

DOCTORAL THESIS ETH No. 15706

HIGH PEAK POWER PASSIVELY MODE-LOCKED VECSELS

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

presented by

ALEX ASCHWANDEN

Dipl. Phys. ETH (Swiss Federal Institute of Technology)

born on February 11, 1974

citizen of Seelisberg (Uri)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. U. Keller, Supervisor

Prof. Dr. A. Tropper, Co-Examiner

PD Dr. R. Paschotta, Co-Examiner

2004

Abstract

This thesis presents the development of optically pumped passively mode-locked vertical external-cavity surface-emitting lasers (VECSELs) with high average output power and at repetition rates between 1.5 GHz and 10 GHz.

Although semiconductor lasers were optically pumped already in the early stage after the invention of the laser, optical pumping of semiconductor lasers was not of large interest in science and industry until it came apparent that high continuous wave (cw) output power with good beam quality was achievable with the optically pumped external-cavity approach. Up to 30 W cw output power has recently been demonstrated by an optically pumped VECSEL.

Optically pumped and passively mode-locked VECSELs have the potential to generate pulses with high average power even at high repetition rates, due to the low gain saturation fluence, which drastically reduces Q-switch mode locking (QML) in VECSELs compared to solid-state lasers. The first passively mode-locked VECSEL was demonstrated in the year 2000. Within two years after the first demonstration, the output powers of mode-locked VECSELs had reached the 1 W level. However, the pulse durations obtained in these early experiments spanned a wide range from nearly transform-limited 3.2 ps up to strongly chirped 27 ps, even in one single device. The characteristics of the pulses depended strongly on a variety of operating conditions like the power level and the temperature. The reasons for this were not clear at that time, and it soon became apparent that a deeper understanding of the mode locking mechanics in VECSELs had to be developed.

Simulations as discussed in this thesis predict that with proper dispersion management in the laser, the chirp can be reduced considerably and short and

nearly transform-limited pulses can be generated. Basic pulse shaping mechanisms indicate that the laser does not necessarily have to operate at the gain maximum and that positive intra-cavity dispersion is required for the generation of short and nearly transform-limited pulses of a few picoseconds or even sub-picosecond duration.

We present an optimized gain structure design, where the dispersion in the cavity can be adjusted by using a GTI in the VECSEL gain structure, and where the temperature rise over room temperature in the gain structure at laser operation, which affects the gain and the dispersion, is considered. After growth, the gain structure is carefully analyzed because epitaxy usually involves errors, which change some structure properties, as for example the dispersion, compared to the design. Some of these deviations can be compensated for in the laser design.

The basic results of the simulations are experimentally investigated by wavelength tuning of the laser with changing the temperature in the gain structure or by using an etalon. The etalon beneficially affects the VECSEL mode locking concerning the pulse quality and the cavity design. Therefore, highest output power was realized using an intra-cavity etalon. Up to 2.08 W average output power could be achieved in 4.7-ps pulses at a repetition rate of 4 GHz. The chirp could be drastically reduced compared to earlier results, but nevertheless, the optical spectrum could potentially yield transform-limited pulses of 2.3 ps duration. However, at 10 GHz repetition rate, the output is nearly transform limited with a time-bandwidth product of 0.42. The pulses are 6.1 ps long and are emitted at an average output power of 1.4 W. These power levels now allow very efficient single-pass frequency doubling, making VECSELs very attractive for use in laser display systems. These powerful lasers could also find application in the optical clocking of highly integrated circuits or as sources for optical sampling techniques.

Kurzfassung

Diese Dissertation behandelt optisch gepumpte und passiv modengekoppelte Oberflächenemittierende Halbleiterlaser (VECSEL: vertical external-cavity surface-emitting laser) mit einem externen Resonator, die hohe mittlere Ausgangsleistungen bei Repetitionsraten zwischen 1.5 GHz und 10 GHz erreichen.

Obwohl schon kurz nach der Erfindung des Lasers an optisch gepumpten Halbleiterlasern geforscht wurde, erweckten diese kein grosses Interesse, sowohl in der Wissenschaft, als auch in der Industrie, bis zu dem Zeitpunkt, als mit optisch gepumpten Halbleiterlasern mit externen Resonatoren hohe Ausgangsleistungen im Dauerstrichbetrieb (cw: continuous wave) mit guter Strahlqualität erzielt werden konnte. Bis zu 30 W cw Ausgangsleistung wurde kürzlich mit einem optisch gepumpten VECSEL demonstriert.

Optisch gepumpte und passiv modengekoppelte oberflächenemittierende Halbleiterlaser mit externem Resonator besitzen das Potential, zu hohen Ausgangsleistungen, sogar bei sehr hohen Repetitionsraten, da dieser Laser eine niedrige Verstärkungssättigungsfluenz aufweist, was gütegeschaltetes Modenkoppeln (QML: Q-switch mode locking) von VECSEL gegenüber Festkörperlasern drastisch reduziert. Der erste passiv modengekoppelte VECSEL wurde im Jahre 2000 vorgestellt. Innerhalb von nur zwei Jahren erreichte die Ausgangsleistung die 1 W Grenze. Doch die Pulsdauern, die in diesen frühen Experimenten gemessen wurden, überdeckten einen weiten Bereich von beinahe Zeit-Bandbreite-limitierten 3.2 ps bis zu 27 ps langen Pulsen mit zeitlich stark variierender instantaner Frequenz (Chirp). Diese Pulseigenschaften hängen stark von verschiedenen Laser-Bedingungen ab, wie der Ausgangsleistung und der Temperatur. Die Gründe für dieses Verhalten waren damals noch nicht klar, aber es war offensichtlich, dass ein tieferes Verständnis des Modenkoppeln von VECSEL nötig wurde.

Simulationen, welche in dieser Dissertation vorgestellt werden, sagen voraus, dass mit geeignetem Dispersions-Management der Chirp der Pulse beträchtlich reduziert werden kann und sehr kurze und beinahe Zeit-Bandbreite-limitierte Pulse erzeugt werden können. Aus den Simulationen können fundamentale Pulsformierungseigenschaften extrahiert werden, wie zum Beispiel, dass der Laser nicht zwingend beim Verstärkungsmaximum emittieren muss, oder dass positive Dispersion im Laser zu kurzen und beinahe Zeit-Bandbreite limitierten Pulsen von wenigen Pikosekunden- oder sogar im Sub-Pikosekunden-Bereich führen kann.

Wir präsentieren ein optimiertes Design für die Verstärkerstruktur, wo die Dispersion über den Gires-Tournois-Interferometer (GTI-) Effekt eingestellt und die Temperaturerhöhung in der Struktur im Laserbetrieb, was die Verstärkung oder die Dispersion beeinflusst, berücksichtigt wird. Nach dem Wachstum muss die Struktur sorgfältig analysiert werden, da normalerweise Wachstumsfehler in den Schichtdicken Änderungen der Struktureigenschaften, wie zum Beispiel der Dispersion bei der Operationswellenlänge, mit sich zieht. Einige dieser veränderten Eigenschaften können beim Laserdesign korrigiert werden.

Die fundamentalen Resultate aus den Simulationen wurden experimentell untersucht. Die Emissionswellenlänge, und damit auch die Dispersion wurden durch Temperaturänderung oder mit einem Etalon variiert. Es hat sich gezeigt, dass das Etalon eine stabilisierende Wirkung auf das Modenkoppeln von VECSEL hat, was Pulsqualität und Kaitäts-Design betrifft. Entsprechend wurden die höchsten Ausgangsleistungen und kürzesten Pulse mit einem Etalon erreicht. Bis zu 2.1 W Durchschnittsleistung bei einer Repetitionsrate von 4 GHz in 4.7 ps langen Pulsen wurden gemessen. Der Chirp konnte gegenüber früheren Resultaten drastisch reduziert werden. Trotzdem erlaubt das Spektrum kürzere Pulse von 2.3 ps Dauer. Bei einer höheren Repetitionsrate von 10 GHz können schliesslich beinahe Zeit-Bandbreite-limitierte Pulse mit einem Zeit-Bandbreite-Produkt von nur 0.42 erzeugt werden. Die Ausgangsleistung beträgt dabei bis zu 1.4 W und die Pulse sind 6.1 ps lang. Ein Laser mit so hoher Ausgangsleistung kann als Pumpe für Frequenzverdopplung benutzt werden, wo der Strahl den Kristall nur einmal

durchquert, was den VECSEL sehr interessant für den Gebrauch in Laser-Display-Systemen macht. Weitere Anwendungsmöglichkeiten für diese leistungsfähigen Laser sind zum Beispiel deren Gebrauch als externer Taktgeber für integrierte Schaltungen oder für optische Abtast-Verfahren.