

0 EXECUTIVE SUMMARY

This work deals with the development and experimental investigation of a high-power short laser-pulse source that emits at a wavelength of 920 nm. The laser source consists of a monolithic multi-section mode-locked laser based on the GaAs material system. The main focus lies on the achievement of high pulse energies at pulse durations below 20 ps.

First, simulations of a four section DBR laser were carried out with the software tool LDSL in order to determine their potential in terms of pulse duration and output power. Based on the simulation results four section lasers with a waveguide thickness of $3.6 \mu\text{m}$ and a double quantum well acting as active region were realized. The four sections of the laser work as follows: The section at the front facet acts as a saturable absorber allowing the synchronization of the resonator modes and thus enable passive mode-locking. The second section, the gain section, provides the required power. The third section is a long active cavity section (length approx. $8000 \mu\text{m}$) which is required to reach an overall laser length of 10 mm. The round trip time for the overall length of 10 mm corresponds to 250 ps resulting in the desired repetition rate of 4 GHz. The fourth section adjacent to the rear facet is a DBR section that defines the emission wavelength. The length of the gain section was varied while keeping the overall laser length fixed by a corresponding variation of the cavity section length.

The lasers were grown by a two step metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE). In order to characterize the laser devices an appropriate mount including the driving electronics was developed. Furthermore a measurement setup consisting of a streak camera, an autocorrelator, and an electrical spectrum analyzer was realized and a corresponding controlling and evaluation software has been developed. These DBR lasers were systematically analyzed by measuring the average power and the spectral and temporal behavior of the generated pulses. In order to obtain hybrid mode-locking a high frequency sinusoidal shaped voltage was applied to the absorber section. The extensive experimental investigations showed that the lasers feature passive mode locking for nearly all operating parameters. The emission power scaled with the injection current through the gain as well as the cavity section. An increased voltage at the absorber section leads to shorter pulses and reduced phase noise. In order to reach laser emission the current through the cavity section is required to exceed the transparency current density. A further increase of the current through the cavity section increases the pulse energy, however, the pulse duration and the noise level are also increased. For very high cavity currents modelocking will finally be instable. The length of

the gain section influences the achievable pulse energy and pulse duration directly and thus influences the peak pulse level as well. For lasers with a $1500\ \mu\text{m}$ long gain section the achieved pulse energy was 25 pJ. With a shorter gain section of $1000\ \mu\text{m}$ a pulse energy of 12 pJ was reached. The lasers with the shortest gain section of $750\ \mu\text{m}$ delivered a maximum pulse energy of 10 pJ. For pulse energies below 3.7 pJ the measured pulses are transform limited with a pulse duration below 10 ps and a *sech*² pulse shape. The *sech*² shape is observed for pulse energies up to 7 pJ, however these pulses are not transform limited any more. The maximum achievable peak power at these power levels corresponds to 900 mW. For higher powers an increase of the pulse duration is observed and a definite determination of the pulse shape with the autocorrelation function can no longer be obtained. As a result, the calculated pulse parameters like peak power and time-bandwidth product become defective.

Besides passive mode-locking, hybrid mode-locking, realized by applying a high frequency AC voltage to the absorber section, has been investigated as well. If the frequency of the external voltage source lies in the range of the roundtrip time of the mode-locked laser, then the laser locks to the high frequency signal. Under hybrid mode-locking the round trip time of the laser is fixed to the external frequency and thus the long term frequency stability is increased. For a maximum external RF-power of 30 dBm the timing jitter measured by a phase noise measurement was reduced to about 1 ps. The specific design of these laser chips with the active region extending over all sections allows for an electrical pumping of the Bragg-grating section. The pumping of the Bragg grating with a current up to 100 mA leads to a significant increase of the output power and a reduction of phase noise for all three geometries presented. With this method the pulse peak power of a $1000\ \mu\text{m}$ device was increased to values beyond 2 W corresponding to twice the power obtained without pumping of the Bragg grating section. The pulse energy corresponds to 16.5 pJ. The pulse length of 7 ps was well below the aim of 20 ps. The timing jitter was reduced to 1.5 ps at passive operation. With hybrid mode-locking the timing jitter was even below 1 ps. The results reached in this work regarding pulse energies and maximum pulse power, shows the potential of the GaAs material system. Compared to the monolithic lasers presented in the literature the pulse energies were significantly increased. Electrical pumping of the Bragg-section resulted in an increased emission power and a significant reduction of the timing jitter. This work provides a deep insight into the physics and performance of GaAs based mode-locked lasers and can be used as a groundwork for the realization of mode-locked lasers at other wavelengths.

1 EINLEITUNG

Das von Albert Einstein Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelte Arbeitsprinzip der stimulierten Emission bildet die Grundlage aller Laserentwicklungen. Die erste technische Realisierung eines Lasers gelang im Jahre 1960 durch Maiman [1], unter Verwendung eines optisch gepumpten Rubinkristalls. Bereits im Jahre 1962 wurde der erste Laser auf Basis einer Halbleiterlaserdiode gleich von mehreren Gruppen demonstriert (z.B. [2]). Durch ständige Weiterentwicklung auf diesem Gebiet haben sich bis heute die optischen Technologien zu einer Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts entwickelt. Aktuell ist bei Laseranwendungen ein bevorzugter Trend hin zu möglichst kompakten Strahlquellen zu beobachten.

Es ist jedoch nicht nur die Verwendung des Lasers als Dauerstrichlichtquelle von Bedeutung, sondern es werden häufig kurze Laserpulse hoher Leistung mit einer schmalen Linienbreite und einer Wiederholrate von bis zu einigen Gigahertz für viele Einsatzgebiete benötigt: z.B. zeitaufgelöste Mikroskopie [3], in der Telekommunikation zur Datenübertragung [4] und zur Frequenzkonversion für Laserdisplays [5, 6] oder optisch parametrische Oszillatoren (OPOs) [7] und zur Takterzeugung [8].

Üblicherweise erfolgt die Erzeugung von kurzen Lichtpulsen hoher Spitzenleistung unter Verwendung modengekoppelter Hochleistungs-Scheibenlaser [9] oder Festkörperlaser mit integriertem sättigbaren Absorber [10]. Diese haben jedoch oft einen niedrigen Wirkungsgrad, sind schlecht zu handhaben und kostenintensiv im Unterhalt.

Die wesentlichen Vorteile, die sich aus der Verwendung von Halbleiterlasern zur Pulserzeugung ergeben, sind eine kleinere Bauweise, wesentlich höhere Effizienzen, hohe Zuverlässigkeit und eine einfache Handhabung. Des Weiteren sind Halbleiterlaser zur Erzeugung kurzer Laserpulse mittlerweile wohl etabliert [11, 12]. Da die minimal erreichbare Pulslänge invers von der Verstärkungsbandbreite abhängt sind Halbleiterlaser mit einem breiten Gewinnprofil von bis zu 88 nm [13] hervorragend zur Erzeugung kurzer Pulse geeignet. Zusätzlich können sie direkt elektrisch angeregt und moduliert werden.

Für die meisten Anwendungen wird eine wohl bestimmte Wellenlänge der emittierten Laserstrahlung benötigt. Hierzu wird normalerweise zur Frequenzstabilisierung ein externes Gitter und ein kantenemittierender Laser in externer Resonatoranordnung verwendet. Die vorherrschenden geometrischen Anordnungen sind nach Littrow [14] und Littmann benannt. Allerdings besitzen diese Aufbauten den Nachteil der mechanischen Instabilität und erfordern zumeist eine aufwendige Justage. Auch sind die maximalen Ausgangsleistungen auf einige

Milliwatt beschränkt [15] und müssen deshalb in einer Master Oszillator Power Amplifier (MOPA) Konfiguration [16] verstärkt werden.

Eine Möglichkeit, diese Nachteile zumindest teilweise zu kompensieren, besteht darin, dass optische Gitter in einem technologisch aufwendigen Prozess direkt in die Wellenleiterschicht des Lasers zu implementieren. Diese so genannten DBR¹ Laser bieten die Möglichkeit, kompakte frequenzstabile gepulste Laserquellen im Leistungsbereich einiger mW zu realisieren. Sowohl die spektrale Lage der Emission als auch die spektrale Breite können hierbei durch die Eigenschaften des Gitters gezielt eingestellt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Realisierung und experimentelle Charakterisierung von monolithischen modengekoppelten Mehrsektionshalbleiterlasern zur Erzeugung von Laserpulsen mit einer Pulslänge unter 20 ps bei einer Wiederholfrequenz von 4 GHz. Jedoch ist nicht nur die Pulslänge von Interesse, gleichzeitig wird besonderes Augenmerk auf eine möglichst hohe Pulsenergie gelegt. So kann z.B. eine MOPA-Konfigurationen wie sie von Fuchs [17] demonstriert wurde, auch ohne optischen Vorverstärker betrieben werden, was wiederum eine wesentliche Vereinfachung des experimentellen Aufbaus zur Folge hätte. In der vorliegenden Arbeit werden die theoretischen Grundlagen zur Erzeugung kurzer Pulse in Halbleiterlasern vorgestellt, sowie die verwendeten Messverfahren erläutert. Anschließend folgt ein Abschnitt, der sich mit der Herstellung sowie der Ansteuerung der Mehrsegmentlaser beschäftigt. Abschließend werden die Messergebnisse präsentiert und diskutiert.

¹engl. distributed bragg reflector