



Doctoral Thesis

## Picosecond VECSELs with repetition rates up to 50 GHz

**Author(s):**

Lorensen, Dirk

**Publication Date:**

2006

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005128857> →

**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 No. 16382

# **Picosecond VECSELS with repetition rates up to 50 GHz**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH  
for the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by  
DIRK LORENSER  
Dipl.-Phys., University of Bonn, Germany  
born 12.04.1974

citizen of  
The Federal Republic of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. U. Keller, supervisor  
Prof. Dr. A. Imamoglu, co-examiner  
Dr. H. Unold, co-examiner

2006

# Abstract

The optically-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser (OP-VECSEL) is a laser source which has sparked widespread interest in the past few years due to its capability of producing high average output powers in a diffraction-limited beam. A unique bonus of the VECSEL is that it can be realized at many different wavelengths because of the possibility of choosing from a number of semiconductor material systems which are manufacturable today by epitaxial growth. The OP-VECSEL is attractive for applications in science and technology because it can convert fairly low-cost, low-beam-quality optical pump power from high-power diode laser bars into a nearly-diffraction limited output beam with good efficiency in wavelength regions which are not covered by established solid-state laser gain materials.

In addition to their good performance as cw lasers, VECSELs are interesting lasers for passive mode locking because the semiconductor gain medium has a large gain cross-section. This effectively suppresses Q-switching instabilities which can be troublesome in the development of mode-locked solid-state lasers, especially at high (multi-GHz) repetition rates. Passively mode-locked OP-VECSELs therefore have the potential to combine the properties of high repetition rates and high average output power, which are difficult to realize simultaneously to the same degree with any other currently available technology. The first passively mode-locked VECSEL was demonstrated in the year 2000, and within two years the output power achievable in mode-locked operation had reached the 1-W level.

In this thesis, two contributions to the ongoing development process of passively mode-locked OP-VECSELs are presented. Both contributions were concerned with the improvement of the performance of OP-VECSELs which are passively mode locked with semiconductor saturable-absorber mirrors (SESAMs). However, the work was done in two different regimes of repetition rate, and the underlying saturable-absorber technology was quite different in the two cases.

The first part of the thesis describes the improvement of the pulse quality of VECSELs which are passively mode locked with quantum-well SESAMs (QW SESAMs) at watt-level average output powers in the regime of repetition rates between 1 and 10 GHz. Pulse durations obtained in prior work had spanned a wide range, from nearly transform-limited pulses of a few picoseconds duration up to strongly chirped pulses with durations of up to several tens of picoseconds. The characteristics of the pulses depended strongly on a variety of operating conditions like the power level and the temperature. Numerical simulations which were performed in our group predicted that, with proper group-delay-dispersion management in the laser, the chirp can be reduced considerably and short and nearly transform-limited pulses can be generated. In the work presented here, the center wavelength of the optical spectrum of the VECSEL was tuned into regions with different group-delay dispersion by using a Fabry-Perot etalon inside the cavity. In this way, it was indeed possible to influence the mode-locking behaviour significantly and to produce nearly transform-limited pulses under optimized conditions. Up to 2.08 W average output power was achieved in 4.7-ps pulses at a repetition rate of 4 GHz, and up to 1.4 W average output power in 6.1-ps pulses at a repetition rate of 10 GHz. The peak-power levels of these pulsed lasers now allow very efficient single-pass external-cavity frequency doubling, making VECSELs very attractive for use in laser display systems.

Another class of applications, like optical clocking of integrated circuits, demands mode-locked laser sources producing pulse trains with very high repetition rates of 10-100 GHz and moderate-to-high output powers of several hundred milliwatts. Under this perspective, the second part of this thesis describes the scaling-up of the repetition rate of passively mode-locked VECSELS into the regime of repetition rates from 10 to 50 GHz. It became apparent that a new kind of SESAM with a very low saturation fluence ( $F_{\text{sat}}$ ) was needed in order to maintain high average powers at high repetition rates with VECSELS due to limitations imposed by thermal issues and cavity-stability problems when employing conventional quantum-well SESAMs (QW SESAMs). In the year 2004, our group succeeded in fabricating low- $F_{\text{sat}}$  SESAMs based on quantum-dot absorber material. The simplified cavity design resulting from the low  $F_{\text{sat}}$  of these quantum-dot SESAMs (QD SESAMs), together with their fast absorber-recovery times allowed us to mode-lock successfully in the multi-ten-GHz regime. At a repetition rate of 50 GHz, up to 100 mW average power was achieved in nearly transform-limited 3.3-ps pulses.

Whilst producing novel low- $F_{\text{sat}}$  absorber devices for improved performance of mode-locked high-repetition-rate lasers (not just VECSELS), the development effort of fabricating low- $F_{\text{sat}}$  QD SESAMs is actually geared toward an even more ambitious goal: the integration of the absorber into the VECSEL gain structure. If the saturation fluence of the absorber can be reduced to the point where the mode locking of a VECSEL in a cavity configuration with the same mode areas on gain and absorber can be achieved, then the feasibility of an integrated structure incorporating the same gain and absorber elements would be proven. This crucial test of 1:1 mode locking was successfully performed in the scope of the work presented in this thesis, and therefore the viability of the integrated-absorber VECSEL concept has been demonstrated. This could pave the way for the development of compact and rugged high-repetition-rate pulsed laser sources in the 100-mW power class which can be cheaply fabricated by wafer-scale mass production and therefore fill a gap in the performance spectrum of current laser technology.

# Kurzfassung

Der optisch gepumpte oberflächenemittierende Halbleiterlaser mit externer Kavität (Optically-Pumped Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Semiconductor Laser, OP-VECSEL) ist ein Laser welcher in den letzten Jahren grosse Aufmerksamkeit erregt hat aufgrund seiner Eigenschaft, vergleichsweise hohe Ausgangsleistungen in einem nahezu beugungslimitierten Strahl zu liefern. Ein einzigartiger Vorteil dieses Lasers ist, dass er bei vielen verschiedenen Wellenlängen realisiert werden kann, da man heutzutage eine ganze Reihe von Halbleitermaterialien mittels Epitaxie herstellen kann. Der OP-VECSEL ist attraktiv für wissenschaftlich-technische Anwendungen da er relativ preiswert verfügbare optische Pumpleistung mit niedriger Strahlqualität, wie sie z.B. von Diodenlaserbarren geliefert wird, mit guter Effizienz in einen hochwertigen Ausgangsstrahl mit hoher Strahlqualität verwandelt, und dies zudem noch in Wellenlängenbereichen, welche von etablierten Festkörperlasermaterialien nicht abgedeckt werden.

Zusätzlich zu seinen guten Eigenschaften im Dauerstrich-Betrieb (continuous-wave, CW) eignet sich der VECSEL auch sehr gut zum passiv Modenkoppeln, da Halbleiter-Verstärkermedien einen grossen Verstärkungs-Querschnitt aufweisen. Dies unterdrückt Instabilitäten, welche durch gleichzeitig auftretendes passives Güteschalten entstehen können und welche den Bau von modengekoppelten Festkörperlasern bei höheren Pulsrepetitionsraten zunehmend erschweren. Passiv modengekoppelte OP-VECSEL haben somit das Potential, hohe mittlere Ausgangsleistungen bei hohen Pulsrepetitionsraten zu liefern. Diese beiden Eigenschaften lassen sich mit aktuell konkurrierenden Technologien nur sehr schwer vereinen. Der erste passiv modengekoppelte VECSEL wurde im Jahr 2000 demonstriert und innerhalb von nur zwei Jahren hatten die Ausgangsleistungen die 1-W Marke erreicht.

In dieser Dissertation werden im Wesentlichen zwei Beiträge zum noch andauernden Entwicklungsprozess von passiv modengekoppelten Halbleiterlasern vorgestellt. Beide Beiträge betreffen die Optimierung von OP-VECSELs welche mit sättigbaren Halbleiter-Absorber Spiegeln (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) modengekoppelt werden. Sie betreffen jedoch unterschiedliche Bereiche von Repetitionsraten und machen Gebrauch von recht unterschiedlicher Absorber-Technologie.

Der erste Teil der Dissertation behandelt die Verbesserung der Pulsqualität von modengekoppelten VECSELs mit Repetitionsraten zwischen 1 und 10 GHz und mittleren Ausgangsleistungen im Watt-Bereich, welche SESAMs mit Quantentopf-Absorbern (quantum well, QW) verwenden. Die Pulsdauern welche man in den bis dahin durchgeführten Arbeiten beobachtet hatte deckten einen grossen Bereich ab, von nahezu bandbreitelimitierten Pulsen im Pikosekunden-Bereich bis zu stark gechirpten Pulsen mit Pulsdauern von einigen zehn Pikosekunden. Die Pulscharakteristiken hingen stark ab von den Betriebsbedingungen wie Leistungspegel und Temperatur. Numerische Simulationen welche in unserer Gruppe durchgeführt wurden hatten ergeben, dass man bei geeigneter Wahl der Gruppenlaufzeitdispersion (group-delay dispersion, GDD) kurze und nahezu bandbreitelimitierte Pulse erhalten kann. Durch Verstimmen der Zentralwellenlänge des optischen Spektrums mit Hilfe eines Fabry-Perot Etalons ist es gelungen, die GDD in der Kavität gezielt zu beeinflussen und es war in der Tat möglich Modenkoppeln mit nahezu bandbreitelimitierten Pulsen zu erreichen. Auf diese Art konnten bis zu 2.08 W Ausgangsleistung in 4.7-ps Pulsen bei einer Repetitionsrate von

4 GHz, sowie 1.4 W Ausgangsleistung in 6.1-ps Pulsen bei 10 GHz erreicht werden. Die somit erreichten Pulsspitzenleistungen von modengekoppelten VECSELS haben nun Werte erreicht welche attraktiv sind für die Frequenzverdopplung im Einfachdurchgang durch ein nichtlineares Medium (single-pass frequency doubling), welche Anwendung in Laser Display Systemen finden könnte.

Eine andere Klasse von Anwendungen, wie z.B. optisches Takten von integrierten Schaltkreisen, verlangt nach Pulszügen mit sehr hohen Repetitionsraten im Bereich 10-100 GHz und mittleren Ausgangsleistungen von einigen hundert Milliwatt. Unter diesem Gesichtspunkt befasst sich der zweite Teil dieser Dissertation mit der Hochskalierung der Repetitionsrate von modengekoppelten VECSELS von 10 GHz bis auf 50 GHz. Es wurde klar, dass man eine neue Art von SESAM mit sehr niedriger Sättigungsfluenz ( $F_{\text{sat}}$ ) entwickeln musste um bei hohen Repetitionsraten ausreichend hohe Ausgangsleistungen zu erreichen. Im Jahr 2004 gelang es in unserer Gruppe, solche SESAMs mit niedrigem  $F_{\text{sat}}$  herzustellen unter Verwendung von Absorberschichten mit eingebetteten Quantenpunkten (quantum dots, QD). Der vereinfachte Kavitätsaufbau der aus der Verwendung dieser QD SESAMs resultierte sowie deren sehr schnelle Absorber-Erholzeit ermöglichten das Modenkoppeln im Bereich von einigen 10 GHz. Bei 50 GHz Repetitionsrate konnte bis zu 100 mW Ausgangsleistung in beinahe bandbreitelimitierten 3.3-ps Pulsen erreicht werden.

Doch während die neuen QD SESAMs für sich alleine betrachtet bereits einen nennenswerten Fortschritt im Gebiet der modengekoppelten Festkörperlasertechnologie darstellen, so waren sie doch nur Teil eines weitaus ehrgeizigeren Entwicklungsvorhabens: die Integration des Absorbers in die VECSEL-Verstärkerstruktur. Wenn man die Sättigungsfluenz des Absorbers so weit reduziert, dass das Modenkoppeln bei gleicher Lasermodenfläche auf Absorber und Verstärker möglich ist, dann ist die Machbarkeit einer funktionierenden integrierten Halbleiterstruktur bewiesen. Dieser entscheidende Test des 1:1 Modenkoppelns wurde im Rahmen dieser Dissertation erfolgreich durchgeführt und die Realisierbarkeit des integrierten-Absorber VECSELS somit demonstriert. Dies könnte den Weg ebnen für die Entwicklung von kompakten und robusten gepulsten Laserquellen mit hohen Repetitionsraten und Ausgangsleistungen im 100-mW Bereich, welche kostengünstig im Wafermassstab herstellbar wären und somit eine fortschritthemmende Lücke im Spektrum der modernen Lasertechnologie schliessen würden.