

Sättigbare Halbleiter-Absorberspiegel für ultraschnelle Festkörperlaser

Ursula Keller,
Departement Physik der ETH Zürich, CH

In den letzten Jahrzehnten wurden sehr große Fortschritte darin gemacht, ultraschnelle Prozesse - im Bereich von Piko- bis Femtosekunden - in der Natur zu beobachten, zu manipulieren und zu nutzen. Die ersten Ultrakurzpulslaser brauchten einen ganzen Labortisch und wissenschaftlich ausgebildetes Bedienpersonal. Die Erfindung und Entwicklung von sättigbaren Halbleiter-Absorberspiegeln ("semiconductor saturable absorber mirror" - SESAM, s. Bild 1) trug wesentlich zur Verbesserung der ultraschnellen Laser bei. SESAMs ermöglichen sehr einfache, selbststartende passive Modenkopplung von ultraschnellen Festkörperlaser [1]. Dadurch ebnen sie den Weg für viele neue praktische Anwendungen und die Kommerzialisierung dieser Laser - über Forschung und Entwicklung hinaus in Medizin, Industrie und Telekommunikation.

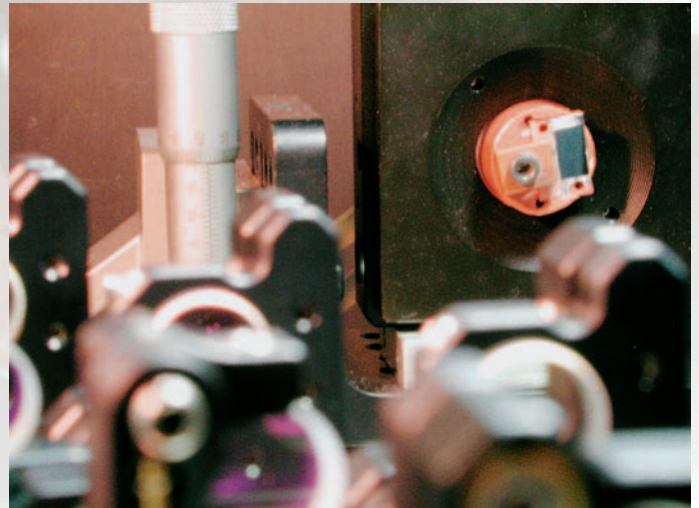


Bild 1: Im Labor: Ein SESAM auf einem Kupferhalter

1 Entwicklung

Passive Modenkopplung in Festkörperlaser, die das Erzeugen ultrakurzer Pulse ermöglicht, wurde erstmalig 1966 gezeigt, 6 Jahre nach Entdeckung des Lasers. Ein modengekoppelter Laser besteht grundlegend aus dem Laser-Verstärkungselement, dem Verlust- oder Modulator-Element und den Spiegeln (Ausgangskoppler und Hochreflektor), die die Laser-Kavität bilden (Bild 2). Ein Output-Koppler entlässt einen Teil der Laserpulse in durch die Resonator-Umlaufzeit bestimmten Abständen aus dem Resonator. Üblicherweise sammelt ein intrakavitativer Verlustmodulator das Laserlicht in kurzen Pulsen um das Minimum der Verlustfunktion, die Periode wird dabei durch die Umlaufzeit im Resonator vorgegeben.

Bei der aktiven Modenkopplung erfolgt die Verlustmodulation in einem optischen Modulator, der durch ein externes Treibersignal elektrisch gesteuert wird (Bild 3 oben). Für die passive Modenkopplung wird ein sättigbarer Absorber verwendet, um innerhalb der Laserkavität Amplituden-Selbstmodulation des Lichts zu erreichen. Ein solcher Absorber sorgt für Verluste der intrakavitativen Laserstrahlung, die für geringe Intensitäten relativ groß, aber für kurze Pulse mit hoher Intensität deutlich kleiner sind. So sättigt die hohe Intensität

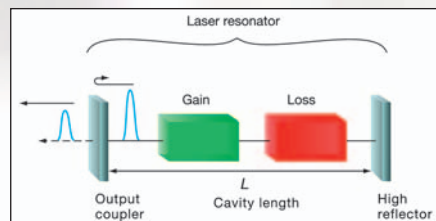


Bild 2: Grundlegender Aufbau eines modengekoppelten Lasers: Laser-Verstärkungselement, Verlust- oder Modulator-Element und Spiegel

der Spitze eines kurzen Pulses den Absorber stärker als die geringe Intensität seiner Flanken. Das führt zu einer Verlustmodulation mit einer schnellen anfänglichen Verlust-Sättigung (d.h. Reduktion des Verlusts) aufgrund der Pulsdauer und einer üblicherweise etwas langsameren Erholung, die von dem detaillierten Absorptionsprozess des Absorbers abhängt. Auf diese Weise sättigt der im Resonator zirkulierende Puls die Laserverstärkung bis zu einem Level, das gerade ausreicht um die Verluste für die Pulse auszugleichen (Bild 3 unten), während jedes andere zirkulierende Licht mehr Abschwächung als Verstärkung erfährt und während der folgenden Kavitätsthroughläufe verschwindet.

In der Zeit-Domäne generiert ein modengekoppelter Laser einen äquidistanten Pulszug, dessen Periode durch die Umlauf-

zeit eines Pulses innerhalb der Laserkavität und einer Pulsdauer definiert ist. In der Frequenz-Domäne entsteht ein phasengekoppelter Frequenzkamm mit einem konstanten Moden-Abstand, der gleich der Puls wiederholrate ist. Die spektrale Breite der Einhüllenden dieses Frequenzkamms ist umgekehrt proportional zur Pulsdauer.

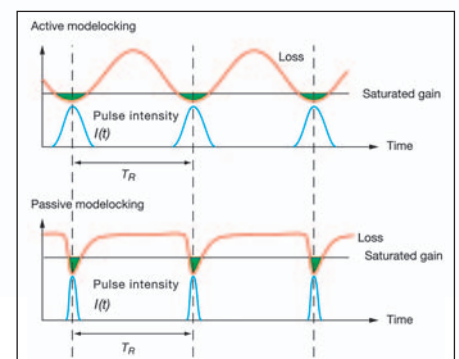


Bild 3: Oben: Bei der aktiven Modenkopplung wird die optische Güte des Verlustmediums von außen z.B. sinusförmig moduliert. Unten: Die Verlustmodulation bei der passiven Modenkopplung ist abhängig von der Intensität der Strahlung im Resonator: Hohe Intensitäten (Pulsspitzen) werden verstärkt, schwache (Pulsflanken) gedämpft. Die Verlustfunktion (rote Kurve) ist eine Eigenschaft des Halbleitermaterials des Spiegels (s.a. Bild 2).

Die passive Modenkopplung hat jedoch ein grundlegendes Problem: das sogenannte gütemodulierte Modenkopplungs-Verhalten oder auch Q-switching, bei dem ein überlagerter breiter gütegeschalteter Puls den Zug von sauber modengekoppelten Pulsen nahe der Relaxationsfrequenz des Lasers (typischerweise im kHz-Bereich) moduliert (**Bild 4**). Die eigentlichen modengekoppelten Pulse können dann nur unter besonderen Umständen und für sehr wenige Anwendungen verwendet werden. Eine große Herausforderung bei Festkörper-Lasern besteht in der richtigen Modulationstiefe des sättigbaren Absorbers: eine große Modulationstiefe bringt kürzere Pulse, eine zu große führt zu Q-switching-Instabilitäten. Die Erzeugung von ultrakurzen Pulsen machte große Fortschritte durch die Verwendung von Farbstofflasern in den 1970er und 80er Jahren. Theoretische Arbeiten deuteten damals darauf hin, dass passive Modenkopplung ohne Güteschaltung mit den meisten Festkörperlasern schwer bis unmöglich sei. Die Entwicklung neuer Feststoff-Lasermaterialien, insbesondere Titan:Saphir, führte in den 90er Jahren zu großen Fortschritten. Den darauf basierenden Femtosekundenlasern liegt der Mechanismus der Kerr-Linsen-Modenkopplung zugrunde [2], bei der der optische Puls auf das Verstärkermedium wirkt und so die Moden passiv selbstkoppliert. Dieser Effekt benötigt allerdings einen zusätzlichen Startmechanismus, funktioniert schlecht für ps-Laserpulse und besitzt konstruktive Beschränkungen, die seine Leistung in mehreren Punkten begrenzen.

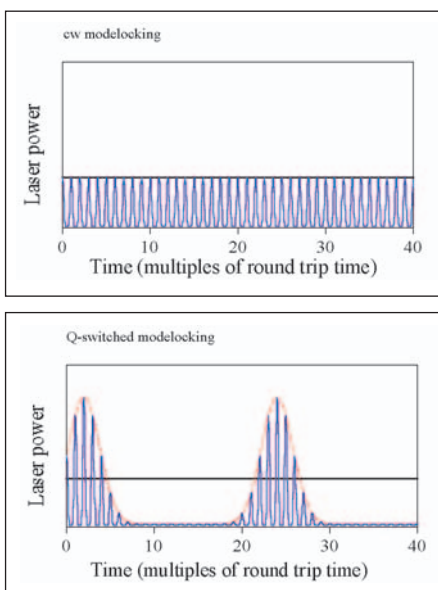


Bild 4: Kontinuierliche Modenkopplung (oben) und durch überlagertes Q-switching modulierter modengekoppelter Pulszug

In den meisten anderen passiv modengekoppelten Lasern bleibt das Q-switching ein wichtiger Punkt – und ein Problem. Das erste Mitglied der SESAM-Familie entstand 1992 – der antiresonante sättigbare Fabry-Perot-Absorber [3]. Er erlaubte die erste Demonstration eines passiv modengekoppelten Neodym:YLF-Lasers ohne Gütemodulation. Seitdem wurde die Leistungsfähigkeit von SESAMs in Festkörperlasern theoretisch untermauert, Auslegungs-Richtlinien für die Anwendung in praktischen Lasersystemen ausgearbeitet und mit Hilfe dieses Wissens noch nie da gewesene Verbesserung von wichtigen Laserfunktionen gezeigt:

- kürzeste Pulsbreiten unter 10 fs [4],
- höchste Durchschnitts- und Spitzenleistung eines passiv modengekoppelten Lasers (nJ erweitert auf μJ) [5] und
- höchste Puls wiederholraten von etwa 1 GHz auf >160 GHz erweitert [6].

Die Eleganz und Einfachheit der mit SESAM modengekoppelten Laser führte, insbesondere in Verbindung mit den diodenlasergepumpten Aufbauten der 80er und 90er Jahre, zu neuen praktischen, kommerziell erhältlichen ultraschnellen Lasersystemen. Diese werden weitgehend in Anwendungen verwendet, in denen sie teure, leistungshungrige und wartungsintensive Systeme ersetzen. Dadurch werden neue kommerzielle Anwendungen ermöglicht, z.B. in medizinischen und biomedizinischen Einsatzbereichen (bildgebende Mehr-Photonen-Absorption, Gewebeentfernung, korrektive Augen-Operationen), in der Präzisions-Mikro- und -Nano-Materialbearbeitung und in der Telekommunikation (Puls generierende Laser für zukünftige Soliton-artige Signalübermittlung und gesamt-optische Signalverarbeitung).

2 Grundlagen

Wie funktioniert ein SESAM? Die Schlüsselfunktion basiert auf den sättigbaren Absorptionseigenschaften von Halbleitern. Ein sättigbarer Absorber ist ein Material, dessen Lichtabsorption mit steigender Intensität sinkt. **Bild 5** zeigt die Physik hinter der sättigbaren Absorberfunktion in Halbleitern, die auf dem Abbau (Bleichen) der ursprünglichen Absorptionszustände des Übergangs basiert (im Grunde

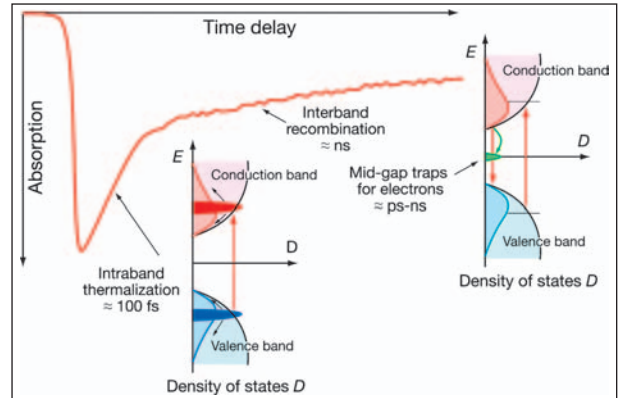


Bild 5: Zeitlicher Verlauf der Absorption im sättigbaren Halbleiter: nach der starken Anregung ist die Absorption zunächst gesättigt: zuerst (links) das Abklingen der hohen Zustandsdichten (dunkelblau und dunkelrot) jeweils innerhalb von Valenz- und Leitungsband, nach etwa 60-300 fs die Thermalisation, und anschließend (rechts) die Rekombination der Besetzungszustände zwischen den beiden Bändern. Dabei werden Elektronen für kurze Zeit (Nano- bis Pikosekunden) durch Störstellen in der Bandlücke eingefangen.

genommen das Pauli-Ausschluss-Prinzip): Ein Halbleiter kann Licht absorbieren, wenn die Photonenenergie ausreicht, um Ladungsträger aus dem Valenz- in das Leitungsband anzuheben. Bei starker Anregung ist die Absorption gesättigt weil mögliche Ausgangszustände des Pumpübergangs entleert werden und die Zielzustände zunehmend besetzt sind. Bei den meisten SESAMs entsteht die Sättigung im Leitungsband, da die Zustandsdichte bei III-V Halbleitern im Leitungsband viel kleiner ist als im Valenzband. Typischerweise thermalisieren die Ladungsträger im Leitungsband etwa 60 bis 300 fs nach der Anregung, was bereits zu einer teilweisen Erholung von der Anregung führt. Über einen längeren Zeitraum - zwischen ein paar Pikosekunden und ein paar Nanosekunden - werden sie durch Rekombination ins Valenzband oder Störstellen innerhalb der Bandlücke aus den angeregten Zuständen entfernt.

Diese unterschiedlichen Zeitskalen sind für die Modenkopplung sehr hilfreich: Die längere Zeitkonstante führt zu einer reduzierten Sättigungsintensität während eines Teils der Absorption was den Selbststart der Modenkopplung erleichtert, während die schnellere Zeitkonstante für das Formen von Sub-ps-Pulsen effektiver ist. Die Schlüsselparameter für einen sättigbaren Absorber sind der Wellenlängenbereich, in dem er absorbiert, seine dynamische Antwort (wie schnell er sich erholt) und seine Sättigungsintensität und Fluenz, also bei welcher Intensität oder Pulsenergie er gesättigt ist.

Der SESAM basiert auf der Nanotechnologie epitaktischer Materialabscheidung,

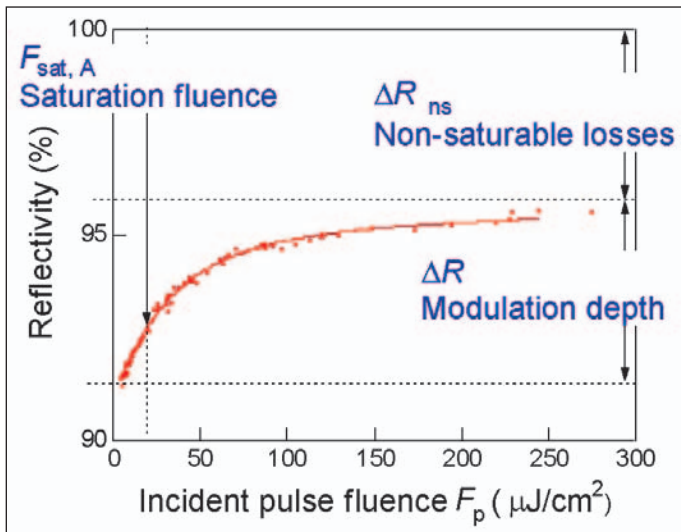


Bild 6: Die SESAM-Reflektivität R ist oberhalb der Sättigungsfluenz abhängig von der Flussdichte des einfallenden Laserpulses. Die Modulationstiefe ΔR reicht dabei bis an die Grenze der nicht-sättigbaren Verluste.

die eine Schichtdickenkontrolle mit Subnm-Genauigkeit ermöglicht. Bei richtigem epitaxialem Wachstum und korrekter optischer Auslegung können mit Halbleitermaterialien nahezu ideal sättigbare Absorberstrukturen für Festkörperlaser hergestellt werden. Die präzise Fertigung ermöglicht SESAMs mit großer Bandbreite gewünschter Eigenschaften und beinahe vollständiger Kontrolle der wichtigsten Parameter wie Stärke und Phase der optischen Absorption und Reflexion. Zusätzlich können die Sättigungsfluenz und ihre zeitliche Antwort angepasst werden. Diese Gestaltungsfreiheit und ein tiefes Verständnis von Festkörperlaser ermöglichen die Auslegung passiv modengekoppelter Laser für die meisten Lasersysteme. In **Bild 6** sind die optischen Charakteristika Modulationstiefe, Sättigungsfluenz und nicht-sättigbarer Verlust aufgetragen, die für das korrekte Laserverhalten wichtig sind [7]. Ist das Design optimiert, können SESAM-Spiegel in einer Halbleiter-Wafer-Produktion wirtschaftlich und in großen Stückzahlen produziert werden.

Die Theorie zur garantierten Unterdrückung ungewollter Güteschaltung führt zu einem relativ einfachen Ausdruck, der kontrollierbare Konstruktionsmerkmale des Lasers und die SESAM-Einheit so verbindet, dass gütemodulierte Modenkopplung vermieden werden kann [8]:

$$E_p^2 > E_{sat,L} E_{sat,A} \Delta R \quad (1)$$

worin E_p die intrakavitative Energie, $E_{sat,L}$ die Sättigungsenergie des Lasermediums, $E_{sat,A}$ die Sättigungsenergie des sättigbaren Absorbers und ΔR die Modulationstiefe des sättigbaren Absorbers sind. Diese Hauptgleichung bietet die notwendigen Richtlinien, um das Laserverhalten in die gewünschten Richtungen zu optimieren.

3 Erreichte Verbesserungen

Diodengepumpte cw-Laser begannen in den frühen 90ern, enorme Leistungen von hunderten Watt oder kW zu leisten, während die Ausgangsleistung von modengekoppelten Lasern noch auf etwa 100 mW begrenzt war. Erst in den letzten Jahren stieg diese Grenzen schnell auf mehrere zehn Watt - derzeit bis zu 80 W mit fs-Pulsen, was verschiedene neue Anwendungen ermöglicht [5]. 100 mW durchschnittliche Ausgangsleistung bei einer Pulswiederholrate von 100 MHz entsprechen 1 nJ Pulsenergie. Diese wurde um drei Größenordnungen gesteigert: der 80W-Laser liefert nahezu 2 μ J Pulsenergie direkt aus einem SESAM-modengekoppelten diodengepumpten Festkörperlaser, sowohl im ps- als auch im fs-Pulsbereich bei einer Pulsrate von 57 MHz. Er verfügt damit über ausreichend Energie für die Mikrobearbeitung. Ein solcher Laser wurde auch für eine neue RGB-Quelle mit einer beispiellosen Ausgangsleistung von 8 W im Roten, 23 W im Grünen und 10 W im Blauen verwendet [9]. Das System braucht weder Laserverstärkung noch synchronisierte optische Kavitäten. Diese RGB Laser-Quelle steht für einen großen Schritt auf dem Weg zu Hochleistungs-Laser-Projektionsdisplay für Kinos.

Außerdem wurden mittels externer Pulskompression mit 24fs-Pulsen und einer Wiederholrate von 57 MHz Spitzenleistungen von 16,5 MW generiert. Diese Energie könnte auf einen 6 μ m-Punktdurchmesser mit einer Spitzenintensität von 10^{14} W/cm² fokussiert werden, ein Bereich, in dem Höchstfeldlaserphysik möglich wird.

Erste Versuche, höhere Leistungen mit modengekoppelten Lasern zu erzeugen, wurden mit verschiedenen Problemen und Herausforderungen konfrontiert, wie

der Leistungssteigerung unter Beibehaltung eines Gauß'schen Strahlprofils und der Unterdrückung von gütemodulierten Instabilitäten. Viele Hochleistungslaserköpfe neigen zu großen Modenbereichen im Laserverstärkungsmedium. Daraus resultiert oftmals die schlechte Strahlqualität von Hochleistungs-Diodenlaserbarren. Während dies für viele cw-Laser kein Problem darstellt, führt es in einem passiv modengekoppelten Laser zu exzessiven gütegeschalteten Instabilitäten. Daher werden strengere Anforderungen an das SESAM-Design gestellt, die Modulationstiefe muss reduziert werden. Das ist einer der Gründe, weshalb die Leistungssteigerung üblicherweise auf Kosten längerer Pulse geht.

Der bisher beste Laserkopf zur Leistungskalierung passiv modengekoppelter diodengepumpter Festkörperlaser basiert auf dem Mitte der 90er Jahre von der Gruppe um A. Giesen an der Universität Stuttgart entwickelten Scheibenlaser-Konzept [10], das eine Scheibe beispielsweise aus Yb:YAG direkt auf einem wassergekühlten Halter verwendet. Die thermischen Unzulänglichkeiten des Stablasers-Konzepts werden bei einer Scheibendicke zwischen 100 und 250 μ m minimiert. Effiziente Pumpstrahlungs-Absorption in einer dünnen Scheibe erfolgt durch mehrfache Durchgänge (z.B. bis 32) der Pumpstrahlung. Heute sind solche dünnen Scheibenlaser mit mehr als 1 kW durchschnittlicher Leistung kommerziell erhältlich. Bisher gab es Kurzpuls-Laser mit Gauß'schem Strahlprofil nur mit max. 100 W durchschnittlicher Leistung, aber ein Vielfaches davon sollte möglich sein. Die Kombination von SESAM-modengekoppelten Scheibenlasern erlaubt weitere Leistungssteigerungen: die Haupt-Herausforderungen wie Strahlqualität, gütegeschaltete Instabilitäten und SESAM-Zerstörschwelle werden nicht schwerer zu bewältigen sein, wenn die Leistung entsprechend bestimmter Abgleichregeln skaliert wird. Daher werden auch die bisher erreichten 80 W Durchschnittsleistung nicht die Obergrenze bleiben.

4 Zusammenfassung

Mit Hilfe sättigbarer Halbleiter-Absorberspiegel ist es für beinahe alle Festkörperlaser möglich, passive Modenkopplung zu erreichen, da die relevanten SESAM-Parameter im Produktionsprozess eingestellt werden können. Durch SESAMs wurde die Leistung von UltrakurzpulsLasern deutlich gesteigert und damit ihr Anwendungsbereich erweitert. Insbesondere in Verbindung mit Scheibenlasern sind weitere Leistungssteigerungen zu erwarten.

Verschiedene Ultrakurzpuls-Lasersysteme sind bei der Time-Bandwidth Products AG erhältlich, einem Spin-Off Unternehmen der ETH Zürich.

Literaturhinweise

- [1] U. Keller, *Recent developments in compact ultrafast lasers*, Nature, vol. 424, pp. 831, 2003
- [2] D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett, *60 femto-second pulse generation from a self mode-locked Ti:sapphire laser*, Opt. Lett., vol. 16, pp. 42, 1991
- [3] U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd, T. H. Chiu, J. F. Ferguson, M. T. Asom, *Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber*, Opt. Lett., vol. 17, pp. 505, 1992
- [4] G. Steinmeyer, D. H. Sutter, L. Gallmann, N. Matuschek, U. Keller, *New frontiers in ultrashort pulse generation: pushing the limits in linear and nonlinear optics*, Science, vol. 286, pp. 1507, 1999
- [5] R. Paschotta, U. Keller, *Ever higher power from mode-locked lasers*, Optics & Photonics News, pp. 50, May 2003
- [6] R. Paschotta, L. Krainer, S. Lecomte, G. J. Spühler, S. C. Zeller, A. Aschwanden, D. Lorenser, H. J. Unold, K. J. Weingarten, U. Keller, *Picosecond pulse sources with multi-GHz repetition rates and high output power*, New J. of Phys., July 2004
- [7] M. Haiml, R. Grange, U. Keller, *Optical characterization of semiconductor saturable absorbers*, Appl. Phys. B vol. 79, pp. 331, 2004
- [8] C. Hönniger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, U. Keller, *Q-switching stability limits of cw passive modelocking*, J. Opt. Soc. Am. B, vol. 16, pp.46, 1999
- [9] E. Innerhofer, F. Brunner, S. V. Marchese, R. Paschotta, U. Keller, *RGB Source Powers Up Laser Projection Displays*, Photonics Spectra, pp. 50, June 2004
- [10] A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, H. Opower, *Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state-lasers*, Appl. Phys. B, vol. 58, pp. 365, 1994

Ansprechpartner

Prof. Dr. Ursula Keller
 Institut für
 Quantenelektronik
 Eidgenössische Technische
 Hochschule Zürich
 ETH Hönggerberg,
 HPT E16.2
 CH-8093 Zürich
 Tel. +41/1/633-2146
 Fax: +41/1/633-1059
 eMail: keller@phys.ethz.ch
 Internet: www.iqe.ethz.ch/ultrafast
 www.tbwp.com

