

DISS. ETH NO. 22514

# **GIGAHERTZ FREQUENCY COMBS FROM HIGH-POWER DIODE-PUMPED SOLID-STATE LASERS**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ALEXANDER KLENNER

Dipl.-Phys., Freie Universität Berlin

born on 07.05.1986

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ursula Keller, examiner  
Prof. Dr. Tobias J. Kippenberg, co-examiner

2015

# *Abstract*

This thesis describes the most recent research on compact state-of-the-art modelocked gigahertz laser sources to generate self-referenced high-power frequency combs.

Self-referenced optical frequency combs offer a phase-stable link from optical spectra to the radio and microwave range. They allow the characterization of optical frequencies with highest precision and therefore provide the basis for precision applications of optical metrology, e.g. optical clocks. Stabilized optical frequency combs require locking of the pulse repetition frequency and the carrier-envelope-offset frequency.

Frequency combs with gigahertz line-spacing and a high power per comb-line are very beneficial for various applications. The generation of such high-power frequency combs requires gigahertz lasers which are usually based on Ti:sapphire or fiber systems. However, both laser technologies have crucial disadvantages which hinder wide spread industrial applications. Ti:sapphire lasers are pumped using cumbersome and expensive green lasers. Moreover, these lasers use Kerr-lens modelocking to generate ultrashort femtosecond pulses, which requires a complex spatiotemporal coupling in the laser cavity. Pulsed fiber lasers with gigahertz repetition rates suffer from strongly reduced power. This often makes additional power amplifiers necessary, which degrade the noise performance of the laser system.

An excellent laser technology for gigahertz frequency combs is diode-pumped solid-state lasers. They combine the advantages of low-noise high-Q cavities, direct diode-pumping and reliable modelocking with semiconductor saturable absorbers (SESAMs).

During the work for this thesis, state-of-the-art diode-pumped solid-state lasers with gigahertz pulse repetition rates have been developed and used for frequency comb

generation. For the first time, the CEO frequency of a gigahertz diode-pumped solid-state laser was successfully phase-locked.

The CEO frequency detection in a self-referenceable scheme requires an octave-spanning optical spectrum with a high temporal coherence. Laser pulses are efficiently spectrally broadened in a photonic crystal fiber to generate such a supercontinuum. Ultrashort femtosecond pulses with kilowatt peak power must be used to preserve the temporal coherence during that process. These parameters set a challenge for gigahertz lasers because pulse energy and peak power are reduced at such high repetition rates.

The diode-pumped bulk solid-state lasers presented in this thesis deliver more than 20 kW of peak power and pulse durations of 60 fs, which represents a major improvement compared to former diode-pumped gigahertz lasers. A high peak power of more than 7 kW is achieved even at high repetition rates of more than 5 GHz, which before was only accessible with Ti:sapphire lasers. A combination of multiple key elements enables this performance. Particularly important is robust SESAM modelocking of gigahertz cavities based on the novel broadband gain material Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> (Yb:CALGO) and reliable pumping with industrial grade laser diodes which enables the high average output power. In addition a proper cavity design is required to limit Q-switching instabilities at these high repetition rates. An all-optical Q-switching limiter was used as a passive stabilization mechanism to obtain stable continuous-wave modelocking at gigahertz repetition rates with Yb:CALGO. Due to the performance of these lasers no amplification and/or pulse compression stages are necessary for coherent supercontinuum generation, which enables very compact, reliable and cost-effective gigahertz frequency combs.

The high potential of diode-pumped solid-state lasers for high-power frequency combs was demonstrated by the first CEO-frequency phase-stabilization of a SESAM-modelocked thin disk laser. This experiment is an essential step towards stabilized frequency combs with more than 100-W average output power directly from an MHz-laser oscillator. Thin disk lasers as well as the high-power diode-pumped gigahertz solid-state lasers are pumped with multi-spatial-mode laser diodes. It was generally assumed that the higher noise of those pump lasers would prevent CEO-stabilized frequency combs. The successful thin disk experiment

provided insights into the requirements for frequency comb locking. This knowledge ultimately led to the first CEO-frequency phase-lock of a diode-pumped gigahertz solid-state laser. Especially the careful design of the phase-locked-loop turned out to be essential for the successful CEO-stabilization. The electronics consisted of analogue and digital parts, combined with a homebuilt noise-filter and current transducer. The fast and strong feedback loop enabled a tight phase-lock of the CEO frequency from a diode-pumped gigahertz solid-state laser, which is a milestone for frequency combs with unprecedented power per comb line.

The results of research on CEO-stabilization of multi-spatial-mode diode-pumped solid-state lasers with gigahertz repetition rates pave the way for the next generation of compact and reliable high-power frequency combs.

# Kurzfassung

Die vorliegende Doktorarbeit beschreibt die jüngste Forschung an hochmodernen ultrakompakten gepulsten Laserquellen der Gigahertzklasse zur Erzeugung selbstreferenzierter Hochleistungsfrequenzkämme.

Selbstreferenzierte optische Kämmen erlauben eine phasen-stabile Verknüpfung optischer Spektren mit dem Radio- und Mikrowellenbereich. Sie ermöglichen die Bestimmung von optischen Frequenzen mit höchster Genauigkeit und bilden damit die Basis für viele Präzisionsanwendungen der optischen Metrologie, wie beispielsweise optische Atomuhren. Die Nutzung eines optischen Frequenzkamms erfordert die Stabilisierung der Pulsrepetitionsfrequenz und der Träger-Einhüllenden-Verschiebungsfrequenz (engl.: carrier-envelope-offset CEO frequency).

Von besonderem Vorteil sind Frequenzkämme mit einem Linienabstand im Gigahertzbereich und einer hohen Leistung pro Kammmode. Die zur Erzeugung solcher Hochleistungsfrequenzkämme erforderlichen Gigahertzlaser basieren normalerweise auf Ti:Saphir- oder Faserlasersystemen. Allerdings haben beide Lasertechnologien entscheidende Nachteile, welche die breite industrielle Anwendung verhindert. Für Ti:Saphir-Laser werden komplexe und teure grüne Pump Laser benötigt. Ausserdem wird Kerr-Linsen-Modenkopplung zur Erzeugung kurzer Femtosekundenpulse verwendet, welche eine komplexe Kopplung der Laserkavität Geometrie und Pulseerzeugung bedingt. Gepulste Faserlaser mit Repetitionsraten im Gigahertzbereich leiden unter stark reduzierten Ausgangsleistungen, die oftmals zusätzliche Leistungsverstärker notwendig machen und damit das Rauschniveau verschlechtern.

Eine exzellente Lasertechnologie für Gigahertzfrequenzkämme sind diodengepumpte Festkörperlaser. Sie verbinden die Vorteile rauscharmer Kavitäten hoher Güte, direktem Diodenpumpen und zuverlässiger Modenkopplung mittels sättigbarer Halbleiterabsorberspiegel (SESAMs).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden hochmoderne diodengepumpte Festkörperlaser mit Pulswiederholraten im Gigahertzbereich entwickelt und zur Frequenzkammerzeugung verwendet. Erstmals ist es gelungen, die CEO-Frequenz eines diodengepumpten Festkörperlaser der Gigahertzklasse zu phasenstabilisieren.

Das zur selbstreferenzierender CEO-Frequenzmessung notwendige optische Spektrum muss eine Oktave überspannen und eine hohe zeitliche Kohärenz aufweisen. Zur Erzeugung dieses sog. Superkontinuums werden die Laserpulse in einer photonischen Kristallfaser hocheffizient spektral verbreitert. Die Kohärenz bleibt während dieses Vorgangs jedoch nur erhalten, sofern ultrakurze Femtosekundenpulse mit einigen Kilowatt Spitzenleistung verwendet werden. Diese Parameter stellen hohe Anforderungen an Lasersysteme der Gigahertzklasse, da bei solch hohen Repetitionsraten Pulsenergie und Spitzenleistung reduziert sind.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten diodengepumpten Festkörperlaser stellen eine bedeutende Weiterentwicklung bisheriger Gigahertzsysteme dar. Sie erreichen mit über 20 kW weitaus höhere Spitzenleistungen und mit 60 fs sehr viel kürzere Pulsdauern als bislang von diodengepumpten Gigahertzlasern erreicht werden konnte. Auch bei hohen Repetitionsraten von mehr als 5 GHz werden Spitzenleistungen von mehr als 7 kW erzeugt, welche zuvor nur mit Ti:Saphir-Lasern erreicht wurden. Eine Vielzahl von Schlüsselementen wurde zum Erreichen dieser Leistungsstärke vereint. Dazu zählen insbesondere die robuste SESAM-Modenkopplung von Gigahertzkavitäten basierend auf dem neuartigen breitbandig-emittierenden Lasermaterial  $\text{Yb:CaGdAlO}_4$  (Yb:CALGO), und das zuverlässige Pumpen mittels Hochleistungsdiolenlasern von Industriequalität zum Erreichen hoher Ausgangleistungen. Zusätzlich ist ein geeigneter Kavitätäsentwurf notwendig, um Instabilitäten aufgrund passiver Güteschaltung bei hohen Repetitionsraten zu begrenzen. Es wurde ein voll-optischer Güteschaltungsbegrenzer als passiver Stabilisierungsmechanismus genutzt, um stabile kontinuierliche Modenkopplung mit Yb:CALGO bei Gigahertzrepetitionsraten zu erhalten. Der Erfolg dieser Laser macht zusätzliche Leistungsverstärker und Pulskompressionsstufen unnötig und ermöglicht sehr kompakte, zuverlässige und kostenreduzierte Quellen für optische Kämme der Gigahertzklasse.

Das hohe Potential diodengepumpter Festkörperlaser als Quellen für Hochleistungsfrequenzkämme wurde demonstriert durch die erstmalige Phasenstabilisierung der CEO-Frequenz eines SESAM-modengekoppelten Scheibenlasers. Dies ist ein essentieller Schritt in Richtung stabilisierter Frequenzkämme mit mehr als 100 W mittlerer Ausgangsleistung direkt von einem MHz-Laseroszillator. Sowohl Scheibenlaser, als auch die diodengepumpten Gigahertzlaser werden mit sehr leistungsfähigen Diodenlasern (mehrfach Transversalmodenlaser) gepumpt, welche aufgrund erhöhten Rauschens gemeinhin als unbrauchbar für CEO-stabile Frequenzkämme angesehen wurden. Der Erfolg des Scheibenlaserexperiments gestattete tieferen Einblick in notwendigen Bedingungen der Frequenzkammstabilisierung. Diese Erkenntnisse führten schließlich zur erstmaligen Phasenstabilisierung der CEO-Frequenz eines diodengepumpten Gigahertz-Festkörperlasers. Essentiell für den Erfolg der CEO-Stabilisierung war insbesondere der durchdachte Aufbau der verwendeten Phasenregelschleife. Die Elektronik bestand aus einer Kombination analoger und digitaler Elemente und wurde mit eigens konstruierter Rauschfilter und Stromtreiber kombiniert. Ein schnelles und starkes Korrektursignal ermöglichte die erstmalige CEO-Stabilisierung eines diodengepumpten Festkörperlasers der Gigahertzklasse, welche einen Meilenstein für Frequenzkämme mit unübertroffener Leistung pro Kammmode markiert.

Die Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit zur CEO-Stabilisierung mehrmodengepumpter Festkörperlaser der Gigahertzklasse ebnen den Weg für die nächste Generation von kompakten und zuverlässigen Hochleistungsfrequenzkämmen.