

Pulsformung zur schädigungsarmen Laserbearbeitung von Silizium

von Dr.-Ing. Michael Diez
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. rer. nat. Uli Lemmer

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., 2018

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 2018

ISBN 978-3-8316-4737-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhalt

Inhalt	5
Liste der verwendeten Symbole	8
Kurzfassung	15
Extended Abstract	17
1 Einleitung	20
1.1 Motivation und Zielsetzung	20
1.2 Aufbau der Arbeit	22
1.3 Experimenteller Aufbau und Analysemethoden	25
1.3.1 Laserstrahlquellen	25
1.3.2 Konstruktion der Laboranlage	28
1.3.3 Charakterisierungsmethoden	30
2 Optische Eigenschaften von Silizium	31
2.1 Reflektivität	32
2.1.1 Temperaturabhängigkeit der Reflektivität von Silizium	33
2.1.2 Reflektivität von flüssigem Silizium	34
2.2 Absorption	36
2.2.1 Absorption durch die Erzeugung von Elektron-Loch Paaren	37
2.2.2 Einfluss freier Ladungsträger auf Absorption und Reflektivität	38
2.2.3 Temperaturabhängigkeit der Absorption von Silizium	40
2.3 Zusammenfassung	43
3 Ladungsträgerdynamik und Energieübertrag an das Festkörpergitter	44
3.1 Änderung der freien Ladungsträgerdichte	45
3.1.1 Rekombinationsmechanismen	46
3.1.2 Ladungsträgerdiffusion	48
3.1.3 Änderung der freien Ladungsträgerdichte während der Laserbestrahlung	49
3.2 Energieübertrag an das Festkörpergitter	50

3.3	Laserinduzierte Temperaturerhöhung	55
3.3.1	Versuchsaufbau zur zeitaufgelösten Reflexionsmessung	56
3.3.2	Kalibrierung des Spannungssignals auf die Reflektivität	58
3.3.3	Bestimmung der Reflektivität von festem Silizium bei T_m	60
3.3.4	Zeitaufgelöste Messung des laserinduzierten Temperaturanstiegs	62
3.4	Zusammenfassung	66
4	Schmelz-, Diffusions- und Erstarrungsvorgang	68
4.1	Schmelzen von Silizium	68
4.1.1	Gleichgewichtsmodelle	69
4.1.2	Nicht-Gleichgewichtsmodelle	72
4.1.2.1	<i>interface-response</i> -Funktion	72
4.1.2.2	Kinetisches Modell	73
4.1.3	Vergleich der Modelle (GGW, IRF und KM)	73
4.2	Simulation des Prozessablaufs	75
4.2.1	Beschreibung der <i>LCPSim</i> -Simulationsmethodik	76
4.2.2	Interpretation der <i>LCPSim</i> -Simulationsergebnisse	77
4.3	Verifikation der Simulation am Experiment	80
4.3.1	Methode zur experimentellen Ermittlung der Schmelzdauer	80
4.3.2	Vergleich zwischen gemessener und simulierter Schmelzdauer	82
4.4	Prozessmodellierung	83
4.4.1	Oberflächentemperatur	84
4.4.2	Schmelzdauer	85
4.4.3	Schmelztiefe und Geschwindigkeit der Schmelzfront	86
4.4.4	Geschwindigkeit der Erstarrungsfront	88
4.5	Laserinduzierte Diffusion	90
4.5.1	Einbau von Fremdatomen	92
4.5.2	Zusammenhang zwischen Schmelz- und Dotiertiefe	93
4.6	Laserdiffusion aus SiO ₂ :B-Precursorschichten	96
4.6.1	Verhalten des Precursors während der Laserdiffusion	97
4.6.2	Bestimmung des Schichtwiderstands	101
4.6.3	Homogenität der laserdotierten Wafer	102
4.6.4	Einfluss der Umgebungsatmosphäre	102
4.6.5	Einfluss der Precursorkonfiguration auf den Schichtwiderstand	103
4.6.5.1	Einfluss der Precursorreihenfolge	104
4.6.5.2	Einfluss der Precursorkonzentration	105
4.6.5.3	Einfluss der Precursordicke	106
4.6.6	Zusammenfassung der Precursor-Wirkmechanismen	109
4.7	Zusammenfassung	109

5	Prozesscharakteristische Parameter und Pulsformung	111
5.1	Einfluss der Laserparameter auf das Prozessergebniss	111
5.1.1	Oberflächentemperatur als prozesscharakteristischer Parameter .	113
5.1.2	Dotierprofil als prozesscharakteristischer Parameter	115
5.2	Zeitliche Pulsformung	117
5.2.1	Herleitung der Pulsform	118
5.2.2	Pulsformung am Beispiel eines 20 ns langen Rechteckpulses . .	119
5.2.3	Pulsformen zur direkten Änderung der prozesscharakteristischen Parameter	122
5.3	Zusammenfassung	128
6	Laserinduzierte Defektmechanismen	130
6.1	Defektbildung beim Wiedererstarren	130
6.1.1	Entstehung von <i>Vacancies</i>	131
6.1.2	Ansätze zur Reduktion der <i>Vacancy</i> -Dichte	134
6.1.3	Defektspektroskopie tiefer Störstellen (<i>DLTS</i>)	135
6.1.4	Identifikation der Störstellen	138
6.1.5	Maximalgeschwindigkeit der Erstarrungsfront und Defektdichte	139
141	subsection.260	
6.2	Laserinduzierte Amorphisierung	146
6.2.1	Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Erstarrungs- front und der Amorphisierung von Silizium	148
6.2.2	Experimenteller Nachweis von amorphem Silizium	149
6.3	Zusammenfassung	153
7	Zusammenfassung	155
8	Anhang	158
8.1	Modellierung des Absorptionskoeffizienten	158
8.2	Implementierung der Diffusion in <i>LCPSim</i>	159
8.3	SiO ₂ :B-Precursorschichten	160
8.4	Geformte Pulse	163
9	Veröffentlichungen, Abschlussarbeiten und Patentanmeldungen	165
	Literatur- und Quellenverzeichnis	167
	LEBENS LAUF	184

Kurzfassung

Die Bearbeitung von Silizium mit Hilfe von Laserstrahlung gewinnt in der Halbleiter- und Photovoltaikindustrie zunehmend an Bedeutung. Laserbasierte Dotier-, Strukturierungs- und Abtragsprozesse treten in Konkurrenz zu den etablierten Fertigungsverfahren. Bei der Laserbearbeitung von Silizium werden jedoch häufig die mechanischen und elektronischen Eigenschaften des Halbleiters ungewollt verändert, wodurch die Funktion des Bauteils beeinträchtigt wird. Um laserbasierte Prozessschritte für diese Industrien zu qualifizieren, werden daher im ersten Teil der vorliegenden Arbeit die Wirkzusammenhänge bei der Laserbearbeitung von Silizium ermittelt und analysiert. Im zweiten Teil werden diese Erkenntnisse genutzt, um mit einer geeigneten zeitlichen Pulsformung eine schadigungsarme Laserbearbeitung durchzuführen.

Typischerweise sind diese laserinduzierten Schädigungen Gitter-Leerstellen, sogenannte *Vacancies*, über welche Ladungsträger rekombinieren. Je höher die *Vacancy*-Dichte im Halbleiter, desto höher ist die Rekombinationsrate und desto geringer fällt die Ladungsträgerlebensdauer aus. Zur Herstellung von Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad wird eine hohe Ladungsträgerlebensdauer benötigt. *Vacancies* entstehen beim Wiedererstarren des lasergeschmolzenen Siliziums in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Erstarrungsfront. Je höher die Geschwindigkeit der Erstarrungsfront, desto mehr *Vacancies* entstehen.

Zur Erarbeitung dieser Wirkzusammenhänge wurden theoretische Betrachtungen sowie experimentelle Untersuchungen zum laserinduzierten Schmelz-, Diffusions- und Erstarrungsvorgang von Silizium durchgeführt. In allen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde gepulste Laserstrahlung mit Pulsdauern im Bereich zwischen zwei und sechshundert Nanosekunden oder weniger Pikosekunden verwendet. Als Dotierstoffquelle dienten wenige Nanometer dicke und mit Bor angereicherte SiO_2 -Schichten. Auf Basis der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse werden allgemeingültige Zusammenhänge zwischen Schichtaufbauten und Laserparametern für die Dotierung aus SiO_2 -B-Precursoren abgeleitet. Diese sind in Kapitel 4 zusammengefasst.

Der laserinduzierte Schmelz- und Erstarrungsvorgang wurde im Experiment zeitaufgelöst untersucht. Hierfür wurde die temperaturabhängige Änderung der Reflektivität des Halbleiters genutzt. Beim Wechsel des Aggregatzustands von fest nach flüssig steigt diese sprunghaft an. So konnte mit Hilfe der zeitaufgelösten Reflexionsmessung die Zeitspanne, in welcher das Silizium aufgrund der Laserbestrahlung im flüssigen Zustand

vorlag, bestimmt werden. Darüber hinaus wurde die Änderung der Oberflächentemperatur in der Bearbeitungszone während der Laserbestrahlung aus dem Reflexionssignal abgeleitet. Zum ersten Mal wurde die gesamte Aufheiz-, Schmelz-, Erstarrungs- und Abkühlphase der Siliziumoberfläche während der Laserbestrahlung bei Pulsdauern zwischen 10 ns und 500 ns experimentell erfasst.

Bei einer Oberflächentemperatur über dem Schmelzpunkt bestimmt deren Verlauf die Position und Bewegung der Phasengrenze zwischen dem festen und flüssigen Gebiet. Daraus ergeben sich die Schmelzdauer sowie die Phasenfrontgeschwindigkeiten. Für eine *Vacancy*-arme Laserbearbeitung von Silizium muss die Geschwindigkeit der Erstarrungsfront so gering wie möglich sein. Daher liegt der Kern dieser Arbeit in der Erarbeitung einer Methode zur Kontrolle der Bewegung der Phasengrenze durch geeignete Einbringung der Wärme durch den Laserstrahl.

Hierfür wurde erstmals die „Pulsformung“ im Nanosekunden-Pulsdauerbereich genutzt. Beispielsweise kann durch das „Anhängen“ eines sogenannten „Nachpulses“ mit geeignetem zeitlichen Intensitätsverlauf an einen „Rechteckpuls“ mit konstantem Intensitätsverlauf ein langsames Erstarren der Schmelze erreicht werden. Über den Nachpuls wird dem Laser-Material-Interaktionsgebiet eine etwas geringere Energiemenge zugeführt als die, die beim Erstarren nach der Laserbestrahlung mit dem einzelnen Rechteckpuls an die Umgebung abfließen würde. Die durchgeführten Prozesssimulationen zeigen, dass hierfür der Intensitätsverlauf des Nachpulses zu jedem Zeitpunkt proportional zum Wert der Geschwindigkeit der Erstarrungsfront, wie sie bei der Bestrahlung mit dem Rechteckpuls auftreten würde, sein muss. Mit Hilfe weiterer Simulationen wurden verschiedene Pulsformen zur Reduktion der Geschwindigkeit der Erstarrungsfront sowie zur Vergrößerung des Prozessfensters und zur Erhöhung der Prozessstabilität abgeleitet.

Die Geschwindigkeit der Erstarrungsfront kann so bei Verwendung geformter Laserpulse im Vergleich zur Laserbestrahlung mit Rechteckpulsen um eine Größenordnung reduziert werden. Eine weitere Reduktion ist in der Praxis aktuell aufgrund der Einschränkungen bei der Laserleistungssteuerung weder möglich noch notwendig. Die so ausgelegten Laserpulse führen im Experiment zu einer Reduktion der Defektdichte um bis zu zwei Größenordnungen und zu Ladungsträgerlebensdauern vergleichbar mit einer unbearbeiteten Siliziumprobe. Die vorgeschlagene Prozessführung erlaubt somit eine schädigungsarme Laserbearbeitung von kristallinem Silizium. Die Arbeit wird durch den experimentellen Nachweis abgeschlossen, dass auch das Auftreten von amorphem Silizium bei der Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen von der Geschwindigkeit der Erstarrungsfront abhängt. Bei diesem Prozess treten ringförmige Bereiche aus amorphem Silizium auf, was ebenfalls durch die erarbeitete Modellvorstellung erklärt wird.

Extended Abstract

Processing silicon by using laser radiation is becoming more and more important in the photovoltaic and semiconductor industry. Laser-based doping, structuring and ablation processes thus start competing with established processes. However, laser-based processes often compromise the mechanical and electrical properties of the semiconductor and lead to a deterioration of component function and quality. To heal these laser-induced damages, laser-processed devices are usually annealed in subsequent tempering steps. In order to omit these additional processing steps and make laser-based processes attractive for these industries, the goal of this thesis is to elaborate a laser process that allows for low-defect laser machining of monocrystalline silicon. Therefore, the first part of this work addresses the identification and analysis of the cause-effect-relationships in laser irradiation of silicon. These relationships are then used in the second part to realize low-defect laser machining of silicon by means of suitable temporal pulse shaping.

Typically, the aforementioned laser-induced defects are voids in the lattice structure, also called *vacancies*. These *vacancies* emerge during the rapid resolidification of liquid silicon, especially after laser-induced melting processes. It is to be noted that the number of *vacancies* increases in proportion to the height of the resolidification velocity. *Vacancies* can be detected by means of deep level transient spectroscopy (DLTS) measurements. Just like any other crystal defects, *vacancies* act as centers for Shockley-Read-Hall recombination, due to which charge carriers are eliminated. The higher the *vacancy* density, the higher is the recombination rate, and thus, the shorter is the carrier lifetime. However, long carrier lifetimes need to be achieved in order to realize e. g. silicon solar cells with high efficiencies.

Theoretical as well as experimental studies were conducted in order to analyze the cause-effect-relationships between laser radiation, processing parameters and laser-induced melting, doping and resolidification processes of crystalline silicon. In contrast to most other studies, this work focuses on the explanation of process results by correlating them with so-called *process characteristic parameters* instead of correlating them directly with laser parameters. *Process characteristic parameters* such as surface temperature, melting and resolidification velocity, doping profile, etc. are the underlying parameters that determine the process results. Their dependencies on the laser parameters were identified by simulating the laser-induced melting and resolidification processes.

It was shown that, among other things, the *vacancy* density is proportional to the maximum resolidification velocity and this, in turn, is inversely proportional to the root of the laser pulse duration.

A frequency doubled PyroFlex™ laser from PyroPhotonics, emitting laser pulses with durations ranging between 2 ns and 600 ns, or a TruMicro 5x50 laser source from TRUMPF, emitting laser pulses with a duration of a few picoseconds, were used for all experimental studies. For each pulse duration, the special laser architecture of the PyroFlex™ laser allows the modulation of the pulse intensity with 1 ns resolution in the temporal domain almost without any dependency on other laser parameters. By using this laser source, the laser-induced melting and resolidification processes were characterized time-resolvedly with the help of a pump-probe setup. The measurement principle is based on the temperature dependence of the reflectivity of the semiconductor, which was detected by a fast photodiode.

When silicon changes its physical state from solid to liquid, its reflectivity raises rapidly. Hence, the melt duration, which is defined as the duration during which a laser molten silicon volume remains in its liquid state, was determined by means of time-resolved reflectance measurements. Furthermore, a calibration method was developed that allows the deduction of the actual surface temperature in the laser-material-interaction area based on the detected reflection signal during laser irradiation. For the first time, the entire laser-induced heating, melting, resolidification and cooling processes of the silicon surface during laser irradiation with pulse durations between 10 ns and 500 ns were captured time-resolvedly.

In order to propose an explanatory model for the laser-assisted boron doping process, monocrystalline silicon wafers were coated with SiO₂:B precursor layers with thicknesses ranging between 5 nm and 80 nm. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) measurements showed that this precursor system remains in its solid physical state and stays on top of the wafer during laser irradiation. The diffusion of boron atoms into the silicon bulk is not as pronounced as the evaporation into the ambient environment. The boron incorporation rate is proportional to the concentration gradient of the precursor-silicon interface. Unlike the ambient environment (e. g. N₂ or Ar), the thickness of the precursor layer has no measurable impact on the doping efficiency. It furthermore influences the optical characteristics of the precursor-silicon system.

In cases of surface temperatures above the melting point, the surface temperature determines the position and movement of the interface between the liquid and solid region. Melt duration as well as melting and resolidification velocities result from the position

and movement of the phase boundary. To accomplish laser processing of silicon resulting in a minimal *vacancy* density, the resolidification velocity needs to be as low as possible. Thus, a method to control the movement of the phase boundary by an appropriate introduction of heat by laser radiation was elaborated in the second part of this work. To this end, temporal “laser pulse shaping” in the pulse duration interval between 2 ns and 600 ns was used for the first time to reduce the resolidification velocity and ultimately realize low-defect laser machining of silicon.

To manipulate the resolidification process and reduce the resolidification velocity, a pulse tail (so-called “Nachpuls”) with a modified temporal intensity profile is “attached” to a pulse with a constant temporal intensity profile (so-called flat top pulse or “Rechteckpuls”). By means of the pulse tail, almost as much energy is deposited in the laser-material-interaction area as would dissipate during the resolidification process after laser-melting with the corresponding flat top pulse only. Process simulations showed that the temporal intensity profile of the pulse tail needs to be constantly proportional to the value of the resolidification velocity as it would occur after the irradiation with the corresponding flat top pulse.

Different laser pulse shapes for reducing the resolidification velocity, enlarging the process window and enhancing the process stability were modeled and experimentally validated. By using such optimized laser pulses, the resolidification velocity can be reduced by one order of magnitude compared to the resolidification velocity of the corresponding flat top pulse. Due to the limitations in controlling the laser power, any further reduction is currently neither possible nor necessary. The introduced temporal laser intensity profiles result in a reduction of defect density up to two orders of magnitude and in carrier lifetimes comparable to those of an untreated silicon sample. Thus, the proposed process strategy allows for an almost defect-free laser machining of monocrystalline silicon.

This study finishes with the experimental proof that the appearance of amorphous silicon during the laser processing of silicon with pulse durations of a few picoseconds also depends on the resolidification velocity. When irradiating monocrystalline silicon with such short laser pulse durations, circular areas consisting of amorphous silicon appear around the center of the laser molten area. These areas were characterized by Raman spectroscopy and their visual appearance was explained with the help of the understanding and the process model both elaborated in this study.

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

Jan-Philipp Negel

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Karin Heller

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

Stefan Piehler

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

Felix Abt

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

Volker Rominger

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0

Thomas Rataj

Hochleistungstaugliche faserintegrierte Strahlweichen
2018, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4733-0

Michael Diez

Pulsformung zur schädigungsarmen Laserbearbeitung von Silizium
2018, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4737-8