



Doctoral Thesis

## Electrically and optically pumped semiconductor disk lasers - continuous-wave and modelocked

**Author(s):**

Hoffmann, Martin

**Publication Date:**

2011

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006483890> →

**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. 19745

**ELECTRICALLY AND OPTICALLY PUMPED SEMICONDUCTOR  
DISK LASERS — CONTINUOUS-WAVE AND MODELOCKED**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
MARTIN HOFFMANN  
Dipl. Phys. ETH, ETH Zurich

born on  
October 15, 1979

citizen of  
Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Ursula Keller, Supervisor  
Prof. Dr. Anne Tropper, Co-Examiner  
Dr. Thomas Südmeyer, Co-Examiner

2011

# Abstract

In this thesis we focus on two main experimental results, and we comment on the fabrication and characterization techniques required to enable these. We present the steps leading to the demonstration of high power femtosecond pulse generation using optically pumped SESAM-modelocked VECSELS. We achieved an average output power of more than 1 W with 784-fs pulses. The second experimental topic deals with the first steps required to extend the demonstrated performances to an electrical pumped VECSEL structure. We present various characterizations of the devices and CW power of up to 120 mW.

The necessary steps that enabled us to advance into the femtosecond regime are manifold. In our study of the influence of the intra-cavity GDD on the pulse duration of modelocked VECSELS, we experimentally confirmed that quasi-soliton modelocking is the responsible pulse shaping mechanism in the few picosecond range. In order to carry out such an experimental study, we developed a versatile design for a dispersive mirror, based on a hybrid semiconductor/dielectric material system where the GDD is set by the deposition of a single dielectric layer of defined thickness, enabling access to positive and negative GDD values in the order of  $10^4 \text{ fs}^2$  for a single reflection. By means of these dispersive mirrors we were able to alter the intra-cavity GDD of a SESAM-modelocked VECSEL and we identified an optimal operation range for the generation of the shortest pulses of low and positive values for the intra-cavity GDD. Inspired by these findings, we started to investigate low-GDD AR sections. The employment of hybrid semiconductor/dielectric multilayer structures for our VECSELS resulted in a reduction of their structural GDD of about a factor of 1000 over a wavelength range of several tens of nanometers. We used such AR sections on VECSELS with QD and QW based active regions, which were specifically designed for the generation of ultrashort pulses. These structures

were optimized for a large spectral width by employing a chirped positioning scheme of the active layers. These steps, in combination with an optimized heat management, made the demonstration of high power femtosecond pulses from a VECSEL possible.

Despite these demonstrated achievements of modelocked optically pumped VECSELS, these devices are not yet compatible with the packaging requirements necessary for industrial applications. Therefore, the development of an electrical pumping scheme is very important. For electrical pumping of VECSELS, the design of the gain element has to meet many additional and partly oppositional conditions. In order for current to flow through the structure, the presence of doping in the semiconductor structure and contacts on the device are vital. However, these requirements are accompanied by detrimental influences on the output power and the pump profile of the devices. The doping, on the one hand, provides electrical conductivity, but, on the other hand, it results in higher optical losses caused by TPA. Increasing the doping level leads to more optical losses and lowering it results in more pronounced electrical heating, both deteriorating the output performance of the device. Therefore, it is essential to analyze the critical balance between these conflicting optical and electrical properties. In order to overcome the increased losses through TPA, we implemented an intermediate DBR for gain enhancement. Another challenge is to achieve a Gaussian or at least uniform carrier injection profile in the active region, comparable to optically pumped VECSELS, where it can be controlled by the pump laser beam profile. This challenge is caused by the intrinsic ring shape of one electrode and sets a limit on the power scalability and the beam quality, however, we were able to relax these limitations by using a p-doped bottom DBR in combination with a small bottom disk contact and a current spreading layer. We obtained good power scalability and an excellent carrier injection profile in the active region, and we demonstrated more than 100 mW for several samples. In a study of the beam quality of electrically pumped VECSELS, we identified that a combination of high output power and good beam quality is only possible if an optimum reflectivity value of the intermediate DBR is found.

The presented results on modelocked optically pumped VECSELS are very promising for a vertical integration of the absorber in the VECSEL structure, and we envision several watts of output power with pulses shorter than 500 fs from a MIXSEL structure. In the field of modelocked electrically pumped VECSELS, 200 mW with pulses shorter than 10 ps seem to be feasible in the near future.

# Kurzfassung

In dieser Doktorarbeit werden zwei experimentelle Resultate vorgestellt und die dafür nötigen Herstellungsverfahren und Charakterisierungstechniken vorgestellt. Die erforderlichen Schritte werden erläutert, die zum Erreichen von Hochleistungspulsen im Femtosekundenbereich mit SESAM modengekoppelten optisch gepumpten VECSELn geführt haben. Es wurde eine mittlere Leistung von über 1 W mit 784-fs Pulsen gemessen. Das zweite Thema dieser Arbeit behandelt die ersten Schritte, die für eine Ausweitung der demonstrierten Leistungen auf elektrisch gepumpte VECSEL Strukturen nötig sind. Es werden diverse Charakterisierungen der Proben und Dauerstrichleistungen bis zu 120 mW erörtert.

Um in das Feld der Femtosekunden vorzustossen, waren eine Vielzahl Untersuchungen nötig. In einer experimentellen Studie über den Einfluss von Kavitätsdispersion auf die Pulsdauer modengekoppelter VECSEL war es uns möglich Quasisolitonmodenkopplung als den verantwortlichen Mechanismus für die Pulsbildung im niedrigen Pikosekundenbereich zu bestätigen. Um diese Studie durchführen zu können, sind vielseitige dispersive Spiegel auf Basis von Halbleitermaterialien und Dielektrika entwickelt worden, für welche der Wert der Dispersion durch die spezifische Dicke einer einzelnen dielektrischen Lage definiert ist, und mit denen positive und negative Dispersionswerte in der Grössenordnung von  $10^4 \text{ fs}^2$  mit einer einzigen Reflektion erreicht werden können. Mit Hilfe dieser dispersiven Spiegel konnten die Kavitätsdispersion von SESAM modengekoppelten VECSELn geändert werden und es konnte ein optimaler Arbeitsbereich der Dispersion für die Erzeugung der kürzesten Pulse von niedrigen positiven Werten bestimmt werden. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden Antireflexschichten mit niedriger Dispersion untersucht. Das Aufbringen von kombinierten Vielschichtsystemen bestehend aus Halbleitermaterial und Dielektrika auf unsere VECSEL führte zur Reduktion der strukturellen Dispersion die-

ser um einen Faktor 1000 in einem Wellenlängenbereich von mehreren zehn Nanometern. Solche Antireflexschichten wurden für VECSEL mit Quantenfilm- und Quantenpunkt-basierten aktiven Regionen benutzt, welche speziell zur Erzeugung von ultrakurzen Pulsen konzipiert wurden. Diese Strukturen wurden für grosse spektrale Bandbreite optimiert indem die aktiven Schichten resonant für unterschiedliche Wellenlängen positioniert wurden. Dank dieser Schritte kombiniert mit einer optimalen Wärmeabführung konnten mit modengekoppelten VECSELn Hochleistungspulse im Femtosekundenbereich erzeugt werden.

Trotz dieser Errungenschaften von optisch gepumpten modengekoppelten VECSELn sind diese Elemente noch nicht mit der erforderlichen Konfektionierung industrieller Anwendungen kompatibel. Deshalb ist die Entwicklung eines elektrischen Pumpschemas wichtig. Um das elektrische Pumpen von VECSELn zu realisieren, muss das Verstärkungselement, im Gegensatz zu optischem Pumpen, viele teilweise gegensätzliche Voraussetzungen erfüllen. Damit Strom durch die Struktur fließen kann ist das Vorhandensein von Dotierung in der Halbleiterstruktur und Kontakte auf der Probe erforderlich. Jedoch sind diese Anforderungen mit schädlichen Einflüssen auf die Ausgangsleistung und das Pumpprofil gepaart. Einseits ermöglicht die Dotierung elektrische Leitfähigkeit, andererseits führt sie zu optischen Verlusten aufgrund von Zwei-Photonen-Absorption. Höhere Dotierungen verursachen höhere optische Verluste, niedrigere bewirken stärkere elektrische Erwärmung, wobei beides eine Leistungsverringerung bewirkt. Deshalb ist es notwendig, das kritische Gleichgewicht zwischen den konkurrierenden elektrischen und optischen Eigenschaften zu erforschen. Um die Verluste durch Zwei-Photonen-Absorption zu kompensieren, benutzen wir einen Zwischenspiegel um die Verstärkung zu erhöhen. Eine weitere Herausforderung ist das Erreichen einer gaussförmigen oder zumindest gleichförmigen Einspeisung der Ladungsträger in der aktiven Region, vergleichbar mit der optisch gepumpter VECSEL, wo diese vom Pumpprofil bestimmt wird. Das rührt von der intrinsischen Ringform einer der Elektroden her und limitiert die Leistungsskalierung und die Strahlqualität. Diese Limitationen können jedoch reduziert werden, indem ein p-dotierter unterer Spiegel mit einer Stromausbreitungsschicht und einem kleinen unteren Kontakt kombiniert werden. So konnten eine gute Leistungsskalierung und eine ausgezeichnete Ladungsträgereinspeisung in der aktiven Region erreicht werden, und Leistungen von mehr als 100 mW konnten mit mehreren Proben gemessen werden. Aus einer Strahlqualitätsstudie elektrisch gepumpter VECSEL konnten wir schliessen, dass hohe Aus-

gangsleistung nur für einen optimalen Wert für die Reflektivität des Zwischenspiegels mit guter Strahlqualität kombiniert werden kann.

Die erreichten Resultate modengekoppelter optisch gepumpter VECSEL sind vielversprechend für eine vertikale Integration des Absorbers in die VECSEL Struktur, und mehrere Watt mit Pulsen kürzer als 500 fs sind absehbar von einer MIXSEL Struktur. Von modengekoppelten elektrisch gepumpten VECSELn sind 200 mW mit Pulsedauern kürzer als 10 ps zu erwarten.