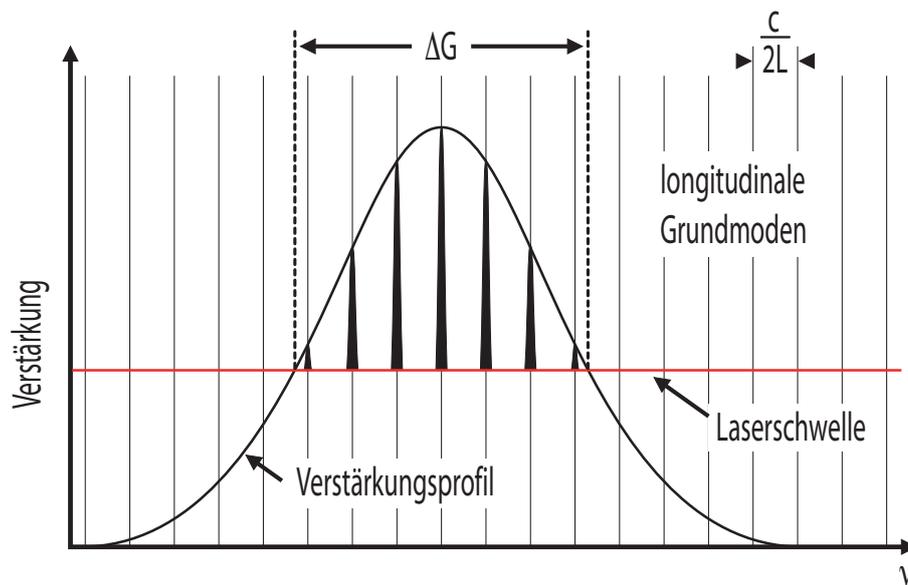


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Verstärkungsprofils mit longitudinalen Resonatormoden.

Der spektrale Abstand  $\Delta\nu$  der Moden  $q$  und  $q + 1$  beträgt dann

$$\Delta\nu_{q,q+1} = \frac{c}{2L}, \quad (2.1)$$

was gerade dem Inversen der Resonatorumlaufzeit entspricht. Dabei ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $L$  die optische Resonatorlänge. Im kontinuierlichen Betrieb haben diese Moden eine zufällige Phasenbeziehung zueinander. Durch die Superposition der einzelnen Moden ergibt sich dann ein zufälliges Zeitverhalten sowohl für das superpositionierte elektrische Feld  $E(t)$ , als auch für die vom Laser emittierte Intensität  $I(t)$ .