



Doctoral Thesis

New frontiers in ultrafast high power laser oscillators

Author(s):

Baer, Cyrill Roman Emmanuel

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006392270> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 19421

New Frontiers in Ultrafast High Power Laser Oscillators

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

CYRILL ROMAN EMMANUEL BAER

MSc in Physics, University of Basel (Switzerland)

born on January 18, 1981

citizen of

Herisau (AR) and Zürich (ZH), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ursula Keller, Supervisor
Prof. Dr. Günter Huber, Co-Examiner
Dr. Thomas Südmeyer, Co-Examiner

December 2010

Abstract

During the last decades, lasers have become an indispensable tool in many areas of science and technology. High energy ultrafast laser pulses can reach electrical field strengths that are comparable to those that keep atoms, molecules and solids together. These laser pulses with a typical duration of 10^{-12} to 10^{-15} s can be tightly focused in space in order to investigate and manipulate atomic systems. Possible applications in high field physics are photoelectron imaging spectroscopy or high harmonic generation (HHG). In materials processing these ultrafast laser pulses can be used for cutting, drilling or structuring with unprecedented accuracy. The focus of this thesis is the development of new laser sources that improve the performance of these applications.

Today, most of these applications rely on complex amplifier systems. In particular high field physics experiments are typically driven by Ti:sapphire amplifier systems that provide pulse durations in the order of 30 fs but suffer from low average powers around the ten watt level and repetition rates in the kilohertz regime. A laser source operating at megahertz repetition rate would allow a better signal-to-noise ratio or a shorter measurement time. In materials processing such a laser source would enable faster working speeds and could therefore increase the productivity. However, the combination of high repetition rates and high pulse energies requires high average powers. Mode-locked oscillators provide a simple and reliable way to generate multi-megahertz pulse trains and can offer substantially higher average powers compared to Ti:sapphire amplifier systems.

This thesis describes the development of mode-locked oscillators that generate higher pulse energies and higher average powers than previous oscillators. All lasers presented here are based on the thin disk technology that provides the required beam quality and power levels. We use semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) to initiate and stabilize the mode locking process. At the beginning of this research, the only gain material suitable for the generation of high average powers in the thin disk laser was Yb:YAG ($\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). With this material an average power of 80 W and a pulse duration of 700 fs had been realized already in 2004. However, the achieved output pulse energy of 1.3 μJ and peak power of 1.7 MW was too low for high field physics experiments or most micromachining applications.

The first project described in this thesis resulted in an increase in pulse energy beyond 10 μJ with a comparable pulse duration of 790 fs. This pulse energy and the corresponding peak power of 12.5 MW are now sufficient for certain high field physics experiments or micromachining applications.

The initial choice of Yb:YAG was motivated by its excellent suitability for high power continuous-wave (cw) operation. However, its limited gain bandwidth makes it challenging to reach pulse durations below 700 fs in a high power thin disk configuration. In the framework of this thesis we investigated new materials for ultrafast thin disk lasers, which have a broader gain bandwidth and are therefore better suited for the generation of short pulses. We presented the first mode-locked Yb:LuScO₃ thin disk laser that generated an average power of 7.2 W and supported a pulse duration of 227 fs. This is the shortest pulse duration so far realized in a thin disk laser. The average power was limited by growth defects in the disk. With an optimized disk quality substantially higher average powers and pulse durations below 200 fs can be expected.

Moreover, we investigated in detail mode locking and power scaling of the gain material Yb:Lu₂O₃. With the first realization of a mode-locked Yb:Lu₂O₃ thin disk laser we achieved pulse durations of 370 fs and an average power of 20.5 W. For slightly longer pulses we obtained an optical-to-optical efficiency of 43%, which is higher than for previous mode-locked thin disk lasers. With a careful cavity design and SESAMs with suitable parameters we successively increased the output power to 63 W, 103 W and finally 141 W, which is currently the highest average power reported from a mode-locked laser oscillator. A dynamic compensation of the thermal lens was particularly important to achieve stable mode-locked operation at these average output power levels. In multi-mode cw operation we demonstrated power scaling up to 301 W with an optical-to-optical efficiency of 73% and a slope efficiency of 85%. These efficiencies are higher than for any other thin disk material.

Our results clearly demonstrate that Yb:Lu₂O₃ is better suited for high power mode-locked and cw operation than the previous de-facto standard material Yb:YAG. We believe that this material bears the potential for a further increase in average power and pulse energy from mode-locked oscillators.

Kurzfassung (German)

In den vergangenen Jahrzehnten sind Laser zu einem wichtigen Bestandteil von Wissenschaft und Technik geworden. Hochenergetische ultrakurze Laserpulse können elektrische Feldstärken erreichen, die vergleichbar sind mit denjenigen, die Atome, Moleküle und Festkörper zusammenhalten. Diese Laserpulse mit einer typischen Zeitdauer von 10^{-12} bis 10^{-15} s können räumlich sehr stark fokussiert werden und eignen sich hervorragend zur Untersuchung und Bearbeitung von einzelnen Atomen oder Festkörpern. Mögliche wissenschaftliche Anwendungen sind Photoionisationsexperimente zur Untersuchung von Elektronenstrukturen oder die Erzeugung von höheren Harmonischen (HHG). In der Materialbearbeitung eignen sich diese Laserpulse zum Schneiden, Bohren oder Strukturieren unterschiedlicher Materialien mit hoher Präzision. Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung von Laserquellen, mit denen sich diese Anwendungen besser bewerkstelligen lassen.

Heutzutage sind die meisten dieser Anwendungen auf komplexe Laserverstärkersysteme angewiesen. Physikalische Experimente die sehr hohe Feldstärken benötigen, werden meist unter Verwendung von Ti:Saphir Verstärkersystemen durchgeführt, da diese kurze Pulsdauern unterhalb von 50 fs ermöglichen. Andererseits lassen diese Systeme nur geringe mittlere Ausgangsleistungen von typischerweise weniger als 20 Watt bei Repetitionsraten im Kilohertz-Bereich zu. Modengekoppelte Laseroszillatoren sind für Repetitionsraten von mehreren Megahertz wesentlich besser geeignet und bieten deutlich höhere mittlere Ausgangsleistungen als Ti:Saphir Verstärkersysteme. Bei geeigneter Pulsenergie liessen sich mit einer solchen Laserquelle ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis oder kürzere Messzeiten realisieren. In der Materialbearbeitung würde eine derartige Laserquelle schnellere Bearbeitungsgeschwindigkeiten erlauben und somit die Produktivität steigern. Allerdings verlangt die Kombination von hohen Pulsenergien und Repetitionsraten nach sehr hohen Durchschnittsleistungen.

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung von modengekoppelten Laseroszillatoren, die höhere Pulsenergien und Durchschnittsleistungen erreichen als bisherige Oszillatoren. Alle vorgestellten Laser basieren auf der Scheibenlasertechnologie, welche die benötigte Strahlqualität und Ausgangsleistung ermöglicht. Zum Starten

XXVI – Kurzfassung (German)

und Stabilisieren des Modenkoppelns werden sättigbare Halbleiterspiegel (SESAMs) verwendet. Zu Beginn dieser Doktorarbeit gab es nur ein Scheibenlasermaterial, das für hohe Durchschnittsleistungen geeignet war: Yb:YAG ($\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Bereits im Jahre 2004 wurde mit diesem Material eine mittlere Ausgangsleistung von 80 W bei einer Pulsdauer von 700 fs realisiert. Die damit erreichte Pulsenergie von 1.3 μJ mit einer Spitzenleistung von 1.7 MW war jedoch noch zu gering für die meisten wissenschaftlichen Anwendungen im Bereiche hoher Feldstärken und Mikrobearbeitungsanwendungen.

In einem ersten Projekt dieser Arbeit wurde die Pulsenergie auf über 10 μJ bei einer nahezu unveränderten Pulsdauer von 790 fs erhöht. Diese Pulsenergie und die entsprechende Spitzenleistung von 12.5 MW machen nun die oben genannten Anwendungen besser zugänglich

Yb:YAG wurde als erstes Verstärkermaterial ausgesucht, da es sich hervorragend für den Dauerstrichbetrieb bei hohen Ausgangsleistungen eignet. Allerdings bietet dieses Material nur eine geringe Verstärkungsbandbreite, was die Erzeugung von Pulsdauern unter 700 fs bei hohen Ausgangsleistungen erschwert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden neue Materialien im modengekoppelten Scheibenlaserbetrieb getestet, die grössere Verstärkungsbandbreiten aufweisen und daher besser zur Erzeugung von kurzen Pulsen geeignet sind. Der erste modengekoppelte Scheibenlaser basierend auf dem Verstärkermaterial Yb:LuScO₃ erreichte eine mittlere Ausgangsleistung von 7.2 W bei einer Pulsdauer von 227 fs, was den kürzesten Pulsen entspricht, die je in einem Scheibenlaser realisiert wurden. Die Ausgangleistung war limitiert durch Wachstumsfehler in der Scheibe. Bei einer optimalen Scheibenqualität sollten höhere mittlere Ausgangsleistungen und Pulsdauern unter 200 fs möglich sein.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit war die detaillierte Untersuchung des Lasermaterials Yb:Lu₂O₃ bezüglich der Kurzpulserzeugung und Leistungskalierung. Mit dem ersten modengekoppelten Yb:Lu₂O₃ Scheibenlaser wurde eine Pulsdauer von 370 fs bei einer Ausgangsleistung von 20.5 W erreicht. Mit etwas längeren Pulsdauern wurde ein optischer Wirkungsgrad von 43% erzielt, was verglichen mit bisherigen modengekoppelten Scheibenlasern dem höchsten Wert entspricht. Mit einem geeigneten Kavitätsdesign und SESAMs mit angepassten Parametern wurde die Ausgangsleistung schrittweise über 63 W und 103 W auf

schliesslich 141 W erhöht. Dies entspricht derzeit der weltweit höchsten mittleren Ausgangsleistung eines modengekoppelten Laseroszillators. Eine dynamische Kompensation der thermischen Linse war von entscheidender Wichtigkeit um stabilen Pulsbetrieb auf diesem Leistungsniveau zu erreichen. Im mehrmodigen Dauerstrichbetrieb ermöglichte Yb:Lu₂O₃ eine Ausgangsleistung von 301 W bei einem optischen Wirkungsgrad von 73% und einem differentiellen Wirkungsgrad von 85%. Diese Wirkungsgrade übertreffen diejenigen aller bisherigen Scheibenlasermaterialien.

Diese Ergebnisse zeigen eindeutig, dass Yb:Lu₂O₃ sowohl für den modengekoppelten als auch für den Dauerstrichbetrieb besser geeignet ist, als der bisherige de-facto Industriestandard Yb:YAG. In Zukunft sind von diesem Material noch höhere Ausgangsleistungen und Pulsenergien zu erwarten.