

# HIGH AVERAGE POWER YB:YAG THIN DISK LASER AND ITS APPLICATION FOR AN RGB LASER SOURCE

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH  
for the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

EDITH INNERHOFER

Dipl.-Phys. (Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland)

born on March 16, 1975

citizen of Willisau Land (LU) and Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. U. Keller, Supervisor

Prof. Dr. T. Esslinger, Co-Examiner

PD Dr. R. Paschotta, Co-Examiner

Mai 2005

# *Abstract*

This thesis describes the development of a passively mode-locked Yb:YAG thin disk laser with 80 W of average power in femtosecond pulses and its application as a pump source for several nonlinear optical devices.

Femtosecond lasers with high average output powers are attractive sources for many applications. Among those that greatly benefit from the high peak power of such laser systems are nonlinear wavelength conversion, micromachining and time-resolved spectroscopy.

In the first part, this thesis reports on the realization of an Yb:YAG laser delivering femtosecond pulses with unprecedented average power. This laser is based on the combination of a thin disk laser head and a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). The thin disk laser concept employs a sophisticated geometry of the gain medium that allows for high power laser operation with diffraction-limited beam quality. The SESAM on its part offers unique freedom in the design of important absorber parameters for stable and reliable passive mode locking. We demonstrate a first setup of the Yb:YAG thin disk laser for the generation of tunable pulses from 6-24 ps with up to 60 W of average power and a second setup delivering 80 W of average power in 705 fs pulses. In addition, we address the challenges that have to be overcome to scale the average power of a femtosecond thin disk laser to very high power levels.

The second part of this thesis is dedicated to how the limitations of the gain materials in terms of accessible wavelengths and obtainable pulse durations can be overcome with nonlinear optical devices. High average power mode-locked thin disk lasers with ultrashort pulse durations constitute ideal pump sources for nonlinear optical devices.

The range of accessible wavelengths can be greatly expanded by nonlinear frequency conversion. A first application of nonlinear frequency conversion is the generation of red, green, and blue (RGB) laser beams for large-scale projection displays. We experimentally demonstrate and numerically analyze an RGB laser system based on a high power femtosecond laser and subsequent frequency conversion stages that presents, compared to previously demonstrated systems, some significant advances in terms of simplicity and practicability. The pump source for the nonlinear conversion stages consists of a single laser oscillator without any amplifier stages. The system does not require any resonant cavities, and all nonlinear crystals except one are operated at room temperature. The RGB laser source simultaneously generates average powers of 8 W at 603 nm, 23 W at 515 nm, and 10.1 W at 450 nm.

The remaining temperature-stabilized crystal in the optical parametric generator (OPG) of the RGB system can in the future be replaced with a crystal operated at room temperature without temperature stabilization. We present a room temperature OPG based on MgO-doped LiTaO<sub>3</sub> with a signal average power of up to 2.4 W at a wavelength of 1484 nm. Even higher powers in the signal and idler waves can be generated with a *fiber-feedback* optical parametric oscillator (OPO). A *fiber-feedback* OPO is a high gain OPO with a signal feedback through a single-mode fiber. It exhibits attractive properties such as a compact setup, low sensitivity to cavity losses and low sensitivity to detuning of the cavity length. We report on a *fiber-feedback* OPO generating 19 W of average power in 840-fs pulses at a wavelength of 1448 nm.

The obtainable range of pulse durations of a thin disk laser is set by the laser material and can be expanded with external pulse compression. We demonstrate pulse compression in a large mode area microstructured (holey) fiber to a pulse duration of 24 fs while maintaining an average power of 32 W at the full laser repetition rate of 57 MHz. This system delivers 16 MW of peak power in a linearly polarized and nearly diffraction-limited beam. With such performance, applications in strong-field physics at unprecedented repetition rates are within reach.

## *Kurzfassung (German)*

Diese vorliegende Doktorarbeit beschreibt die Entwicklung eines passiv modengekoppelten Scheibenlasers mit einer hohen mittleren Leistung von 80 W in Femtosekundenpulsen und seine Anwendung als Pumpquelle für verschiedene nichtlineare optische Systeme.

Modengekoppelte Laser mit hoher mittlerer Ausgangsleistung sind attraktiv für eine Vielzahl von Anwendungen. Beispiele für Anwendungen, welche von der hohen Spitzenleistung solcher Laser profitieren sind nichtlineare Frequenzkonversion, Feinbearbeitung von Werkstoffen oder zeitaufgelöste Spektroskopie.

Der erste Teil dieser Doktorarbeit beschreibt die Realisierung eines Yb:YAG Lasers mit Femtosekundenpulsen und einer bisher unerreichten hohen mittleren Leistung. Dieser Laser basiert auf der Kombination von einem Scheibenlaser mit einem sättigbaren Halbleiterspiegel (SESAM). Das Scheibenlaserkonzept verwendet eine raffinierte Geometrie des Verstärkermediums, welches hohe Leistungen mit beugungsbegrenzter Strahlqualität ermöglicht. SESAMs ihrerseits bieten eine einzigartige Freiheit in der Wahl der relevanten Absorberparameter, um stabile und zuverlässige Modenkopplung zu erreichen. Wir stellen einen ersten Laseraufbau des Yb:YAG-Scheibenlasers vor für die Erzeugung von abstimmbaren Pulsdauern von 6-24 ps mit einer mittleren Leistung von bis zu 60 W und einen zweiten Aufbau für die Erzeugung einer mittleren Leistung von 80 W in Pulsen von 705 fs Dauer. Weiter sprechen wir die Herausforderungen an, die zur Skalierung eines Scheibenlasers mit Femtosekundenpulsen zu sehr hohen mittleren Ausgangsleistungen überwunden werden müssen.

Der zweite Teil dieser Doktorarbeit widmet sich der Überwindung der Einschränkungen der Lasermaterialien für Hochleistungs-Femtosekundenlaser

in Bezug auf deren erreichbare Wellenlängen und möglichen Pulsdauern. Modengekoppelte Scheibenlaser mit hoher mittlerer Leistung und Femtosekundenpulsen stellen ideale Pumpquellen für nichtlineare optische Systeme dar.

Der Bereich zugänglicher Wellenlängen kann mit nichtlinearer Frequenzkonversion bedeutend erweitert werden. Eine erste Anwendung nichtlinearer Frequenzkonversion in dieser Doktorarbeit ist die Erzeugung von roten, grünen und blauen (RGB) Laserstrahlen für grossflächige Projektionen von Bildern oder Filmen. Wir stellen experimentelle Resultate und eine ausführliche numerische Analyse einer RGB Laserquelle vor, die auf einem Hochleistungs-Femtosekundenlaser und auf aufeinanderfolgenden Frequenzkonversionsstufen basiert und bedeutende Fortschritte im Vergleich zu früher demonstrierten Systemen im Bezug auf Einfachheit und praktischer Anwendbarkeit beinhaltet. Die ganze für die nichtlinearen Frequenzkonversionsstufen benötigte Pumpleistung wird durch einen einzelnen Laseroszillator ohne Verstärkerstufen bereitgestellt. Das System benötigt keine resonanten Kavitäten, und alle nichtlinearen Kristalle bis auf einen werden bei Raumtemperatur betrieben. Die RGB-Laserquelle erzeugt gleichzeitig mittlere Leistungen von 8 W bei 603 nm, 23 W bei 515 nm und 10.1 W bei 450 nm.

Der letzte temperatur-stabilisierte Kristall im optisch parametrischen Generator (OPG) der RGB Laserquelle wird in Zukunft ebenfalls mit einem Kristall ersetzt werden können, der bei Raumtemperatur ohne Temperaturstabilisierung betrieben wird. Deshalb demonstrieren wir einen OPG basierend auf MgO-dotiertem LiTaO<sub>3</sub> mit einer mittleren Signalleistung von bis zu 2.4 W bei einer Wellenlänge von 1448 nm. Noch höhere mittlere Leistungen von Signal- und Idlerwellen können mittels eines *fiber-feedback* optisch parametrischen Oscillators (OPO) erzeugt werden. Ein *fiber-feedback* OPO ist ein OPO mit einer hohen parametrischen Verstärkung und mit Signalerückkopplung durch eine Faser. Dieses System weist attraktive Eigenschaften auf wie zum Beispiel einen kompakten Aufbau und eine geringe Empfindlichkeit auf Kavitätsverluste sowie auf Veränderungen der Kavitätslänge. Wir berichten über einen *fiber-feedback* OPO mit 19 W mittlerer Leistung in 840 fs Pulsen bei einer Signalwellenlänge von 1448 nm.

Der Bereich von zugänglichen Pulsdauern eines Scheibenlasers ist durch die Lasermaterialien eingeschränkt und kann mittels externer Pulsverkürzung deutlich erweitert werden. Wir demonstrieren Pulsverkürzung in einer mikrostrukturierten Faser mit grosser effektiver Querschnittsfläche zu einer Pulsdauer von 24 fs unter Beibehaltung einer hoher mittleren Leistung von 32 W bei der vollen Pulswiederholrate des Lasers von 57 MHz. Die Spitzenleistung dieses Systems beträgt 16 MW in einem linear polarisierten und nahezu beugungsbegrenzten Strahl. Mit einer solcher Leistung könnten Experimente im Gebiet der Hochintensitätsphysik mit bisher unerreicht hohen Pulswiederholraten möglich werden.