

Diss. ETH No. 22646

# ADVANCES IN HIGH-POWER ULTRAFAST MIXSELS

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

presented by  
MARIO MANGOLD  
MSc ETH Physics, ETH Zurich

born on November 7<sup>th</sup>, 1986

citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Ursula Keller, examiner  
Dr. Erwin A. J. M. Bente, co-examiner

2015

# Abstract

Optically pumped vertical external-cavity surface-emitting lasers (VECSELs), also called semiconductor disk lasers (SDLs) combine the advantages of a semiconductor based gain material with the key features of diode-pumped thin-disk oscillators. They have excellent heat-sinking properties, are mode-size power scalable, and enable fundamental transverse mode operation in simple cavity layouts, even when pumped with spatially multi-mode sources. By semiconductor band-gap engineering, wavelengths inaccessible for conventional solid-state lasers can be reached in direct emission or with harmonic generation. Passive modelocking of VECSELs relying on semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) established a new class of ultrafast lasers, which is able to obtain femtosecond ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) or picosecond ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ) pulses from simple resonators. Vertical integration of the saturable absorber of a SESAM into the gain structure of a VECSEL led to an even more compact ultrafast laser, the modelocked integrated external-cavity surface-emitting laser (MIXSEL). Besides a reduction in cost and complexity compared to SESAM-modelocked VECSELs, fundamental modelocking can be obtained from a straight cavity design with repetition rates up to  $\approx 100 \text{ GHz}$ .

In this thesis performance scaling of high-power ultrafast MIXSELs in various fundamental aspects is presented. One drawback of previous structures were  $>10\text{-ps}$  pulse durations that limited access to many key

applications. For reducing the pulse duration a novel type of saturable absorber was developed, which exhibits low saturation fluences and fast recovery dynamics. Together with adaptations in the active region layout and enhanced dispersion control the first femtosecond pulses from any MIXSEL with a duration of 620 fs were obtained.

Many applications in telecommunications, metrology and spectroscopy require ultrafast lasers with multi-10-GHz repetition rates and a high power per individual longitudinal mode. Here, the MIXSEL technology with its simple cavity design is ideally suited and the semiconductor based gain prevents *Q*-switching instabilities even at low pulse energies. Up to now, the long MIXSEL pulse durations limited repetition rate scaling with well separated pulses in time. Relying on the novel fs-MIXSEL structure a repetition rate range between 5 GHz and over 100 GHz was covered with record short pulse durations. Between 15 and 100 GHz MIXSELS currently achieve the highest peak and average power of any ultrafast oscillator technology.

In addition, the noise performance of a high-power picosecond MIXSEL was studied. Excellent phase and amplitude noise performance is crucial for a variety of applications, such as frequency comb metrology or optical sampling. For noise characterization a 2-GHz MIXSEL was set up in a purpose-built, stable, and closed housing for minimum external perturbation. In free running operation an integrated root mean square (RMS) timing jitter of 129 fs (100 Hz to 100 MHz) was measured, record low for any free-running SDL. By stabilization to a low-noise external electronic reference, the integrated RMS timing jitter was reduced to 70 fs (1 Hz to 100 MHz). Both results were obtained with one order of magnitude more average output power than for any previous SDL noise characterization.

Up to this thesis MIXSELS emitted pulses around 960 nm. The technology was transferred to the wavelength regime of ytterbium (Yb)-based oscillators  $>1 \mu\text{m}$  to take advantage of their well-established pulse manipulation techniques. Together with a strain-compensated active region and even lower structural dispersion, performance scaling resulted in the shortest pulses from a MIXSEL with a duration of 253 fs at a wavelength of 1044 nm, combined with a record-high peak power of  $>240 \text{ W}$ .

## Kurzfassung (German)

Optisch gepumpte Halbleiterscheibenlaser (engl. semiconductor disk lasers (SDLs) oder üblicher: vertical external-cavity surface-emitting lasers (VECSELs)) vereinen die Vorteile eines halbleiterbasierten Verstärkungsmediums mit den wichtigsten Eigenschaften diodengepumpter Scheibenlaser. Sie erlauben eine hervorragende Wärmeableitung, sind über die Lasermodengröße leistungsskalierbar und lassen sich in der fundamentalen transversalen Lasermode in einfachen Resonatorbauformen betreiben, auch wenn sie mit transversal mehrmodigen Quellen gepumpt werden. Die spezifische Anpassung der Bandlücke des Halbleitermaterials erlaubt direkte Laserlichtemission oder mit Hilfe von Harmonischenerzeugung bei Wellenlängen, die für herkömmliche Festkörperlaser im Regelfall unerreicht sind.

Die passive Modenkopplung von Halbleiterscheibenlasern mit Hilfe sättigbarer Halbleiterspiegel (engl. semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs)) begründete eine neue Klasse von Ultrakurzpulslasern, die basierend auf sehr einfachen Resonatorgeometrien Pulse mit einer Länge im Bereich von Femtosekunden ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) oder Pikosekunden ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ) erzeugen. Ein noch kompakterer Laseraufbau ergibt sich durch die vertikale Integration des sättigbaren Absorbers eines SESAMs in die Schichtstruktur eines VECSELs. Diese Klasse von Lasern wird als MIXSEL (engl. modelocked integrated external-cavity surface emitting laser)

bezeichnet. Durch die Integration des Absorbers werden die Fabrikationskosten und die Komplexität des Laseraufbaus im Vergleich zu SESAM-modengekoppelten VECSELn verringert. Ferner kann die fundamentale Modenkopplung in einem linearen Laserresonator mit Pulswiederholraten von bis zu 100 GHz erreicht werden.

In dieser Arbeit präsentieren wir eine Verbesserung der Leistungsparameter von MIXSELn in verschiedenen grundlegenden Aspekten. Ein Nachteil der bisherigen Strukturen war die Limitierung auf lange Pulse mit einer Pulsdauer von mehr als 10 ps, die den Einsatz in vielen wichtigen Anwendungsgebieten hinderten. Zur Reduzierung der Pulsdauer wurde ein neuer sättigbarer Absorber entwickelt, der neben niedrigen Sättigungsfluenzen auch sehr schnelle Erholungsdynamiken aufweist. Durch Anpassungen im Bereich der Verstärkungsregion und mit Hilfe verbesserter struktureller Gruppenverzögerungsdispersion konnten erstmalig Femtosekundenpulse mit einer Dauer von 620 fs mit einem MIXSEL erzeugt werden.

Viele Anwendungen im Bereich der Telekommunikation, Messtechnik und Spektroskopie basieren auf Ultrakurzpulslasern, die Pulse mit Wiederholraten von mehreren zehn Gigahertz emittieren und zusätzlich eine hohe Leistung jeder einzelnen longitudinalen Lasermode aufweisen. Für diese Anwendungen ist die MIXSEL-Technologie dank ihres einfachen Resonatoraufbaus perfekt geeignet. Zusätzlich verhindert das halbleiterbasierte Verstärkungsmedium Instabilitäten durch ungewollte Güteschaltungen im Resonator auch bei niedrigen Pulsenergien. Bisher limitierten allerdings die langen Pulsdauern von MIXSELn eine weitere Anhebung der Pulswiederholrate mit klar getrennten Pulsen in der Zeitdomäne. Durch die neu entwickelte Struktur können MIXSEL nun in einem Bereich zwischen 5 GHz und mehr als 100 GHz Pulswiederholrate mit sehr kurzen Pulsdauern betrieben werden. Im Bereich zwischen 15 und 100 GHz Pulswiederholrate erreichen MIXSEL derzeit die höchsten Spitzen- und Durchschnittsleistungen aller unverstärkter Ultrakurzpulslaser.

Darüber hinaus wurde das Rauschverhalten eines MIXSELS untersucht, der ps-Pulse bei hoher durchschnittlicher Ausgangsleistung erzeugt. Ausgezeichnetes Phasen- und Amplitudenverhalten ist eine Grundvorausset-

---

zung für eine Vielzahl von Anwendungen, wie zum Beispiel für die Frequenzkamm-Messtechnik oder für optische Abtastung. Zur Charakterisierung des Rauschverhaltens wurde ein 2-GHz MIXSEL in einem speziell angefertigten, stabilen und geschlossen Gehäuse aufgebaut, um minimale äussere Einwirkungen auf den Laserbetrieb zu erreichen. Ohne aktive Stabilisierung weist der Laser im quadratischen Mittel eine integrierte Instabilität der Pulsposition von 129 fs (100 Hz bis 100 MHz) auf, welche geringer ist als bei allen untersuchten Halbleiterscheibenlasern zuvor. Durch die Stabilisierung der Pulswiederholrate an eine rauscharme elektronische Referenzquelle konnte die integrierte Instabilität der Pulsposition im quadratischen Mittel auf 70 fs (1 Hz bis 100 MHz) reduziert werden. In beiden Operationsmodi war die durchschnittliche Ausgangsleistung mindestens eine Größenordnung höher als bei allen vorherigen Untersuchungen des Rauschverhaltens von Halbleiterscheibenlasern.

Bislang emittierten MIXSEL Pulse im Wellenlängenbereich um 960 nm. Die Technologie wurde erstmals in den Wellenlängenbereich von ytterbium (Yb)-basierten Laseroszillatoren von  $>1\ \mu\text{m}$  transferiert, um die etablierten Pulsmanipulationstechniken dieses Wellenlängenbereichs zu nutzen. Im Zusammenspiel mit Spannungskompensation im Kristallgitter des Verstärkungsbereich und noch niedrigerer struktureller Gruppenverzögerungsdispersion konnten durch eine Leistungsskalierung 253-fs-Pulse mit einer Durchschnittsleistung von 235 mW bei einer Wellenlänge von etwa 1044 nm erzeugt werden. Damit ergibt sich die bisher höchste Pulsspitzenleistung eines MIXSELS von über 240 W.