



Doctoral Thesis

## High power optically pumped VECSELs and MIXSELs

**Author(s):**

Rudin, Benjamin

**Publication Date:**

2010

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006319023> →

**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](#).

# HIGH POWER OPTICALLY PUMPED VECSELS AND MIXSELS

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

B E N J A M I N R U D I N

Dipl. Phys. ETH

born on December 8, 1978

citizen of Lauwil (Baselland)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. U. Keller, Supervisor

Prof. Dr. M. Sigrist, Co-Examiner

Dr. T. Südmeyer, Co-Examiner

# *Abstract*

Since the invention and first demonstration of the laser, continuous-wave lasers are used in everyday applications, such as CD-players, optical communication links or lasers printers. Ultrafast lasers, on the other hand, found only applications in industry or research, for example in the fields of biology, medicine or metrology. The reason is, that these systems rely on bulky, complex and expensive solid-state lasers such as titanium sapphire oscillators. Recently, new applications, like optical clocking of microprocessors, generated a demand for low-cost and compact ultrafast sources. Semiconductor lasers are ideally suited for this purpose, because they can be realized in high-volume mass-production, similar to semiconductor electronics, and allow a high level of integration.

There are basically two different types of semiconductor lasers, so called edge-emitters, for which the laser light propagates in the epitaxial layers, and surface emitters, radiating the light perpendicularly to the layer structure. Edge-emitters have the drawbacks of low beam quality at high output powers (in the Watt regime) and facet damage due to the high light intensities at the output window. The vertical external-cavity surface-emitting laser (VECSEL), overcomes this issues because of the external cavity and the large spot sizes on the thin-disk like gain structure. With this type of laser high output powers (tens of Watt) and good beam quality are possible at the same time. Furthermore, modelocking is possible by implementation of a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) into the external cavity. Multi-Watt output power has been demonstrated for such laser systems.

Since both, gain structure and SESAM, can consist of the same semiconductor material system, the integration of these two elements into a single structure becomes possible, leading to very simple, ultrafast laser oscillators. In this thesis we developed this new type of semiconductor laser, and we refer to it as the modelocked integrated external-cavity surface emitting laser (MIXSEL).

The quantum well (QW) SESAMs, used previously in the hybrid VECSEL-SESAM modelocking approach, have saturation energies comparable to that of the gain structure itself. Simulations and experiments showed, that stable modelocking is only possible if the absorber saturates stronger than the gain. This has been achieved by using smaller spot sizes on the absorber than on the gain, by a proper design of

the external cavity. This, unfortunately, made the integration of the two elements into a single structure impossible, because this implies that the laser mode sizes would have to be equal. One of the major tasks of this thesis was therefore to develop saturable absorbers with the suitable saturation properties, to enable modelocking with the same spot sizes on gain and absorber.

Quantum dot (QD) SESAMs, in contrast to QW SESAMs, have an additional parameter, the dot density, which allows an independent control of the saturation fluence and the modulation depth. With this kind of absorber, we were able to achieve modelocking with equal spot sizes on SESAM and gain (often referred to as 1:1 modelocking). Due to the far simpler cavity design we were able to realize a modelocked VECSEL with a record high repetition rate of 50 GHz and an average power of above 100 mW. But more important, the integration of gain and absorber into a single structure became conceptually possible as demonstrated in 2007. We achieved the modelocked operation of the first MIXSEL in a simple linear cavity. The average output power was 40 mW with at pulse duration of 35 ps and a repetition rate of 2.8 GHz.

The only downside was the low production yield of functioning MIXSEL structures. The reason for this were the very high demands on growth accuracy for these semiconductor structures. With improved QD absorbers we were able to reduce these requirements and to increase the yield for working structures significantly. This, and improved heat removal, led to the modelocked semiconductor laser with the highest output power up to date, a MIXSEL with 6.4 W average power. The pulse duration was 28 ps and the repetition rate 2.5 GHz. Faster saturable absorbers will in future permit by far shorter pulses and higher repetition rates. Due to simple linear cavities, which were enabled by the MIXSEL concept, we estimate that repetition rates of more than 100 GHz become possible.

The last step towards even more compact and inexpensive ultrafast lasers is the electrical pumping of the MIXSEL. This would allow omitting the optical pump, in most cases an edge-emitter, and the required pump optics. We already successfully realized electrically pumped continuous-wave VECSELs, and developed concepts and guidelines for electrically pumped MIXSELs. These lasers will in future fill a gap in the spectrum of today's laser technology.

# Kurzfassung

Seit der Erfindung und der ersten Realisierung des Lasers, haben Dauerstrich-Laser Anwendung in vielen Alltags-Gegenständen gefunden. Beispiele sind CD-Spieler, optische Kommunikations Verbindungen oder Laser Drucker. Ultra-schnelle gepulste Laser, auf der anderen Seite, wurden bisher nur in der Industry oder in der Forschung eingesetzt, in Gebieten wie der Biologie, der Medizin oder der Metrologie. Der Grund dafür ist, dass diese Systeme auf grossen, komplexen und kostenintensiven Festkörper-Lasern beruhen, wie zum Beispiel Titan-Sapphir Oszillatoren. Neue Anwendungsgebiete, wie das optische Takten von Mikro-Prozessoren, haben den Wunsch nach kostengünstigen und kompakten ultraschnellen Laserquellen hervorgebracht. Halbleiter-Laser sind dafür ideal geeignet, da sie, wie die Halbleiter Elektronik, in Massenproduktion hergestellt werden können, und einen hohen Grad an Integration ermöglichen.

Im Prinzip gibt es zwei verschiedene Typen von Halbleiterlasern, sogenannte Kanten-Emitter, bei welchen das Licht in den epitaktischen Schichten propagiert, und Oberflächen-Emitter, welche das Laserlicht senkrecht zu der Schichtstruktur abstrahlen. Kanten-Emitter haben den Nachteil, dass sie bei hohen Ausgangsleistungen (im Watt-Bereich) schlechte Strahlqualität aufweisen, und es aufgrund der hohen Lichtintensitäten zu Schaden an der Auskopplungs-Oberfläche kommen kann. Oberflächeneittierende Halbleiterlaser mit externer Kavität (vertical external-cavity surface-emitting laser, VECSEL) haben diese Probleme nicht, aufgrund der externen Kavität und den grossen Moden auf der scheibenartigen Verstärkerstruktur. Mit dieser Art von Laser sind hohe Ausgangsleistung (im zweistelligen Watt-Bereich) und gute Strahlqualität gleichzeitig möglich. Weiter ist es möglich den Laser zu modenkoppeln, durch das Einbringen eines sättigbaren Halbleiter Absorberspiegels (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) in die externe Kavität. Ausgangsleistungen von mehreren Watt wurden für solche Lasersysteme erreicht.

Da die Verstärkerstruktur und der sättigbare Absorber aus dem gleichen Materialsystem bestehen können, ist die Integration dieser beide Elemente in eine einzelne Struktur möglich, wodurch sehr einfach aufgebaute ultraschnelle Laseroszillatoren realisiert werden können. Im Rahmen dieser Arbeit haben wir

diese neue Art von Lasern entwickelt, welche modengekoppelter integrierter Halbleiterlaser mit externer Kavität (modelocked integrated external-cavity surface emitting laser, MIXSEL) genannt wird.

Die SESAMs mit Quantentopfabsorbern (quantum well, QW), welche früher für das hybride VECSEL-SESAM Modenkoppeln verwendet wurden, haben ähnliche Sättigungsenergien wie die Verstärkerstruktur. Simulationen und Experimente haben aber aufgezeigt, dass stabiles Modenkoppeln nur dann möglich ist, wenn der Absorber stärker gesättigt wird als das Verstärkermaterial. Dies hat man erreicht, indem man, durch ein geeignetes Design der externen Kavität, auf dem Absorber kleinere Modengrößen verwendet hat als auf dem Verstärker. Leider ist mit diesen SESAMs die Integration in die Verstärkerstruktur nicht möglich, da dies gleiche Größen der Lasermoden voraussetzt. Eine der Hauptaufgaben dieser Arbeit bestand deshalb darin, sättigbare Absorber zu entwickeln, welche die entsprechenden Sättigungseigenschaften besitzen, so dass Modenkoppeln bei gleicher Modengröße im Verstärkermaterial und im Absorber möglich ist.

Quantenpunkt (quantum dot, QD) SESAMs haben im Gegensatz zu QW SESAMs einen zusätzlichen Parameter, die Quantenpunktdichte. Dadurch wird eine unabhängige Kontrolle der Sättigungsfluenz von der Modulationstiefe ermöglicht. Mit dieser Art von Absorber ist es uns gelungen, VECSELS zu modenkoppeln unter der Verwendung gleicher Modengrößen auf dem Verstärker und dem SESAM (oft 1:1 Modenkoppeln genannt). Aufgrund des weitaus einfacheren Kavitätdesigns, konnten wir ein modengekoppelstes VECSEL mit Rekord-hoher Repetitionsrate von 50 GHz und einer mittleren Ausgangsleistung von über 100 mW realisieren. Viel wichtiger aber war, dass damit die Integration von Verstärker und Absorber in eine einzelne Struktur konzeptionell möglich wurde, was uns 2007 schliesslich auch gelang. Wir erreichten den modengekoppelten Betrieb des ersten MIXSELS, in einer einfachen linearen Kavität. Die mittlere Ausgangsleistung betrug 40 mW bei einer Pulsdauer von 35 ps und einer Repetitionsrate von 2.8 GHz.

Der einzige Wermutstropfen war die geringe Ausbeute bei der Herstellung von funktionierenden MIXSEL-Strukturen. Grund dafür war die sehr hohe Anforderung an die Wachstumsgenauigkeit für die Halbleiterstrukturen. Mit verbesserten QD-Absorbern ist es uns schliesslich gelungen diese Anforderungen zu senken und die Ausbeute an funktionierenden Strukturen drastisch zu erhöhen. Dies, und eine verbesserte Wärmeabführung führte zum modengekoppelten Halbleiterlaser mit der

bis anhin grössten durchschnittlichen Ausgangsleistung, einem MIXSEL mit 6.4 W. Die Pulsdauer betrug 28 ps, und die Repetitionsrate 2.5 GHz. Schnellere sättigbare Absorber werden in Zukunft weitaus kürzere Pulsdauern und höhere Repetitionsraten erlauben. Aufgrund der einfachen linearen Kavitäten, welche durch das MIXSEL-Konzept ermöglicht wurden, schätzen wir, dass Repetitionsraten von über 100 GHz möglich werden.

Der letzte Schritt hin zu noch kompakteren und kostengünstigeren ultraschnellen Lasern, ist das elektrische Pumpen der MIXSEL. Damit würde die optische Pumpe, meist ein Kantenemitter, und die erforderliche Pumpoptik wegfallen. Bereits haben wir elektrisch gepumpte dauerstrich VECSEL erfolgreich realisiert, und Konzepte und Richtlinien für elektrisch gepumpte MIXSEL entwickelt. Diese Laser werden in Zukunft eine Lücke im Spektrum der heutigen Lasertechnologie schliessen.