

DISS. ETH NO. 20917

**CUTTING-EDGE HIGH-POWER ULTRAFAST OSCILLATORS:
PUSHING THE LIMITS OF SESAM MODELOCKED THIN-DISK LASERS**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

CLARA JODY SARACENO

Diplôme d'Ingénieur, Institut d'Optique Graduate School (Palaiseau, France)

born on September 13, 1983

citizen of

Argentina, Italy, and United States of America

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. U. Keller, Supervisor

Prof. Dr. P. Georges, Co-Examiner

Prof. Dr. T. Südmeyer, Co-Examiner

December 2012

Abstract

Ultrafast lasers sources are one of the main scientific achievements of the past decades. Finding new avenues to obtain higher average powers from these sources is currently a topic of important research efforts. Such high peak power and high repetition rate sources have a strong impact on a wide range of applications both in industry - for high-speed and high-precision micromachining - and in scientific research - for example for experiments in strong-field physics. One prominent application field in this area is the generation of high-harmonic radiation at increased photon flux, which is an elegant way of extending current coherent sources to the vacuum ultraviolet and extreme ultraviolet wavelength regions. This very rich application field is one of many strong motivations to push the limits of existing and emerging ultrafast laser technologies.

The main technological challenges that arise from the combination of high average and peak powers are mainly an excessive heat deposition in the gain medium and a too large nonlinearity accumulated by the pulses during propagation. In the past few years, several clever geometries have been suggested to overcome these limitations. Most of them are based on amplification schemes that require a low-power seed oscillator and several amplifying stages to reach the targeted high average power. In this thesis, we focus on pushing the performance of semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) modelocked thin-disk lasers (TDLs). These power-scalable ultrafast lasers enable high average powers and femtosecond operation directly from a single oscillator, without the need for additional amplification stages. Several important steps were performed during this thesis to push this technology to new limits.

Up-to-date, the limitations of SESAM technology in terms of damage and lifetime were not thoroughly investigated and contradictory information on damage thresholds was reported. During this thesis, we carried out a detailed study of damage and lifetime of SESAMs designed for high-power femtosecond oscillators. We established simple guidelines to design robust SESAMs with high-damage thresholds and optimized

parameters for operation at extreme intracavity conditions. The SESAMs developed following these guidelines were key to the demonstration of all the cutting-edge lasers presented in this work.

The scientific applications targeted by the sources developed during this thesis require short pulse durations (sub-100 fs). Current state-of-the-art TDLs are restricted in this aspect to > 500 fs. Extending the high-power capabilities of TDLs to the sub-100 fs regime is, therefore, a major milestone, which is intimately linked to the development of novel broadband materials suitable for this geometry. During this thesis, we explored the limits in terms of pulse duration of modelocked TDLs based on different gain materials and achieved a first important step in this direction, with the demonstration of sub-100 fs pulses from a TDL based on the sesquioxide gain material Yb:LuScO_3 (LuScO). In these first experiments, sub-100 fs operation was achieved at moderate average output powers (5 W). However, preliminary power scaling experiments indicate that much higher output powers are within reach. Furthermore, the intracavity peak power levels achieved are already high enough for preliminary intralaser nonlinear optics experiments.

The progress achieved in terms of pulse duration enabled us to explore for the first time the carrier-envelope phase properties of these sources. We measured the carrier-envelope offset (CEO) frequency of a TDL, which will allow us to fully stabilize such a source. This experiment shows that TDLs are excellent candidates for applications in spectroscopy and metrology, where high-power frequency combs are of interest.

In addition to exploring the pulse duration limits of TDLs, we pushed the average power of modelocked oscillators to a new limit with the demonstration of a femtosecond oscillator with 275 W – the highest average power reported from an ultrafast oscillator to date. The laser was based on the gain material Yb:YAG, operated with a pulse duration of 583 fs and had a pulse energy of 16.9 μJ . This performance was obtained by operating the laser oscillator in a vacuum environment to eliminate the parasitic nonlinearity of the air inside the oscillator. This new approach is an important step forward to reaching the kilowatt average power level milestone.

The results presented in this thesis indicate that short enough pulses

and sufficient peak power to drive strong-field physics experiments directly from a single high-power TDL should be within reach. In the meantime, temporal pulse compression of state-of-the-art TDLs is essential. Two promising pulse compression techniques – using rod-type fiber amplifiers and gas-filled hollow-core Kagome-type photonic crystal fibers (PCF) – were explored during this thesis.

The cutting-edge lasers developed during this thesis enable exciting new applications, and open the door to further extending the current performance milestones.

Résumé

Les sources lasers à impulsions ultra-courtes représentent l'une des inventions les plus importantes de ces dernières décennies. De nombreux efforts de recherche visent actuellement à augmenter la puissance moyenne de ces sources. Cette thématique est portée par le grand nombre d'applications nécessitant des sources laser de puissance crête élevée et à haute cadence. Le secteur industriel montre, en effet, un intérêt croissant pour ces sources dans le domaine du micro-usinage rapide et de haute précision. Pour des applications de physique fondamentale, ce type de source se révèle également la clé de nouvelles avancées, comme par exemple dans le domaine de l'interaction laser-matière. Un exemple majeur concerne la génération d'harmoniques d'ordre élevé à haut flux de photons, représentant une alternative élégante pour étendre les sources cohérentes actuelles dans le domaine de longueur d'onde de l'ultraviolet extrême. La richesse des champs d'application ouverts par de telles sources est l'une des motivations essentielles qui ont conduit à développer les technologies existantes.

Les principaux défis technologiques pour combiner une puissance moyenne élevée et une puissance crête importante résident dans une extraction efficace de la chaleur générée dans le milieu à gain, et dans la réduction des nonlinéarités engendrées lors de la propagation des impulsions. Au cours des décennies passées, plusieurs géométries ont été suggérées afin de réduire au mieux ces limitations. Dans cette thèse, nous nous intéressons à la technologie des lasers à disque mince, pour lesquels le verrouillage des modes en phase est effectué passivement à l'aide d'absorbants saturables à semiconducteur (SESAM). Cette technologie permet de combiner des puissances moyennes élevées avec des impulsions ultra-courtes directement en sortie d'oscillateur. Plusieurs avancées cruciales ont été réalisées dans le cadre de cette thèse, repoussant une fois de plus les limites de ce type de sources.

L'obtention de puissances moyennes plus élevées et de durées d'impulsion plus courtes avec cette technologie repose sur les capacités des

SESAMs à opérer à des niveaux de puissance crête élevés. De nombreuses informations contradictoires ont été reportées dans la littérature à ce sujet. Cette thèse a permis une étude détaillée de la durée de vie et des seuils de dommage de SESAMs conçus spécialement pour des oscillateurs à haute puissance. Nous en avons déduit des règles simples pour la fabrication de SESAMs optimisés pour opérer dans des conditions intra-cavité extrêmes. Les SESAMs ainsi développés ont été l'un des facteurs clés dans la démonstration des résultats obtenus dans le cadre de cette thèse.

Les sources développées pendant cette thèse visaient principalement à des applications scientifiques où l'obtention d'impulsions courtes (< 100 fs) est un point essentiel. Les lasers ultra-rapides à disque mince atteignent de nos jours des puissances crête de l'ordre de plusieurs dizaines de MW mais restent typiquement limités à des durées d'impulsion supérieures à 500 fs. D'importants efforts de recherche visent à réduire la durée d'impulsion de ces sources. Cet objectif est étroitement lié au développement de nouveaux matériaux laser à large bande spectrale de gain, appropriés pour cette géométrie laser. Au cours de cette thèse, nous avons exploré les limites de ces sources en terme de durée d'impulsion, et nous avons démontré que cette technologie peut atteindre des durées d'impulsion inférieures à 100 fs, grâce à un laser à disque mince basé sur le milieu à gain Yb:LuScO_3 . Bien que cette première réalisation atteigne des puissances moyennes de sortie modérées (5 W), les premières expériences visant à augmenter la puissance moyenne sont prometteuses. De plus, les performances intracavité obtenues constituent déjà une alternative intéressante à exploiter dans le cadre d'expériences non-linéaires.

Le progrès ainsi réalisé en terme de durée d'impulsion nous a permis d'explorer pour la première fois les propriétés du décalage enveloppe-porteuse de ce type de source. Par cette première mesure de la fréquence de décalage enveloppe-porteuse d'un laser à disque mince, nous démontrons l'un des points essentiels à la stabilisation de ce type de source et à son utilisation en tant que peigne de fréquence. Ceci prouve que cette technologie représente un excellent candidat pour des applications de spectroscopie et de métrologie optique.

Nous avons également réalisé un laser femtoseconde à disque mince atteignant une puissance moyenne de 275 W. Ce laser correspond à

l'oscillateur femtoseconde délivrant la plus haute puissance moyenne jamais démontrée à ce jour. Ce laser, basé sur le milieu classique à gain Yb:YAG, permet d'atteindre une durée d'impulsion de 583 fs et une énergie de 16.9 μ J. Une telle performance a été rendue possible grâce à la mise sous vide de l'oscillateur, permettant de réduire les effets non-linéaires parasites dans l'air au sein de la cavité laser. Cette approche représente une étape importante dans le développement d'oscillateurs femtoseconde d'une puissance moyenne de l'ordre du kilowatt.

La compression temporelle des impulsions en sortie du laser est essentielle pour atteindre les durées d'impulsion visées. Deux approches seront présentées dans cette thèse, basées sur différentes géométries fibrées.

Les systèmes laser développés pendant cette thèse ouvrent la voie vers de nouvelles applications et de nouveaux développements permettant d'améliorer les performances actuelles.