

D I S S . E T H N r . 2 0 0 8 1

# **New Frontiers in Frequency Combs from Diode-Pumped Solid State Lasers**

A dissertation submitted to

E T H Z U R I C H

for the degree of

D O C T O R O F S C I E N C E S

presented by

S E L I N A P E K A R E K

Dipl.-Phys. (ETH Zurich, Switzerland)

born on the April 18, 1982

citizen of Mosnang SG

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ursula Keller, Supervisor

Prof. Dr. John M. Dudley, Co-Examiner

Prof. Dr. Thomas Südmeyer, Co-Examiner

November 2011

# *Abstract*

In this thesis the development of novel modelocked oscillator sources for compact self-referenced frequency comb generation is presented. The frontiers of the key parameters, such as noise performance, average power and repetition rate, are explored for frequency combs based on diode-pumped solid state lasers (DPSSLs).

Frequency combs from modelocked lasers offer a phase stable link between optical and microwave frequencies. Therefore, this technology enabled a huge progress in various areas, for instance spectroscopy, precision metrology or optical clocks. Any frequency comb from a modelocked laser has two degrees of freedom, the repetition rate and the carrier envelope offset (CEO) frequency. For stabilization of the frequency comb these two frequencies have to be determined and stabilized. The detection of the repetition rate is straightforward, however, measuring the CEO frequency is more challenging, especially at high repetition rates. The standard  $f$ -to- $2f$  interferometer scheme for CEO detection is based on a coherent octave-spanning spectrum which requires high peak powers and short pulses.

Well established systems for the generation of self-referenced combs are based on Ti:sapphire lasers or fiber lasers. Ti:sapphire oscillators are advantageous as a consequence of their extremely short pulse durations and their low noise levels. However, typical Ti:sapphire lasers have several practical drawbacks such as for example the demands of a multi-watt green pump laser. More convenient and robust systems rely on diode-pumped fiber lasers. However, these lasers suffer from a higher quantum noise limit and it is challenging to substantially scale up the repetition rate. On the other hand, DPSSLs combine the favorable properties of cost-efficient diode-pumping and an intrinsic low quantum noise limit. Furthermore, they can achieve watt-level average powers without any amplification, even in combination with high repetition rates.

In this thesis the noise performance of a fully stabilized frequency comb from an Er:Yb:glass oscillator is studied. The intrinsic low noise of the soliton-modelocked 1.5- $\mu\text{m}$  DPSSL resulted in a low noise CEO beat, for which a tight phase lock was

achieved using a feedback bandwidth of only 5.5 kHz. The residual integrated phase noise was 0.72 rad rms for the locked CEO, which is one of the smallest values ever reported in this spectral region. The measured fractional frequency stability of the CEO-beat is 20-times better than in case of a standard commercial fiber comb system showing the potential of DPSSLs for low noise frequency comb generation.

Furthermore, we investigated the feasibility for high repetition rate comb generation from DPSSLs. We report on the first CEO beat detection of a DPSSL with a gigahertz repetition rate. The soliton-modelocked Yb:KGW (Yb:KG(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) laser delivered 2.2-W average power in 290-fs pulses at the repetition rate of 1 GHz. This corresponds to the highest pulse energy ever obtained from a gigahertz DPSSL. We used this laser with and without additional pulse compression to adjust the pulse duration and explore the regime for stable CEO detection and self-referenceable<sup>1</sup> gigahertz frequency comb generation. With no additional pulse compression and with a highly-nonlinear photonic crystal fiber, we generated an octave-spanning spectrum but without any measurable CEO signal. We reduced the pulse duration with a passive fiber-compressor to 100 fs at 1.1-W average power. The shorter pulses generated an optical spectrum with a similar spectral power distribution, but this spectrum exhibited a substantially better coherence enabling a clear CEO beat signal.

Moreover, we explored the high power regime for frequency comb generation. We report on a self-referenceable frequency comb with an unprecedented high average power without amplification. We demonstrated the shortest pulse duration of any modelocked thin-disk laser, generating 7 W of average power in 142-fs pulses from an Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oscillator at the repetition rate of 64 MHz. Using only 65 mW of the output power, a coherent octave-spanning spectrum in a highly nonlinear photonic crystal fiber was generated. This enabled for the first time the detection of the CEO beat frequency from a thin disk laser.

Our results give important guidelines for future compact gigahertz frequency comb generation such as multi-gigahertz DPSSLs or modelocked optically pumped semiconductor disk lasers and high power comb generation in the 100-W regime.

---

<sup>1</sup> In this thesis the notation 'self-referenced comb' corresponds to a fully stabilized frequency comb with the CEO frequency and the repetition rate both detected and stabilized to an external reference. The notation 'self-referenceable comb' is used if these two frequencies are detected and controllable, but not stabilized yet.

# Kurzfassung (German)

In der vorliegenden Doktorarbeit wird die Entwicklung von neuartigen modengekoppelten Oszillatoren zur Erzeugung von kompakten, selbstreferenzierten Frequenzkämmen beschrieben. Die Grenzen der Schlüsselparameter wie Rauscheigenschaften, Durchschnittsleistung und Repetitionsrate werden untersucht im Bezug auf Frequenzkämme basierend auf dioden-gepumpten Festkörperlasern (DPSSLs).

Frequenzkämme von modengekoppelten Lasern weisen eine phasenstabile Verbindung zwischen optischen Frequenzen und solchen im Mikrowellenbereich auf. Diese Technologie hat daher grosse Fortschritte in verschiedenartigen Gebieten ermöglicht wie beispielsweise in der Spektroskopie, der Präzisionsmetrologie und der Entwicklung von optischen Uhren. Ein Frequenzkamm eines modengekoppelten Lasers besitzt zwei Freiheitsgrade, die Repetitionsrate und die CEO-Frequenz. Letztere beschreibt die Phasenverschiebung der Trägerfrequenz zur Einhüllenden des Lichtpulses. Um einen Frequenzkamm zu stabilisieren, müssen diese beiden Frequenzen bestimmt und stabilisiert werden. Die Detektion der Repetitionsrate ist trivial, die Messung der CEO-Frequenz hingegen erfordert anspruchsvollere Verfahren, die zudem im Falle hoher Repetitionsraten schwieriger anzuwenden sind. Die übliche Methode zur Detektion der CEO-Frequenz in einem  $f$ -zu- $2f$  Interferometer setzt ein kohärentes Spektrum mit einer Bandbreite von einer Oktave voraus. Das Erzeugen eines solchen Spektrums bedarf kurzer Pulse und hoher Spitzenleistungen.

Gängige Systeme zur Erzeugung von selbstreferenzierten Kämmen basieren auf Titan-Saphir-Lasern oder auf Faserlasern. Die Vorteile von Titan-Saphir-Lasern sind kurze Pulsdauern und ein niedriger Rauschpegel. Jedoch haben solche Oszillatoren praktische Nachteile, da sie zum Beispiel einen grünen Pumplaser mit mehreren Watt Durchschnittsleistung erfordern. Geeigneter und robuster sind Systeme, die auf dioden-gepumpten Faserlasern beruhen. Diese Laser besitzen hingegen einen höheren Grenzwert des Quantenrauschens, und es ist schwierig hohe

Repetitionsraten zu erreichen. Demgegenüber sind DPSSLs vorteilhaft, da sie einerseits kostengünstig mit Dioden gepumpt werden können und andererseits einen tiefen Grenzwert des Quantenrauschens aufweisen. Zudem können hohe Durchschnittsleistungen im Watt-Bereich ohne zusätzliche Verstärkung erzielt werden, sogar in Kombination mit hohen Repetitionsraten.

In dieser Doktorarbeit werden die Rauscheigenschaften eines vollständig stabilisierten Frequenzkammes eines Er:Yb:Glas-Lasers untersucht. Der intrinsisch tiefe Rauschpegel des soliton-modengekoppelten DPSSLs, der bei einer Wellenlänge von  $1.5\ \mu\text{m}$  emittiert, führte zu einem CEO-Signal mit hervorragenden Rauscheigenschaften. Eine exakte Stabilisierung des CEO-Signals wurde bereits mit einer Rückkopplungsbandbreite von lediglich 5.5 kHz erreicht. Das verbleibende integrierte Phasenrauschen betrug 0.72 rad (rms), was einem der kleinsten je erreichten Werte in diesem spektralen Bereich entspricht. Die gemessene relative Frequenzstabilität des CEO-Signals ist 20-mal besser als in einem kommerziellen Faserlasersystem.

Des Weiteren wurden die Möglichkeiten der Frequenzkammerzeugung bei hohen Repetitionsraten von DPSSLs untersucht. Zum ersten Mal konnte das CEO-Signal von einem DPSSL mit einer Repetitionsrate im Gigahertz-Bereich detektiert werden. Der soliton-modengekoppelte Yb:KGW (Yb:KG(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) Laser erzeugte eine Durchschnittsleistung von 2.2 W mit einer Pulsdauer von 290 fs bei einer Repetitionsrate von 1 GHz. Dies entspricht der höchsten Pulsenergie, die je mit einem Gigahertz DPSSL erreicht wurde. Dieser Laser wurde sowohl direkt als auch mit zusätzlicher Pulskompression verwendet, um den Parameterbereich im Bezug auf stabile CEO-Detektion und damit die Erzeugung von selbst-referenzierbaren<sup>2</sup> Gigahertz Frequenzkämmen zu ermitteln. Ohne zusätzliche Pulskompression wurde ein Spektrum mit einer Bandbreite von einer Oktave in einer hoch-nichtlinearen photonischen Kristallfaser erzeugt. Jedoch war in dieser Konfiguration die Detektion des CEO-Signals nicht möglich. Die Pulsdauer wurde mit einem passiven Faser-Kompressor auf 100 fs reduziert, bei einer Durchschnittsleistung von 1.1 W. Die

---

<sup>2</sup> In dieser Arbeit wird der Begriff 'selbst-referenzierter Frequenzkamm' für einen vollständig stabilisierten Frequenzkamm verwendet, bei dem sowohl die CEO-Frequenz, als auch die Repetitionsrate detektiert und zu einer externen Referenz stabilisiert wurde. Ein Frequenzkamm wird 'selbst-referenzierbar' genannt, falls diese zwei Frequenzen detektiert wurden und kontrolliert werden können, aber die Stabilisierung noch nicht durchgeführt wurde.

kurzen Pulse generierten ein Spektrum mit einer ähnlichen spektralen Leistungsverteilung, jedoch wies dieses eine wesentlich bessere Kohärenz auf, da es nun möglich war, das CEO-Signal zu detektieren.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit war das Erschliessen des Bereichs der Frequenzkammgenerierung bei hohen Leistungen. Erzeugt wurde ein selbstreferenzierbarer Frequenzkamm mit einer bislang im unverstärkten Bereich unerreicht hohen Durchschnittsleistung. In diesem Zusammenhang wurde die kürzeste Pulsdauer eines modengekoppelten Scheibenlasers erreicht. Der Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Scheibenlaser erzielte eine Pulsdauer von 142 fs bei einer Durchschnittsleistung von 7 W und einer Repetitionsrate von 64 MHz. Lediglich 65 mW der Ausgangsleistung reichten aus, um in einer hoch-nichtlinearen photonischen Kristallfaser ein kohärentes Spektrum mit einer Bandbreite von einer Oktave zu erzeugen. Dieses Spektrum ermöglichte die erstmalige CEO-Detektion eines Scheibenlasers.

Die vorgestellten Resultate geben wichtige Hinweise für die künftige Erzeugung kompakter, Gigahertz Frequenzkämme wie beispielsweise mit DPSSLs mit Repetitionsraten im Bereich von mehreren Gigahertz, mit modengekoppelten optisch gepumpten Halbleiterscheibenlasern oder für die Erzeugung von Frequenzkämmen mit Leistungen im Bereich von 100 W.