

Compact Pulsed Diode-Pumped Solid-State Lasers at 1.3 μm and 1.5 μm

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zürich
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Regula Fluck
Dipl. Phys. ETH
born on August 7, 1968
citizen of Stetten (SH)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Ursula Keller, examiner
Prof. Dr. Hans Melchior, co-examiner

February, 1998

Abstract

This thesis investigates compact, diode-pumped, modelocked and Q-switched solid-state lasers with emission wavelengths at 1.3 μm and 1.5 μm .

Modelocking or Q-switching was achieved by incorporating a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) into the laser cavity. A SESAM consists of a semiconductor saturable absorber layer between two mirrors. SESAMs offer the possibility of custom-designing device parameters such as energy gap, modulation depth, saturation fluence, or recovery time. This allows for an optimum adaptation of these parameters to the laser requirements. As semiconductor materials we used III-V compounds, mainly the AlGaAs/GaAs, InGaAs/GaAs and InGaAsP/InP systems. Two aspects were important for this decision: First, these material systems span an energy gap range which corresponds with typical solid-state laser emission lines and, second, the growth technology for these materials is highly developed and substrates are commercially available. This thesis summarizes the basic design guidelines of SESAMs together with the different characterization methods. The stability criteria to either Q-switch or modelock a solid-state laser are also given.

Some applications such as fiber-optic applications, fiber sensing or spectroscopy need high repetition rates and short pulses. We demonstrated passive modelocking of 1.3 μm Nd:YLF and Nd:YVO₄ lasers using SESAMs. This is the first demonstration of a passively modelocked solid-state laser at this wavelength. The SESAMs used in these lasers are the first suitable available saturable absorbers for this wavelength range. Modelocking of these lasers is achieved by the fast saturable absorber action of the SESAM and, thus, resulted in pulses as short as 5.7 ps and 4.6 ps at a repetition rate of ~ 100 MHz.

For shorter pulse generation, Kerr lens modelocking (KLM) is the widely used pulse mechanism. Recently, a new modelocking technique, the soliton modelocking, was presented. In this technique, the pulses are solitons which are solely started and stabilized by a saturable absorber. The main advantage of soliton modelocking over KLM is the uncritical cavity design. The realization of a self-starting Cr:YAG laser with a SESAM is another proof of soliton modelocking. Stable transform limited pulses of 114 fs were produced without the critical cavity alignment required for KLM.

The broad gain bandwidth of optical parametric oscillators provide the possibility for ultrashort pulse generation. However, the gain bandwidth is often not completely used or the modes are not perfectly locked. This can be explained by the pulse shaping mechanism which becomes weaker for pulses much shorter than the pump pulses. The introduction of a SESAM into the cavity has lead to a pulse reduction according to fast saturable absorber modelocking theory.

For ultrashort pulses, the stopband of the semiconductor Bragg bottom mirror of a SESAM is a major limitation. Therefore, we designed and fabricated a broadband SESAM with a silver bottom mirror. Because semiconductors can not be epitaxially grown on silver, we developed a flip-chip process. Such broadband SESAMs successfully supported sub-10 fs pulses out of a Ti:sapphire laser.

The most compact laser setup is realized with a microchip laser, where the solid-state gain material itself forms the cavity. Because of the short cavity length these lasers tend to Q-switch. Passive Q-switching is demonstrated for both 1.3 μm and 1.5 μm microchip lasers. Pulse formation was achieved by directly attaching the SESAM to the standing wave laser. At 1.3 μm , single-frequency pulses as short as 230 ps have been demonstrated with a Nd:YVO₄ gain material. The repetition rate was 53 kHz, resulting in a pulse energy of 120 nJ and a peak power of almost half a kilowatt. At 1.5 μm , the lower emission cross section of the Er/Yb:glass gain material in combination with the longer upperstate lifetime allowed for much higher pulse energies. The highest pulse energy of 4 μJ was achieved with 5.6 ns pulse width and a repetition rate of 320 Hz. However, due to the large gain bandwidth of the Er/Yb:glass, this laser is no longer single-frequency. In both lasers, the scalable parameter range of the SESAM allowed for changes in the pulse width and repetition rate over two orders of magnitude.

Kurzfassung

Diese Dissertation behandelt die Realisierung von diodengepumpten, modengekoppelten oder gütegeschalteten Festkörperlasern, die bei einer Wellenlänge von $1.3\ \mu\text{m}$ bzw. $1.5\ \mu\text{m}$ emittieren.

Die Modenkopplung sowie auch das Güteschalten wird in diesen Lasern durch einen sättigbaren, absorbierenden Halbleiterspiegel (SESAM) im Laserresonator bewirkt. Ein SESAM besteht aus einer absorbierenden Halbleiterschicht zwischen zwei Spiegelstrukturen. SESAMs bieten die einmalige Möglichkeit Parameter wie Energiebandkante, Modulationstiefe, Sättigungsenergie-dichte oder Rekombinationszeit wunschgemäss festzulegen. Entsprechend kann ein SESAM ideal den Laserparametern angepasst werden. Als Halbleitermaterialien verwendeten wir ausschliesslich die folgenden III-V Verbindungen: AlGaAs/GaAs, InGaAs/GaAs und InGaAsP/InP. Aus folgenden zwei Gründen haben wir diese Materialien gewählt: Erstens umfassen sie einen Energiekantenbereich der ideal mit Festkörperlaserübergängen überlappt, und zweitens ist die Wachstumstechnologie weit verbreitet und Substrate sind kommerziell erhältlich. In dieser Dissertation werden die Designkriterien eines SESAMs aufgezeigt und die wichtigsten Charakterisierungsmethoden zusammengefasst. Weiter werden Stabilitätskriterien für die Modenkopplung sowie für das Güteschalten erläutert.

Anwendungen in der Telekommunikation und Spektroskopie verlangen nach Lasern mit hohen Repetitionsraten und kurzen Pulsen. Mit Hilfe eines SESAMs ist es uns gelungen, bei $1.3\ \mu\text{m}$ die ersten passiv modengekoppelten Laser herzustellen, einen Nd:YLF- sowie einen Nd:YVO₄-Laser. Modenkopplung wurde durch den schnellen sättigbaren Absorber im SESAM bewirkt. Damit wurden Pulslängen von $5.7\ \text{ps}$ und $4.6\ \text{ps}$ bei einer Repetitionsrate von $\sim 100\ \text{MHz}$ erzielt.

Um kürzere Pulse zu erreichen, wird in den meisten Fällen der Kerr-Effekt im Verstärkungsmaterial ausgenutzt, was zur sogenannten Kerr-Linsen-Modenkopplung, kurz KLM, führt. Kürzlich wurde eine neue Modenkopplungstechnik entdeckt, die auf der Erzeugung von Solitonen basiert und lediglich von einem sättigbaren Absorber initiiert und stabilisiert wird. Der Vorteil der Soliton-Modenkopplung gegenüber KLM liegt in der unkritischen Resonatoreinstellung. Die Realisierung eines selbststartenden modengekoppelten Cr:YAG-Lasers unter Mitwirkung eines SESAMs ist eine weitere

Bestätigung der Soliton-Modenkopplungstheorie. Stabile, transformlimitierte Pulse von 114 fs wurden erzielt.

Verschiedene optisch parametrische Oszillatoren weisen eine Verstärkungsbandbreite auf, die genügend breit ist, um ultrakurze Pulse zu unterstützen. In den meisten Fällen ist jedoch nicht die ganze Verstärkungsbandbreite perfekt gekoppelt. Der Mechanismus zur Bildung der Pulse wird schwächer, wenn die Pulsdauer kürzer als die Pumppulse werden. Das Einfügen eines SESAMs in den Resonator hat zu einer Pulsverkürzung geführt. Dies kann mit der 'Schnellen-Absorber-Modenkopplungstheorie' erklärt werden.

Für die ultrakurze Pulserzeugung stellt die verhältnismässig schmale spektrale Bandbreite eines Halbleiterspiegels eine einschneidende Limitierung dar. Die Lösung zu diesem Problem ist ein SESAM, bei dem der Halbleiterspiegel durch einen Silberspiegel ersetzt wird. Da Halbleitermaterialien nicht epitaktisch auf Silber aufgewachsen werden können, haben wir einen 'Flip-Chip Prozess' entwickelt. Solche breitbandigen SESAMs haben in einem Ti:Saphir Laser erfolgreich Pulse von weniger als 10 fs unterstützt.

Den kompaktesten Laseraufbau kann man mit einem Miniaturlaser realisieren, bei dem das Verstärkungsmaterial zugleich den Resonator bildet. Wegen der kurzen Resonatorlänge tendieren solche Miniaturlaser zum Güteschalten. Passiv gütegeschaltete Miniaturlaser wurden bei 1.3 μm und 1.5 μm gezeigt. Ein SESAM, das direkt in Kontakt mit dem Verstärkungsmaterial gebracht wird, sorgt für die Pulserzeugung. Mit einem Nd:YVO₄-Kristall wurden bei der Wellenlänge von 1.3 μm Pulse von 230 ps im Einmodenbetrieb erzeugt. Die Repetitionsrate betrug 53 kHz, die Pulsenergie 120 nJ und die Spitzenleistung erreichte einen Wert von beinahe einem halben Kilowatt. Bei 1.5 μm verwendeten wir ein Er- und Yb-dotiertes Glas, das wegen seines kleinen Emissionsquerschnittes und der langen Lebensdauer des oberen Laserniveaus einiges mehr an Pulsenergie liefern kann. Die höchste Pulenergie von 4 μJ wurde mit einer Durchschnittsleistung von 1.3 mW und einer Repetitionsrate von 320 Hz bei einer Pulslänge von 5.6 ns erreicht. Das breite Fluoreszenzspektrum von Er/Yb:Glas ermöglicht jedoch keinen Einmodenbetrieb mehr. In beiden Miniaturlasern konnte, durch entsprechende Anpassung des SESAM-Designs, die Pulslänge und Repetitionsrate über zwei Grössenordnungen variiert werden.