

# **Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen**

von Dr.-Ing. Katrin Sarah Wentsch  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische  
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2016

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,  
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der  
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem  
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-  
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2016

ISBN 978-3-8316-4578-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Kurzfassung der Arbeit

Ultrakurzpuls-Laserstrahlquellen mit hohen Spitzen- und Ausgangsleistungen sind derzeit Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Diese Lasersysteme werden zum Beispiel in der Materialbearbeitung, in der Medizin und im wissenschaftlichen Bereich eingesetzt. Das Konzept des modengekoppelten Scheibenlasers ist dazu prädestiniert, die Anforderungen an hohe Ausgangs- und Pulsspitzenleistungen direkt aus einem Hochleistungsoszillator ohne zusätzliche Verstärkerstufen zu ermöglichen.

Durch die Scheibengeometrie des laseraktiven Mediums, typischerweise mit einer Dicke im Bereich von 100 bis 300  $\mu\text{m}$  und einem Durchmesser von 6 bis 20 mm, wird eine effektive Wärmeabfuhr erreicht, um gute Strahlqualitäten bei hohen Ausgangsleistungen zu erzielen. Durch das dünne laseraktive Medium sind bei hohen Spitzenleistungen nichtlineare Effekte vernachlässigbar. Die Kombination aus Scheibenlaser und sättigbarem Halbleiterspiegel (SESAM) bildet ein System, das über die Flächen der Moden auf der Scheibe und dem SESAM leistungsskalierbar ist. Es ermöglicht hohe Ausgangsleistungen bei kurzer Pulsdauer.

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wurde das Potenzial (neuartiger) Ytterbium-dotierter Laserkristalle für den Einsatz in passiv modengekoppelten Scheibenlaseroszillatoren untersucht. Folgende Laserkristalle wurden nach Materialeigenschaften wie z. B. der thermischen Wärmeleitfähigkeit und der Emissionsbandbreite, die hohe Ausgangsleistungen und ultrakurze Pulsdauern im Bereich von Pikosekunden ( $10^{-12}$ ) und Femtosekunden ( $10^{-15}$ ) ermöglichen, selektiert und eingehender analysiert: Yb:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, Yb:CaGdAlO<sub>4</sub>, Yb:CaF<sub>2</sub> und Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Die Eignung dieser Kristalle im Dauerstrichbetrieb wurde durch maximale Ausgangsleistungen von 280 W für Yb:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, 152 W für Yb:CaGdAlO<sub>4</sub>, 250 W für Yb:CaF<sub>2</sub> und 670 W für Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gezeigt. In passiv modengekoppelten Scheibenlaseroszillatoren wurde mit Yb:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> eine mittlere Ausgangsleistung von 27,8 W bei einer Pulsdauer von 298 fs demonstriert. Mit Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> wurden bei 300 fs 28 W bzw. bei einer kürzeren Pulsdauer von 197 fs 20 W demonstriert.

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Symbole	9
Abkürzungen	13
Extended Abstract	15
1 Einleitung	18
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit .....	18
1.2 Strukturierung der Arbeit .....	19
2 Ytterbium-dotierte Kristalle für den Einsatz im Scheibenlaser	21
2.1 Eigenschaften des $\text{Yb}^{3+}$ -Ions .....	21
2.2 Anforderungen an das laseraktive Material .....	24
2.3 Auswahl $\text{Yb}^{3+}$ -dotierter Kristalle und Vergleich zu $\text{Yb}:\text{YAG}$ .....	25
2.4 Literaturübersicht ausgewählter $\text{Yb}^{3+}$ -dotierter Kristalle.....	33
3 Grundlagen der passiven Modenkopplung	37
3.1 Theoretische Beschreibung der Pulsdynamik .....	37
3.2 Sättigbarer Halbleiterspiegel (SESAM).....	38
3.2.1 Aufbau eines SESAM .....	39
3.2.2 Parameter zur Wahl eines geeigneten SESAM .....	40
3.3 Soliton-Modenkopplung.....	43
3.4 Dispersionsmanagement und Selbstphasenmodulation .....	44
4 Berechnungen und Analysen zur Resonatorauslegung	47
4.1 Resonatorauslegung.....	47
4.1.1 Dauerstrich-Laserbetrieb .....	47
4.1.2 Passiv modengekoppelter Scheibenlaserbetrieb.....	51
4.2 Berechnung der Temperaturen an den Oberflächen der Kristalle.....	56
4.3 Berechnung der Phasenfrontdeformation .....	63
5 Der $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{SiO}_5$ Scheibenlaser	69
5.1 Materialeigenschaften .....	69
5.2 Übersicht und Kontaktierung des Versuchsmaterials .....	70
5.3 Experimentelle Untersuchungen .....	74

---

5.3.1	Fluoreszenz- und Laserbetrieb.....	74
5.3.2	Wellenlängendurchstimmbarkeit.....	77
5.3.3	Dauerstrich-Laserbetrieb .....	79
5.3.4	Passiv modengekoppelter Yb:SSO Scheibenlaseroszillator.....	84
6	Der Yb:CaGdAlO <sub>4</sub> Scheibenlaser	88
6.1	Materialeigenschaften.....	88
6.2	Übersicht und Kontaktierung des Versuchsmaterials.....	89
6.3	Experimentelle Untersuchungen.....	92
6.3.1	Fluoreszenz- und Laserbetrieb.....	92
6.3.2	Wellenlängendurchstimmbarkeit.....	94
6.3.3	Dauerstrich-Laserbetrieb .....	95
6.3.4	Passiv modengekoppelter Yb: CALGO Scheibenlaseroszillator .....	98
7	Der Yb:CaF <sub>2</sub> Scheibenlaser	102
7.1	Materialeigenschaften.....	102
7.2	Übersicht und Kontaktierung des Versuchsmaterials.....	104
7.3	Experimentelle Untersuchungen.....	108
7.3.1	Fluoreszenz- und Laserbetrieb.....	108
7.3.2	Wellenlängendurchstimmbarkeit.....	109
7.3.3	Dauerstrich-Laserbetrieb .....	110
8	Der Yb:Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Scheibenlaser	116
8.1	Materialeigenschaften.....	116
8.2	Übersicht und Kontaktierung des Versuchsmaterials.....	118
8.3	Experimentelle Untersuchungen.....	120
8.3.1	Fluoreszenz- und Laserbetrieb.....	120
8.3.2	Dauerstrich-Laserbetrieb .....	123
9	Das Potenzial von Yb:YAl <sub>3</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> und epitaktisch gewachsenes Yb:KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / Yb:KLu(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	126
9.1	Materialeigenschaften von Yb:YAl <sub>3</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> .....	126
9.2	Materialeigenschaften von Yb:KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> und Yb:KLu(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .....	127
10	Zusammenfassung und Ausblick	130
11	Literatur- und Quellenverzeichnis	133

## Extended Abstract

Ultrafast laser sources with pico- and femtosecond pulse duration open new prospects for applications in industry and medicine. In material processing ultra-short pulse durations are used for high-precision material ablation of different materials [1], for example processing carbon-fibre reinforced plastics (CFRP) of high quality [2]. In medicine high intensities and short pulse durations are used for ablation and for systematic influencing of tissues by irradiation [3], respectively. All these applications rely on reliable, compact, innovative, powerful, and efficient ultrafast laser sources.

For the generation of short laser pulses several mechanisms can be used, which differ with respect to the achievable pulse durations and pulse energies [4]. This work focuses on the generation of femtosecond pulses by means of semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM) [5]. Such devices consist of a semiconductor mirror structure with an incorporated saturable absorber and exhibit an increase in reflectivity with increasing light intensity.

The combination of SESAM and thin-disk laser allows for a compact and reliable ultrafast laser source with high pulse energy and high average output power in a diffraction-limited beam. The key advantage of the thin-disk technology is thereby the high-power capability in combination with good beam quality and high optical-to-optical efficiency due to the nearly one dimensional heat flow. The primary element of a thin-disk laser is thereby the thin active crystal which has the geometry of a disk with a thickness of typically 100 to 300  $\mu\text{m}$  and a diameter of 6 to 20 mm. The efficient heat dissipation is achieved due to the high ratio of cooled surface to pumped volume. Due to the combination of large pump spot and short optical length inside the laser crystal, the limiting non-linear effects occur at several orders of magnitude higher pulse energies. Therefore high pulse energies can be achieved without the need for temporal stretching. The nearly one-dimensional heat dissipation in the axial direction and the short propagation length through the crystal drastically reduce the thermal lensing effect compared to rod lasers. A very important property arising from the thin-disk geometry is power scaling: the output power can e.g. be doubled by doubling the pump power and the pump area on the disk, leaving the overall pump intensity constant. This concept also applies for SESAM mode-locked thin disk lasers: here the output power can be scaled by multiplying the mode areas on gain medium and SESAM by the same factor [5, 6].

In thin-disk laser operation Yb:YAG, due to its good thermal conductivity of 10.7 W/(mK) (undoped) [7], was up to now the material of choice for high average continuous wave output powers [8]. Recently, the generation of femtosecond pulses < 600 fs in a passively mode-locked Yb:YAG thin-disk laser was demonstrated [9]. Shorter pulse durations of 200 fs were demonstrated in a Kerr-lens mode-locked thin-disk laser [10].

The aim of this work is the investigation of the suitability of various ytterbium-doped laser crystals (besides Yb:YAG) for high-power femtosecond thin-disk laser systems. Several laser crystals have therefore been selected and tested due to their beneficial properties - such as thermal conductivity and the broad emission bandwidth - for high-average output power and short pulse durations: Yb:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, Yb:CaGdAlO<sub>4</sub>, Yb:CaF<sub>2</sub>, Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, and epitaxially grown Yb:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> or Yb:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. Due to their availability only the first four could be used for experimental studies. The potential of these crystals for high-power thin-disk laser operation could be demonstrated with a maximum CW output power of 280 W for Yb:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, 152 W Yb:CaGdAlO<sub>4</sub>, 250 W for Yb:CaF<sub>2</sub> and 670 W for Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. In a Yb:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> passively mode-locked thin-disk laser an average output power of 27.8 W with 298 fs of pulse duration was demonstrated. For Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> pulse durations of 300 fs with an average output power of 28 W and shorter pulses with 197 fs with 20 W could be achieved. These pulses were nearly transform limited (TBP < 0.315). The beam propagation factor was measured to be  $M^2 < 1.1$ .

This work is organized as follows: an introduction to the Yb<sup>3+</sup>-ion, which was used as the dopant for the host materials in this work, is given in Chapter 2.

Chapter 3 introduces the reader to the pulse dynamics within a laser in general and the soliton mode-locking in particular. Chapter 3 also describes the design and functionality of a **SE**micronductor **S**aturable **A**bsorber **M**irror (in short: SESAM).

Chapter 4 deals with the calculation of relevant laser parameters to prepare the experimental investigation. The simulation of the thermal behaviour in fluorescence and laser operation at the surface of the disks and the phase front deformation are investigated and compared to the experimentally determined data.

Chapter 5 to Chapter 8 describe the experimental investigation of the crystals Yb:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, Yb:CaGdAlO<sub>4</sub>, Yb:CaF<sub>2</sub> and Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectively. Firstly, the absorption and the thermal behaviour of the crystals are investigated both in lasing and non-lasing operation. Secondly, the wavelength tuning range is investigated in CW opera-

---

tion for Yb:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> and Yb:CaF<sub>2</sub> to confirm the potential for the generation of ultra-short pulses. Furthermore, the potential of high output power in continuous wave laser operation is demonstrated, followed by experiments of Yb:SSO and Yb:CALGO in passively mode-locked thin-disk laser operation.

In order to show the potential of Yb:Yal<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, and epitaxially grown Yb:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> or Yb:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> for the generation of ultra-short pulses, Chapter 9 summarizes their material properties. As already mentioned, these materials were not available for experimental investigations.

Chapter 10 summarizes the results and provides an outlook for further developments and optimizations of Ytterbium-doped laser active materials for the generation of ultra-short pulse durations.



# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

### Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Abtragen und Schweißen  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

### Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung  
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

### Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen  
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

### Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität  
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

### Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

### Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern  
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

### Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren  
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

### Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen  
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

### Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten  
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

### Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau  
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

### Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen  
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

### Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren  
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

### Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötlens mit Diodenlasern  
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

### Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung  
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

### Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG  
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

### Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

### Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl  
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

### Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser  
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

### Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers  
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

### Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen  
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

### Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

### Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau  
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

### Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen  
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

**Lücke, Bernd**

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays  
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

**Hohenberger, Bernd**

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-  
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-  
xibilität und verfügbarer Strahlleistung  
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

**Jasper, Knut**

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und  
-führung für die Mikrotechnik  
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

**Heimerdinger, Christoph**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen  
für die Luftfahrt  
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

**Christoph Fleig**

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen  
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer  
Komponenten  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

**Joachim Radtke**

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-  
ramischen Werkstoffen mittels repetierender  
Laserbearbeitung  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

**Michael Brandner**

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und  
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern  
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

**Reinhard Winkler**

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von  
Aluminium-Druckguss  
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

**Helmut Kindler**

Optische und gerätetechnische Entwicklungen  
zum Laserstrahlspritzen  
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

**Andreas Ruf**

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-  
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern  
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

**Guido Hergenhan**

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-  
temkonzept und experimentelle Verifizierung  
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

**Klaus Goth**

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-  
umguß- und Knetlegierungen mit CO<sub>2</sub>-Laser  
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

**Armin Strauch**

Effiziente Lösung des inversen Problems beim  
Laserstrahlschweißen durch Simulation und  
Experiment  
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

**Thomas Wawra**

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-  
sion mittels Laserstrahlung  
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

**Michael Honer**

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren  
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung  
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

**Thomas Herzinger**

Prozessüberwachung beim Laserbohren von  
Turbinenschaufeln  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

**Reiner Heigl**

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-  
gusslegierungen mittels Laserstrahlung  
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

### **Thomas Fuhrich**

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

### **Daniel Müller**

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

### **Jiancun Gao**

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

### **Wolfgang Gref**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

### **Michael Weikert**

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

### **Julian Sigel**

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit vari-ablem Laserstrahldurchmesser in modularen Fert-igungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

### **Andreas Ruß**

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

### **Gabriele Seibold**

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

### **Dirk Lindenau**

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

### **Jens Walter**

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

### **Heiko Ridderbusch**

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

### **Markus Leimser**

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschäften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

### **Mikhail Larionov**

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

### **Jürgen Müller-Borhanian**

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

### **Andreas Letsch**

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

### **Thomas Kübler**

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

### **Günter Ambrosy**

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

### **Agnes Ott**

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

### **Detlef Breiting**

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

### **Dmitrij Walter**

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

### **Jan-Philipp Weberpals**

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

### **Angelika Beyertt**

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

**Christian Stolzenburg**

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich  
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

**Svent-Simon Beyertt**

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern  
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

**Sonja Kittel**

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen  
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

**Andrey Andreev**

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte  
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

**Christian Föhl**

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen  
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

**Andreas Josef Birnesser**

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen  
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

**Christoph Neugebauer**

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser  
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

**Andreas Dauner**

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren  
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

**Axel Heß**

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit  
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

**Christian Gehrke**

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen  
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

**David Schindhelm**

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen  
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

**Moritz Vogel**

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery  
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

**Andreas Michalowski**

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen  
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

**Georg Stöppler**

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie  
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

**Patrick Mucha**

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK  
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

**Claus-Dieter Reiniger**

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt  
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

**Andreas Leitz**

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung  
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

**Peter Stritt**

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016  
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

**Katrin Sarah Wentsch**

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen  
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7