

# Ultrakurzpuls-Festkörperlaser – eine vielfältige Familie

Rüdiger Paschotta,  
RP Photonics Consulting GmbH, Zürich, CH

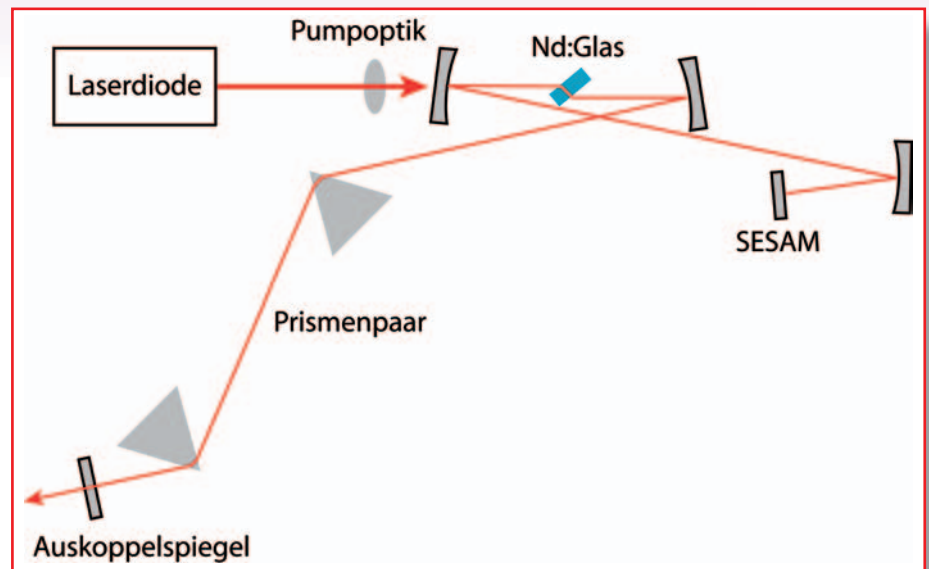
**Modengekoppelte Festkörperlaser verschiedener Arten erlauben die Erzeugung von Lichtpulsen mit Pulsdauern im Piko- oder Femtosekundenbereich, Pulsenergien von Pikojoules bis zu einigen Mikrojoules und Pulsfrequenzen von wenigen Megahertz bis zu vielen Gigahertz. Im folgenden wird eine kurze Einführung in die Technologie von Ultrakurzpuls-Festkörperlaser gegeben, sowie ein Überblick über neue Entwicklungen.**

Nanosekunden-Lichtpulse von gütegeschalteten Lasern gelten als kurze Pulse, aber für das Prädikat „ultrakurz“ werden Pulsdauern im Piko- oder Femtosekundenbereich verlangt. Solche Pulse werden meist in modengekoppelten Lasern erzeugt, die zwar einige Merkmale mit gütegeschalteten Lasern gemeinsam haben, sich jedoch sowohl in den physikalischen Prinzipien der Pulserzeugung als auch in den Parametern der erzeugten Pulse enorm unterscheiden.

## 1 Prinzip der aktiven und passiven Modenkopplung

Zum grundlegenden Prinzip eines modengekoppelten Lasers gehört, dass ein oder manchmal auch mehrere Lichtpulse ständig im Laserresonator umlaufen. Jedesmal, wenn hierbei der teildurchlässige Auskoppelspiegel getroffen wird, entsteht im Ausgangsstrahl ein verwendbarer Puls. Die Wiederholrate ergibt sich aus der für einen Umlauf benötigten Zeit und der Anzahl der umlaufenden Pulse (die meist 1 ist). Die Pulsdauer liegt deutlich unterhalb der Resonatorumlaufdauer, oft sogar um viele Größenordnungen. Entsprechend weit kann die erzielte Spitzenleistung über der Durchschnittsleistung liegen.

Wie bringt man nun einen Laser dazu, einen umlaufenden ultrakurzen Puls zu erzeugen, anstatt gleichmäßig zu emittieren? Grundsätzlich kann dies mit aktiven oder passiven Methoden geschehen [1]. Im ersten Fall werden mit einem elektrisch gesteuerten Modulator im Resonator die optischen Verluste synchron mit den Resonatorumläufen moduliert. Der jeweils zur „richtigen“ (verlustärmsten)

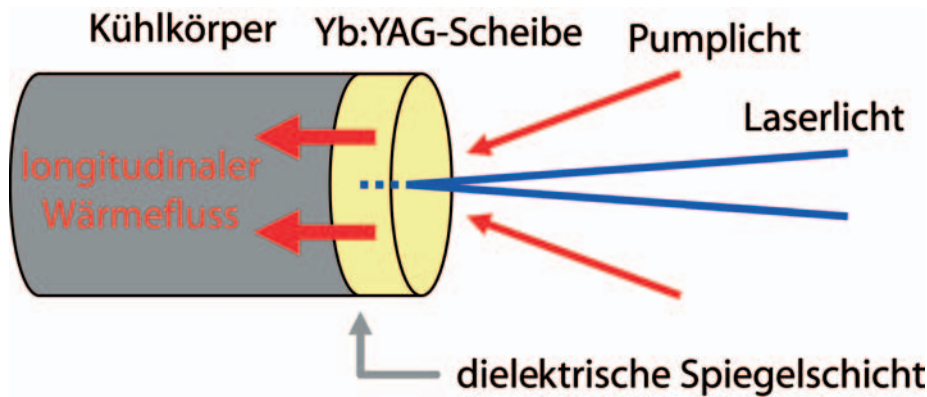


**Bild 1:** Aufbau eines modengekoppelten diodengepumpten Nd:Glas-Lasers mit moderater Ausgangsleistung (z.B. 100 mW) in 100-fs-Pulsen. Ein Prismenpaar kompensiert die Dispersion, und ein SESAM dient dem Modenkoppeln

Zeit am Modulator eintreffende Puls sättigt (reduziert) die Laserverstärkung so, dass diese seine Verluste pro Umlauf genau ausgleicht. Zu anderen Ankunftszeiten liegen dann die Verluste oberhalb der Verstärkung, so dass evtl. anfangs noch mit zirkulierende andere Pulse oder ein zeitlich gestreckter Untergrund mit der Zeit eliminiert werden. Nach vielen Umläufen ergibt sich ein Gleichgewicht für die Parameter des umlaufenden Pulses, bei dem sich z.B. den Puls verlängernde und verkürzende Effekte im Resonator genau die Waage halten. Typischerweise ergeben

sich Pulsdauern in der Größenordnung von 10-50 ps.

Wesentlich kürzere Pulse erhält man mit passivem Modenkoppeln, wobei die Verlustmodulation in einem sättigbaren Absorber geschieht. Je kürzer die Pulse werden, desto schneller die Modulation. Zusätzlich wirken meist noch andere Effekte an der Pulsformung mit, insbesondere Dispersion und Nichtlinearitäten; je nach Situation können diese die Pulsverkürzung behindern oder aber unterstützen. Die heutzutage eingesetzten sättigbaren Absorber sind meist sogenannte SESAMs



**Bild 2:** Aufbau eines Scheibenlaserkopfs. Verstärkungsmedium ist eine Yb:YAG-Scheibe mit z.B. 100-200  $\mu\text{m}$  Dicke. Die entstehende Wärme fließt in Richtung der Strahlachse in den Kühlkörper. Das Pumplicht wird mit einer speziellen Reflektor-Optik (nicht gezeigt) mehrfach über die Scheibe geleitet

(semiconductor saturable absorber mirrors), also kleine Halbleiterbauelemente mit einer Bragg-Spiegelstruktur und einer dünnen absorbierenden Schicht [2]. Diese SESAMs haben sich als extrem vielfältig einsetzbar erwiesen - selbst für Laser mit extrem hohen Ausgangsleistungen. Ihre optischen Parameter lassen sich durch geeignete Wahl des Halbleitermaterials und der Schichtdicken in weiten Bereichen variieren.

## 2 Typischer Aufbau

Obwohl auch Halbleiterlaser modengekoppelt werden können, dominieren diodengepumpte modengekoppelte Festkörperlaser (**Bild 1**) weite Anwendungsfelder. Ihre Verstärkungsmedien sind Kristalle oder Gläser, die mit laseraktiven Ionen der seltenen Erden (Nd, Yb, Er) oder gewisser Übergangsmetalle (Ti, Cr) dotiert sind. Typische Vertreter dieser Gattung von Lasern arbeiten im 1- $\mu\text{m}$ -Bereich (mit Nd- oder Yb-dotierten Kristallen oder Gläsern), werden mit Breitstreifen-Laserdioden gepumpt und emittieren Durchschnittsleistungen von ca. 0,1 bis 2 W. Eine typische Resonatorlänge von z.B. 1 m ergibt eine Pulsrepetitionsrate von 150 MHz. Die Pulsdauern liegen meist im Bereich 1-10 ps für Laserkristalle und 50 fs bis 500 fs für Gläser als Verstärkungsmedien. Für 1 W Durchschnittsleistung in 100-fs-Pulsen bei 100 MHz ergeben sich Spitzenleistungen von fast 100 kW. Kommerziell erhältliche Geräte dieser Art verlangen vom Anwender meist nicht viel mehr als das Drehen eines Schlüssels. Vielfältige Entwicklungen sind im Gange. Neue Yb-dotierte Kristalle erlauben ähnlich kurze Pulse wie Gläser, während ihre bessere Wärmeleitfähigkeit höhere Leistungen ermöglicht. Besondere Designs führen zu Lasern, die mit kleinen Batterien betrie-

ben werden können und sehr wenig Platz benötigen.

## 3 Am Limit kurzer Pulse

Laserkristalle mit Übergangsmetallen, etwa Ti:Saphir oder Cr:LiSaF, kommen zum Einsatz für die kürzesten Pulse. Mit Ti:Saphir-Lasern werden heute routinemäßig Pulsdauern unterhalb von 10 fs erreicht, und bei ca. 5,5 fs scheint die endgültige Grenze zu liegen [3]. In diesem Bereich ist selbst die extrem große Verstärkungsbandbreite von Ti:Saphir kaum mehr ausreichend, und durch die hohen Spitzenleistungen werden störende nichtlineare Effekte sehr stark. Außerdem ist es schwierig, die Dispersion des Resonators über einen großen spektralen Bereich hinreichend genau einzustellen. Hierfür wurden spezielle doppelt „gechirpte“ Laserspiegel entwickelt, mit denen man deutlich weiter kommt als mit früheren Ansätzen.

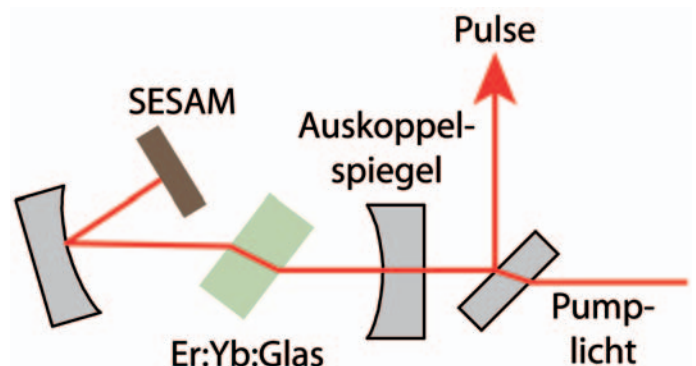
Bei manchen Anwendungen ist nicht die extrem kurze Pulsdauer von Bedeutung, sondern die Breite des erzeugten Spektrums, die annähernd eine Oktave umfassen kann. Mit Hilfe einer mikrostrukturierten Glasfaser („photonic crystal fiber“) kann das Pulsspektrum ggf. auch außerhalb des

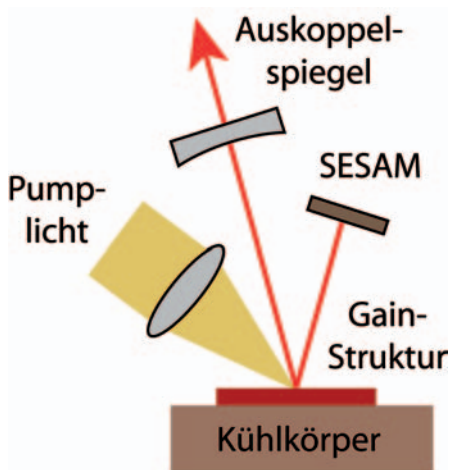
Laserresonators noch verbreitert werden. Dies ermöglicht die Erzeugung selbstreferenzierender Frequenzkämmen [4], die für Anwendungen in der Frequenzmetrologie sehr wichtig werden und durch die Verleihung des Physik-Nobelpreises 2005 u.a. an Prof. Theodor W. Hänsch (MPI für Quantenoptik, Garching) z.Zt. besonders viel Aufmerksamkeit erhalten.

## 4 Leistungsskalierung

Drastisch erhöhte Ausgangsleistungen schienen mit modengekoppelten Festkörperlasern insbesondere für Sub-Pikosekundenpulse anfangs schwer erreichbar, da dies starke thermische Effekte im Lasermedium verursacht und oft nicht viele Pulse erzeugt werden konnten, bis das SESAM zerstört war. Genauere Analysen ergaben, dass man dieses Problem nicht dort angehen sollte, wo der Rauch aufsteigt. Besser optimiert man diverse Parameter des Lasers, insbesondere solche des Resonators und des Laserkopfs, um den SESAM unter optimalen Bedingungen betreiben zu können. Dies wurde insbesondere mit modengekoppelten Yb:YAG-Scheibenlasern (**Bild 2**) demonstriert [5], die aufgrund der Kühlgeometrie des Laserkopfs sehr hohe Leistungen zulassen und Sub-Pikosekundenpulse erzeugen können, weil Yb:YAG (anders z.B. als Nd:YAG) relativ breitbandig verstärken kann. Nach ersten Versuchen mit 16 W Durchschnittsleistung konnte diese weiter gesteigert werden auf 60-80 W [6]. Hiermit liegt die Energie der Sub-Pikosekunden-Pulse über 1  $\mu\text{J}$  und die Spitzenleistung deutlich oberhalb von 1 MW, was solche Laser bereits ohne Nachverstärkung für die Mikromaterialbearbeitung einsetzbar macht. Wesentlich kürzere Pulsdauern (< 30 fs) mit immer noch hohen Pulsenergien lassen sich durch Kompression in einer speziellen Glasfaser mit großer Modenfläche realisieren [7], während andere Wellenlängen mit diversen Methoden der nichtlinearen Frequenzkonversion erreichbar sind [8].

**Bild 3:** Aufbau eines Er:Yb:Glas-Miniaturlasers für Repetitionsraten von 10-50 GHz. Für 50 GHz ist die Resonatorlänge (vom Auskoppelspiegel zum SESAM) nur 3 mm





**Bild 4:** Resonatoraufbau eines modenkoppelten VECSELS. Die Gain-Struktur wird mit einer Hochleistungs-Laserdiode gepumpt. Der Resonator enthält ein SESAM als Modenkoppler

## 5 Steigerung der Repetitionsrate

Um eine höhere Pulswiederholrate zu erreichen, lässt sich zunächst die Pulsumlaufzeit mit Hilfe eines kompakten Laserresonators drastisch reduzieren. Leider führt dies bei passiv modenkoppelten Lasern meist dazu, dass die Neigung zu Instabilitäten der Pulsenergie immer stärker wird (Q-switching instabilities [1]). Deswegen waren die erreichbaren Repetitionsraten anfangs auf wenige GHz beschränkt, und für schnellere Pulsfolgen, wie sie z.B. für die Telekommunikation und für bestimmte Messzwecke benötigt werden, kamen solche Laser nicht in Frage. Jedoch eröffnete auch hier eine genaue Analyse der Phänomene und Zusammenhänge Wege zu drastischen Verbesserungen. Bei Wellenlängen um  $1\ \mu\text{m}$  wurden mit Nd:YVO<sub>4</sub>-Lasern fast 160 GHz erreicht [9], im  $1,5\text{-}\mu\text{m}$ -Bereich (z.B. für die Glasfaser-Kommunikation) immerhin 50 GHz [10] (Bild 3). Verglichen mit Halbleiterlasern, die noch deutlich höhere Repetitionsraten erlauben [11], sind die erreichbaren Ausgangsleistungen viel höher (typisch 10-50 mW), und die Pulsqualität ist exzellent. Außerdem könnte sich der Ansatz des passiven Modenkoppelns für viele Anwendungen als sehr praktisch erweisen, da die teure Multi-GHz-Elektronik entfällt.

## 6 Neuere Lasertypen

Die Optimierung entweder für hohe Ausgangsleistungen oder für Multi-GHz-Repetitionsraten führt in sehr verschiedene Richtungen, weshalb die Kombination beider Eigenschaften für herkömmliche

Festkörperlaser sehr schwierig ist. Genau dies wäre jedoch erwünscht für zukünftige Anwendungen etwa beim optischen Takten von Mikroprozessorschaltungen oder für das synchrone Pumpen optisch-parametrischer Oszillatoren. Noch größer wird die Herausforderung, wenn zusätzlich noch Sub-Pikosekunden-Pulsdauern gefordert sind. Hieraus ergibt sich eine Kombination von Anforderungen an das Verstärkungsmedium, die mit allen heutigen Laserkristallen oder -gläsern bis auf weiteres nicht zu erfüllen sind.

### 6.1 VECSELS

Umso überraschender ist es, dass ausgerechnet Halbleiterlaser sich anschicken, diese Lücke auszufüllen – obwohl gerade modenkoppelte Halbleiterlaser bis vor kurzem noch in ihrer Ausgangsleistung sehr beschränkt waren. Freilich handelt es sich dabei um einen ganz neuen Typ von Halbleiterlaser: keinen konventionellen Diodenlaser, sondern einen optisch gepumpten oberflächen-emittierenden Laser mit externem Resonator (VECSEL, Bild 4). Solche Laser können recht hohe Leistungen mit bester Strahlqualität erzeugen [12,13], und mit einem SESAM lassen sie sich auch modenkoppeln [14], wobei sogar im Falle sehr hoher Repetitionsraten keine Instabilitäten der Pulsenergie auftreten. Bisher wurden z.B. 1,4 W Durchschnittsleistung in 6-ps-Pulsen mit 10 GHz Repetitionsrate demonstriert [15]. Selbst die Erzeugung von 0,5-ps-Pulsen ist möglich [16], wenn auch bisher noch nicht mit hoher Ausgangsleistung demonstriert. In den nächsten Jahren dürften Kombinationen wie z.B. 3 W, 0,5 bis 5 ps und 10-40 GHz möglich werden. Mit etwas längerem Zeithorizont werden ähnliche Laser voraussichtlich auch direkt elektrisch zu pumpen sein, und der sättigbare Absorber könnte in die Verstärkungsstruktur integriert werden [17]. Dagegen dürften niedrigere Repetitionsraten und höhere Pulsenergien die Domäne konventioneller Festkörperlaser bleiben. Von der Kühlgeometrie her ähnelt der VECSEL übrigens stark dem Scheibenlaser. Dessen völlig unterschiedliche mikroskopische Parameter (insbesondere Wirkungsquerschnitte und Lebensdauer des angeregten Zustands) machen ihn trotzdem für ganz andere Parameterbereiche einsetzbar als den Scheibenlaser.

### 6.2 Faserlaser

Eine ganz andere Art von Laser ist der Faserlaser. Nd-, Yb- oder Er-dotierte Fasern haben eine große Verstärkungsbandbreite, was für die Pulserzeugung vorteilhaft ist. Ein Faserlaser kann wiederum mit einem SESAM passiv modenkoppelt werden,

oder auch unter Ausnutzung der hohen Nichtlinearität der Fasern. Beispielsweise lässt sich die nichtlineare Rotation der Polarisationsrichtung in Kombination mit einem polarisierenden Element im Resonator als ein sehr schneller „effektiver sättigbarer Absorber“ einsetzen.

Modengekoppelte Faserlaser sind robuste und potentiell sehr preisgünstig herzustellende Quellen ultrakurzer Pulse. Jedoch sind Leistung und Pulsdauer durch die starke Nichtlinearität der Fasern begrenzt, und gute Pulsqualität, Langzeitstabilität oder hohe Repetitionsraten erfordern oft etwas komplizierte Maßnahmen. Das Design solcher Laser ist u.U. eine nicht-triviale Aufgabe. Man darf gespannt sein, in wieweit Faserlaser wirklich andere Festkörperlaser verdrängen werden.

Fasern sind auch für die Nachverstärkung der in einem anderen Laser erzeugten Pulse interessant. Extrem hohe Durchschnittsleistungen von mehreren hundert Watt sind möglich [18], auch wenn die Erhaltung der Pulsqualität einige Anstrengungen erfordert. Insbesondere für die Materialbearbeitung sind solche Anforderungen aber unwichtig, und Faserverstärkersysteme dürften dort in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

## 7 Fazit

Für die Erzeugung ultrakurzer Pulse gibt es unterschiedlichste Ansätze, die meist eine gewisse Region des riesigen Parameterraums abdecken. Konkurrenzsituationen treten dort auf, wo diese Regionen überlappen. Im Einzelfall kommt es darauf an, die jeweils geeignete Technologie auszuwählen und auf der Grundlage eines soliden physikalischen Verständnisses die mögliche Leistungsfähigkeit auszuschnöpfen.

## Literaturhinweise

- [1] Encyclopedia of Laser Physics and Technology ([www.rp-photonics.com/encyclopedia.html](http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html)), Artikel über mode locking, mode-locked lasers, gain saturation sowie über viele andere Stichworte dieses Artikels.
- [2] U. Keller, *Sättigbare Halbleiter-Absorberspiegel für ultraschnelle Festkörperlaser*, Photonik 4/2004, 44-47
- [3] D.H. Sutter, G. Steinmeyer, L. Gallmann, N. Matschek, F. Morier-Genoud, U. Keller, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, *Semiconductor saturable-absorber mirror-assisted Kerr lens modelocked Ti:sapphire laser producing pulses in the two-cycle regime*, Opt. Lett. 24, 631 (1999); U. Morgner, F.X. Kärtner, S.H. Cho, Y. Chen, H.A. Haus, J.G. Fujimoto, E.P. Ippen, *Sub-two cycle pulses from a Kerr-Lens modelocked Ti:sapphire laser*, Opt. Lett. 24, 411 (1999)
- [4] [www.rp-photonics.com/frequency\\_combs.html](http://www.rp-photonics.com/frequency_combs.html)
- [5] J. Aus der Au, G.J. Spühler, T. Südmeyer, R. Paschotta, R. Hövel, M. Moser, S. Erhard, M. Karszewski, A. Giesen, U. Keller: *16.2 W average*

- power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser, *Opt. Lett.* 25 (11), 859-861 (2000)
- [6] F. Brunner, E. Innerhofer, S.V. Marchese, T. Südmeyer, R. Paschotta, T. Usami, H. Ito, U. Keller, *Powerful RGB laser source pumped with a mode-locked thin disk laser*, *Opt. Lett.* 29 (16), 1921-1923 (2004)
- [7] T. Südmeyer, F. Brunner, E. Innerhofer, R. Paschotta, K. Furusawa, J.C. Baggett, T.M. Monro, D.J. Richardson, U. Keller, *Nonlinear femtosecond pulse compression at high average power levels using a large mode area holey fiber*, *Opt. Lett.* 28 (20), 1951 (2003)
- [8] T. Südmeyer, J. Aus der Au, R. Paschotta, U. Keller, P.G.R. Smith, G.W. Ross, D.C. Hanna, *Novel ultrafast parametric systems: high repetition rate single-pass OPG and fiber-feedback OPO*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34 (16), 2433 (2001)
- [9] L. Krainer, R. Paschotta, S. Lecomte, M. Moser, K.J. Weingarten, U. Keller, *Compact Nd:YVO<sub>4</sub> lasers with pulse repetition rates up to 160 GHz*, *IEEE J. Quantum Electron.* 38 (10), 1331 (2002)
- [10] S.C. Zeller, L. Krainer, G.J. Spühler, R. Paschotta, M. Golling, D. Ebling, K.J. Weingarten, U. Keller, *Passively mode-locked 50-GHz Er:Yb:glass laser*, *Electron. Lett.* 40 (14), 875 (2004)
- [11] S. Arahira, Y. Matsui, Y. Ogawa, *Mode-locking at very high repetition rates more than terahertz in passively mode-locked distributed-Bragg-reflector laser diodes*, *IEEE J. Quantum Electron.* 32, 1211 (1996)
- [12] M. Kuznetsov, F. Hakimi, R. Sprague, A. Mooradian, *High-power (>0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM<sub>00</sub> beams*, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 9 (8), 1063 (1997)
- [13] J. Chilla, S.D. Butterworth, A. Zeitschel, J.P. Charles, A.L. Caprara, M.K. Reed, L. Spinelli, *High power optically pumped semiconductor lasers*, *Proc. SPIE* 5332, 143 (2004)
- [14] S. Hoogland, A. Garnache, I. Sagnes, B. Paldus, K.J. Weingarten, R. Grange, M. Haiml, R. Paschotta, U. Keller, A.C. Tropper, *Picosecond pulse generation with a 1.5- $\mu$ m passively mode-locked surface-emitting semiconductor laser*, *Electron Lett.* 39 (11), 846 (2003)
- [15] A. Aschwanden, D. Lorensen, H.J. Unold, R. Paschotta, E. Gini, U. Keller, *10-GHz passively mode-locked external-cavity semiconductor laser with 1.4 W average output power*, *Appl. Phys. Lett.* 86, 131102 (2005)
- [16] A. Garnache, S. Hoogland, A.C. Tropper, I. Sagnes, G. Saint-Girons, J.S. Roberts, *Sub-500-fs soliton-like pulse in a passively mode-locked broadband surface-emitting laser with 100 mW output power*, *Appl. Phys. Lett.* 80 (21), 3892 (2002)
- [17] D. Lorensen, H.J. Unold, D.J.H.C. Maas, A. Aschwanden, R. Grange, R. Paschotta, D. Ebling, E. Gini, U. Keller, *Towards wafer-scale integration of high repetition rate passively mode-locked surface-emitting semiconductor lasers*, *Appl. Phys. B* 79, 927 (2004)
- [18] J. Limpert, T. Clausnitzer, A. Liem, T. Schreiber, H.-J. Fuchs, H. Zellmer, E.-B. Kley, A. Tünnermann, *High-average-power femtosecond fiber chirped-pulse amplification system*, *Opt. Lett.* 28 (20), 1984 (2003)

## Ansprechpartner

Dr. Rüdiger Paschotta  
 RP Photonics  
 Consulting GmbH  
 Kurfürstenstr. 63  
 CH-8002 Zürich  
 Tel. +41/44/20102-60  
 Fax +41/44/20102-59  
 eMail: paschotta@rp-photonics.com  
 Internet: www.rp-photonics.com



www.photonik.de ▶ Webcode 1007