

Diss. ETH No 10112

Generation of Ultrashort Optical Pulses with Monolithic Mode-Locked Semiconductor Lasers

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Luigi R. Brovelli
dipl. Phys. ETH
born on May 16th, 1963
citizen of Bellinzona TI, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Melchior, examiner
Prof. Dr. H. Jäckel, co-examiner

July 1993

Abstract

Laser systems with the capability of generating ultrashort optical pulses by means of mode-locking are important tools for time-resolved characterization of material and device properties in the picosecond and femtosecond range. Compared to other laser systems, semiconductor lasers as pulse sources have the advantages of compactness, stability, low noise, low cost and high reliability, which also makes them interesting for additional applications in high-speed optical transmission systems and optical switching.

This work summarizes experiments and simulations on the generation of picosecond pulses with monolithic mode-locked (In)GaAs/AlGaAs quantum well lasers where the external cavity is replaced by an integrated active or passive waveguide cavity. A so-called active waveguide is simply a long waveguide segment that can be contacted separately and pumped above transparency. In a passive waveguide, the active region, which is highly absorbing when not pumped, is removed with the help of etching and regrowth techniques. Another way to integrate passive waveguides is to increase the band gap of the active region locally by means of partial disordering or growth over nonplanar substrates as is demonstrated in this work.

Integrating the external cavity as part of the diode laser waveguide circumvents problems that typically arise in mode-locking experiments using bulk optical elements as resonator. Such problems include multiple pulsation, poor mechanical stability and the need for very low-reflectivity coatings. The major disadvantage of monolithic mode-locked laser diodes is their high pulse repetition rate of typically several 10 GHz due to the difficulty of fabricating very long waveguides of high quality. To date, for most applications moderate repetition rates below 10 GHz may be more desirable. In addition, most mode locking experiments without external cavities led to pulses with relatively low pulse energies and peak powers. It is the aim of this study to show the feasibility of producing ultrashort pulses with high peak powers and at moderate repetition rates with compact monolithic laser diodes.

This thesis is divided into two parts. In the first part, results are presented from mode-locking experiments using three-segment GaAs/AlGaAs single quantum well lasers with integrated active waveguide cavities and short reverse biased segments which act as saturable absorbers. The best values obtained

were 2.2 ps pulse duration and 450 mW peak power from a passively mode-locked laser with 2.6 mm cavity length and 3.4 ps and 360 mW from a laser with 6.6 mm cavity length, corresponding to a repetition rate of 5.9 GHz. The shortest pulses with 1.9 ps duration were obtained by active mode-locking at a repetition rate of 17.6 GHz, but with significantly lower pulse energies.

In order to simulate the dynamic behavior of laser structures with nonuniform current injection, a travelling wave rate equation model has been developed which takes into account not only the temporal but also the spatial variations of the photon and carrier density inside the laser cavity. To compare the experimental results to the simulations and to test the validity of the model, it was necessary to determine the parameters from independent measurements. Thereby it was found that a voltage in reverse direction on the absorber section primarily influences its differential absorption due to the Stark effect as well as the absorber recovery time. Differential gain and differential absorption have been measured directly with the "Hakki-Paoli" method which uses the *internal generated and amplified spontaneous emission* of a Fabry-Perot laser to determine its optical gain as a function of wavelength. Another important parameter, especially for passive mode-locking, is the absorber recovery time which is mainly given by the field-induced tunneling escape time of photogenerated carriers out of the quantum well. For an accurate determination of the recovery time, field screening from carriers in the cladding layers has to be taken into account. Theoretical calculations as well as pulse-mixing experiments with 100 fs pulses from a mode-locked Ti-Al₂O₃ laser showed, dependent on voltage across the quantum well and on excitation pulse energy, a variation of the recovery time from less than 1 ps to more than 40 ps.

In general, good qualitative and quantitative agreement between experiments and simulations has been found, facilitating a detailed discussion of pulse widening and shortening mechanisms in mode-locked semiconductor lasers and allowing the prediction of achievable limits in terms of pulse duration, peak power and pulse energy for different experimental parameters.

The second part of the thesis deals with strained layer InGaAs/AlGaAs lasers with integrated passive waveguide cavities grown on nonplanar substrates by molecular beam epitaxy. Quantum well lasers obtained by growing the epitaxial layers over nonplanar substrates offer advantages in comparison to planar technology such as local band gap variations caused by variations of quantum well thickness or current confinement due to formation

of lateral blocking p - n -junctions. In the case of strained InGaAs/AlGaAs quantum wells, the observed band gap shift is much larger than that observed in unstrained GaAs/AlGaAs quantum wells, which is associated with variations of In content in the quantum well arising from incorporation of adatoms migrating from the low-growth side facets of the etched structures to the preferential-growth planar (100) facet during growth. This effect facilitates the integration of optical active and passive elements — e.g. amplifiers, detectors and modulators with waveguides and couplers — with a simple single-step growth technology that does not rely on complicated regrowth techniques or local quantum well disordering.

Using this technique, the successful integration of a laser amplifier with a 4-mm-long passive waveguide and a Stark modulator is reported. Lasing action was achieved by a current of 60 mA flowing through the amplifier section while the waveguide contact was grounded.

Mode-locking experiments were performed by applying an RF signal to the modulator segment. Since no carrier density variation in the passive waveguide occurred, self-phase modulation effects were reduced compared to active waveguides leading to nearly transform-limited pulses with 4.4 ps duration and a time-bandwidth product of 0.43.

Zusammenfassung

Lasersysteme, die in der Lage sind, ultrakurze Lichtpulse mit der Methode der Modenkopplung zu erzeugen, sind wichtige Werkzeuge zur zeitaufgelösten Charakterisierung von Halbleitermaterialien oder Bauelementen im Pikosekunden- oder Femtosekundenbereich. Verglichen mit anderen Lasersystemen haben Halbleiterlaser als Pulsquellen mehrere Vorteile: Kompaktheit, Stabilität, geringes Rauschen, geringe Kosten sowie eine hohe Zuverlässigkeit, wodurch sie auch interessant werden für andere Anwendungen in optischen Datenübertragungssystemen mit hohen Bitraten oder für optische Schalter.

Die vorliegende Arbeit fasst Experimente und Simulationen zusammen über die Erzeugung von Pulsen im Pikosekundenbereich mit monolithischen modengekoppelten (In)GaAs/AlGaAs Quantum Well Lasern wobei die externe Kavität durch eine integrierte aktive oder passive Wellenleiterkavität ersetzt wurde. Ein sogenannter aktiver Wellenleiter ist nichts anderes als ein langes Wellenleitersegment, das separat kontaktiert und über die Transparenz hinaus gepumpt werden kann. In einem passiven Wellenleiter ist die aktive Zone, die stark absorbiert wenn sie nicht gepumpt wird, mit Hilfe von Ätz- und Überwachstums-Techniken entfernt worden. Eine andere Möglichkeit zur Integration passiver Wellenleiter ist, die Bandlücke der aktiven Zone lokal zu erhöhen. Dies kann durch partielles Disorderung oder Wachstum auf nicht-planaren Substraten — wie es in dieser Arbeit gezeigt wird — erreicht werden.

Die Integration der externen Kavität als Teil des Laser-Wellenleiters umgeht Probleme, die typischerweise in Modenkopplungs-Experimenten mit konventionellen optischen Resonatoren auftauchen. Solche Probleme schliessen Satelliten-Pulse, schlechte mechanische Stabilität sowie die Notwendigkeit einer Antirefleksionsbeschichtung mit extrem niedriger Rest-Reflektion ein. Der wichtigste Nachteil von monolithischen modengekoppelten Halbleiterlasern hingegen ist die hohe Pulsrepetitionsrate von typischerweise einigen 10 GHz aufgrund der Schwierigkeit, sehr lange Wellenleiter hoher Qualität herzustellen. Zur Zeit jedoch sind für die meisten Anwendungen gemässigte Repetitionsraten unterhalb 10 GHz erwünscht. Dazu kommt, das in den meisten Modenkopplungs-Experimenten ohne externe Kavität Pulse mit relativ niedriger Energie und Spitzenleistung erzeugt wurden. Es ist das Ziel dieser Studie, die Möglichkeit zu zeigen, ultrakurze Lichtpulse mit hohen

Spitzenleistungen und mit gemässigten Repetitionsraten mit Hilfe kompakter, monolithischer Laserdioden zu erzeugen.

Die Arbeit ist in zwei Teile aufgeteilt. Im ersten Teil werden Resultate von Modenkopplungs-Experimenten präsentiert, welche mit Dreisegment-Lasern (sogenannte "GaAs/AlGaAs Single Quantum Well"-Laser) mit integrierten aktiven Wellenleitern und kurzen, in Sperrichtung gespannten Segmenten als sättigbaren Absorbern durchgeführt worden sind. Die besten Resultate sind 2.2 ps Pulsdauer und 450 mW Spitzenleistung von einem passiv modengekoppelten Laser mit einer totalen Kavitätslänge von 2.6 mm sowie 3.4 ps Pulsdauer und 360 mW Spitzenleistung von einem Laser mit 6.6 mm Kavitätslänge, was einer Repetitionsrate von 5.9 GHz entspricht. Die kürzesten Pulse sind mit 1.9 ps Dauer durch aktive Modenkopplung bei einer Repetitionsrate von 17.6 GHz erzeugt worden, jedoch mit deutlich geringerer Energie.

Zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Laserstrukturen mit nicht-uniformer Strominjektion wurde ein auf den Wanderwellengleichungen basierendes Modell entwickelt, welches nicht nur die zeitlichen sondern auch die räumlichen Veränderungen der Photonen- und Ladungsträger-Dichte in der Laserkavität behandeln kann. Um die experimentellen Resultate mit den Simulationen zu vergleichen und um die Gültigkeit des Modells zu testen, war es notwendig, die Modell-Parameter durch unabhängige Messungen zu bestimmen. Dabei wurde festgestellt, dass eine Spannung in Sperrichtung an einem Absorbersegment vor allem dessen differentielle Absorption durch den sogenannten "Quantum confined Stark"-Effekt sowie die Absorber-Erholzeit beeinflusst. Differentieller Gain und differentielle Absorption konnten direkt mit Hilfe der "Hakki-Paoli"-Methode gemessen werden, welche die intern generierte und verstärkte Spontanemission eines Fabry-Perot-Lasers benützt um dessen optische Verstärkung als Funktion der Wellenlänge zu bestimmen. Ein anderer, speziell für die passive Modenkopplung wichtiger Parameter ist die Erholzeit des sättigbaren Absorbers, die hauptsächlich durch die feld-induzierte Tunnel-Zeit der photogenerierten Ladungsträger aus dem Quantum Well gegeben ist. Für eine genaue Bestimmung der Erholzeit mussten Abschirmungs-Effekte durch Träger in den Cladding-Schichten berücksichtigt werden. Sowohl theoretische Berechnungen als auch "Pulse-Mixing"-Experimente mit 100-fs-Pulsen von einem modengekoppelten Ti-Al₂O₃ Laser zeigten, in Abhängigkeit von der Spannung über dem Quantum Well und der Energie des anregenden Pulses, eine Variation der Erholzeit von weniger als 1 ps bis mehr als 40 ps.

Im allgemeinen wurde eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie gefunden, was eine detaillierte Diskussion von puls-verbreitenden und verkürzenden Mechanismen in Halbleiterlasern ermöglicht und eine Vorhersage der erreichbaren Grenzen in Pulsdauer, Spitzenleistung und Pulsenergie für verschiedene experimentelle Parameter erlaubt.

Der zweite Teil der Arbeit handelt von sogenannten "Strained Layer InGaAs/AlGaAs"-Lasern mit integrierten passiven Wellenleitern, die mit Hilfe der Molekularstrahl-Epitaxie auf nicht-planaren Substraten gewachsen worden sind. Quantum-Well-Laser, die durch Wachstum auf nicht-planaren Substraten hergestellt worden sind, zeigen Vorteile verglichen mit planaren Technologien wie lokale Variationen in der Bandlücke, die durch Variationen der Quantum-Well-Dicke entstehen, oder Strom-Eingrenzung durch die Formierung lateral blockierender $p-n$ -Übergänge. Im Falle des verspannten InGaAs/AlGaAs-Quantum-Wells ist die beobachtete Veränderung der Bandlücke viel grösser als diejenige, die in unverspannten GaAs/AlGaAs-Quantum-Wells auftritt. Dies wird in Verbindung gebracht mit Variationen des In-Gehalts im Quantum-Well durch Aufnahme von Atomen, die während des Wachstums von den Seitenflächen der geätzten Strukturen zu den bevorzugten planaren (100)-Flächen migrieren. Dieser Effekt ermöglicht die Integration von optisch aktiven und passiven Elementen — z.B. Verstärker, Detektoren und Modulatoren mit Wellenleitern und Kopplern — mit Hilfe eines einzelnen Wachstums-Schritts ohne kompliziertes Überwachsen oder lokales Quantum-Well-Disordering.

Mit Hilfe dieser Technik wird die erfolgreiche Integration eines Laser Verstärkers mit einem 4-mm-langen passiven Wellenleiter und einem Stark-Modulator gezeigt. Laser-Tätigkeit wurde mit einem Strom von 60 mA im Verstärker-Segment erreicht während der Wellenleiter-Kontakt geerdet blieb.

Modenkopplung wurde durchgeführt durch Modulation des Modulator-Segments. Da keine Trägerdichte-Variationen im passiven Wellenleiter auftraten, waren Phasen-Selbstmodulationseffekte reduziert verglichen mit aktiven Wellenleitern. Dies führte zu beinahe transformations-limitierten Pulsen mit einem Zeit-Bandbreite-Produkt von 0.43 und 4.4 ps Pulsdauer.