

Modellierung und Simulation des Halbleiterscheibenlasers

von Dr.-Ing. Thomas Kübler
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. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Ortwin Hess
(University of Surrey, United Kingdom)

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., 2009

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 2009

ISBN 978-3-8316-0918-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Kurzfassung

Lasersysteme und deren Anwendungen sind aus dem heutigen Leben, ob im privaten, industriellen oder medizinischen Umfeld, nicht mehr wegzudenken. Infolge dieser breiten Anwendungsmöglichkeiten besteht der Wunsch nach kostengünstigen und effizienten Laserquellen mit guter Strahlqualität.

Für Bereiche wie z.B. die Spektroskopie oder Projektionssysteme scheint der Halbleiterscheibenlaser ein geeignetes System zu sein.

Wie beim Festkörper-Scheibenlaser besteht auch bei diesem System die aktive Zone aus einer dünnen Scheibe, welche jedoch aus periodisch angeordneten, durch Spacerschichten separierten Quantenfilmen, den eigentlich laseraktiven Zonen, aufgebaut ist. Auf der Rückseite dieser Scheibe ist ein Bragg-Spiegel epitaktisch aufgewachsen, welcher zusammen mit dem Auskoppelspiegel den Laserresonator bildet. Der Halbleiterscheibenlaser eignet sich hervorragend für die Frequenzverdopplung, da er durch die geringe Auskopplung eine hohe resonatorinterne Leistungsdichte hat. Im Zusammenspiel mit dem möglichen Wellenlängendesign über die Quantenfilme lassen sich somit frequenzverdreifachte, gepulste Festkörpersysteme in der Spektroskopie durch frequenzverdoppelte Halbleitersysteme ersetzen.

Der Halbleiterscheibenlaser, als optisch angeregter Oberflächenemitter hat, gegenüber den herkömmlichen, über die Spacer gepumpten VECSEL den Vorteil, dass die Pumpstrahlung direkt in den Quantenfilmen absorbiert wird, wodurch sich der Wärmeeintrag in die aktive Zone infolge des deutlich reduzierten Quantendefekts verringern lässt. Dieser Vorteil wird mit einem höheren Aufwand bei Design und Prozessierung der Scheibe erkauft. Durch die deutliche Reduktion der Absorptionslängen sind auch für die Pumpstrahlung Resonanzeigenschaften zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Modelle zur Simulation des Lasersystems entwickelt. Insbesondere wird der Pumpvorgang genauer beleuchtet und die Resonanzeigenschaften der Scheibe durch eine weitere Ratengleichung berücksichtigt. Es wird gezeigt unter welchen Voraussetzungen es für nulldimensionale und radiale Betrachtungen ausreichend ist, die stationäre Lösung für die Pumpatengleichung zu verwenden.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Symbole	11
Extended Abstract	17
1 Einleitung	23
1.1 Anforderungen	23
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	25
2 Das Konzept	27
2.1 Optisch gepumpte Oberflächenemitter	28
2.2 Halbleiterscheibenlaser	32
3 Nulldimensionales Modell	35
3.1 Modellansatz	35
3.2 Gainfunktion	38
3.3 Iso-Dichten	39
3.4 Notwendige Erweiterungen	40
4 Confinementfaktoren	43
4.1 Definition der Γ -Faktoren	43
4.2 Confinement von Oberflächenemittern	44
4.2.1 Confinement eines VCSEL's	45
4.2.2 Confinement des Halbleiterscheibenlasers	46
4.2.3 Die Bedeutung von Γ_{Δ}	50
4.2.4 Ankopplung einzelner Quantenfilme	51
5 Transfermatrixmethode	53
5.1 Darstellung der Methode	53
5.2 Rechts- und linkslaufende Welle	54
5.3 Die Transfermatrix	54

5.4	Die Propagationsmatrix	56
5.5	Die Anwendung	56
5.6	Die Verwendung der Methode für den Halbleiterscheibenlaser	57
6	Modelle	59
6.1	Multimode - Nulldimensional	59
6.2	Longitudinale Erweiterung	60
6.2.1	Effektive Gainfunktion	62
6.2.2	Deutung der Erweiterung	64
6.3	Radiale Erweiterung	65
6.3.1	Motivation des Ansatzes	66
6.3.2	Resonatorquelle S_r	68
6.3.3	Deutung der Resonatorquelle	69
6.3.4	Die Verteilungsfunktion v_r	71
6.4	Kombination der Erweiterungen	72
7	Pumpmodell - Quantenfilmpumpen	75
7.1	Vorbetrachtung	75
7.2	Das Modell	76
7.2.1	Der Modellansatz	76
7.2.2	Ermittlung der Confinementfaktoren	77
7.2.3	Vorbetrachtungen zur Pumpphotonenlebensdauer	78
7.2.4	Berechnung der Pumpphotonenlebensdauer	81
7.3	Das longitudinal aufgelöste Pumpmodell	82
7.4	Radiale Auflösung des Pumpvorgangs	83
7.5	Kombination der Erweiterungen	84
7.6	Verknüpfung mit den Ratengleichungen	85
7.6.1	Nulldimensional	85
7.6.2	Longitudinal	87
7.7	Lösung der stationären Pumpmodellgleichung	89
7.7.1	Motivation	89
7.7.2	Berechnung einer effektiven Absorptionsfunktion α	90
7.8	Transformationsverhalten des k_p - Vektors	94
8	Vergleich Simulation - Experiment	99
8.1	Angepasstes Modell	99
8.2	Experimenteller Aufbau Quantenfilmpumpen	102
8.2.1	Confinementfaktoren der Proben	103
8.2.1.1	Ti:Al ₂ O ₃ -gepumpt	103

8.2.1.2	Diodengepumpt	105
8.2.2	Numerische Auswertung	107
8.2.2.1	Ti:Al ₂ O ₃ -gepumpt	108
8.2.2.2	Diodegepumpt	109
8.3	Diodengepumpt - longitudinal aufgelöst	112
8.3.1	Confinement	113
8.3.2	Numerische Auswertung - Longitudinal	114
8.4	Ti:Al ₂ O ₃ -gepumpt - radial aufgelöst	118
9	Zusammenfassung und Ausblick	127
	Literaturverzeichnis	131
	Abbildungsverzeichnis	137
	Danksagung	139

Extended Abstract

Laser systems have earned their place in our everyday life. They can be found in a wide range of applications. Lasers are used in medical science, e.g. within the scope of surgery, in communication technologies for rapid data transfer, and in the field of consumer electronics, such as CD players.

Most industrial applications demand for a laser that can be manufactured at high rates and low costs. One candidate to satisfy these requirements is the semiconductor laser. This explains why they are in use in a lot of the areas mentioned above. Even in the field of machining applications, e.g. welding, diode-lasers are utilised directly or as pumping devices for thin-disk laser systems.

In science one requires lasers for different spectroscopic investigations. Thus, a laser with a wavelength that can be easily designed combined with good beam quality is of great advantage.

A structured semiconductor material composed of quantum well layers between spacer material represents a laser structure with these advantages. The system itself is tunable in wavelength by varying the thickness of the quantum wells. Such layered semiconductors are flat devices, so there are two possible setups for the lasing process with different physical characteristics. First, light can be emitted through the edges of the structure, i.e. the axis of the resonator is parallel to the planes of the quantum wells. Second, light can be sent out perpendicular to the surface of the semiconductor structure. In this case, the behaviour of the laser is also determined by the spacing of the quantum wells, because the planes formed by the quantum wells are orientated parallel to the surface of the structure. In designing a system like this, the choice of the correct thickness of the spacers is critical. It is preferable to have the maxima of the standing optical wave located at the quantum wells. Surface emitting quantum-well lasers are also called VCSELs (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers). Both are electrically pumped systems. Edge-emitting lasers show a lower beam quality but much higher output power compared to VCSELs. To form a resonator, a common VCSEL has Bragg-mirrors with different reflectivities at bottom and top of the structure. Thus, single-mode output power of a VCSEL is limited by the shortness of the cavity. One way to achieve higher single-mode output power is to replace the out-coupling Bragg-mirror with an external mirror. This leads to an external cavity, and these systems are called VECSELs (Vertical External Cavity Surface

Emitting Lasers). With this modification, the achievable single-mode output powers are increased. Nevertheless, the electrical pumping scheme and the currents flowing through the active zone limit beam quality and lead to high thermal loads through ohmic losses. One way to get around these problems is optical instead of electrical pumping. The pump wavelength is chosen to lie above the band-edge of the spacer material. This leads to high absorption levels within the spacers even for single-pass pumping. As mentioned before, thermal rollover limits the use of VECSELs. So one option to get higher performances is the utilisation of efficient cooling techniques. The better way is to decrease the thermal load generated by the optical pumping process itself. With this approach one can achieve a comparable efficiency with less cooling effort. This can be done by decreasing the quantum defect or in other words by pushing the pumping wavelength towards the laser wavelength. The pumping concept is a major part of the so called semiconductor thin-disk laser concept.

In this disk laser approach the quantum wells are pumped directly. The pump wavelength is shorter than the laser wavelength but not short enough to induce absorption in the spacers. The disadvantage of this method lies in the small absorption values for a single-pass of the pump-radiation. One way to increase the absorbed pump power is the well known multi-pass pump-system from the thin-disk laser concept. Multi-pass results in folding the pump-ray several times over the semiconductor. It is also possible to get higher absorption values by resonant enhancement, as the semiconductor disk represents a Fabry-Pérot resonator inside the laser-cavity. The second concept is more complicated in the sense of manufacturing the semiconductor disks and needs greater efforts in designing and processing the structured layer system. Whenever semiconductors are used, one major aim is to lower costs. Due to the small pump spot size, off-resonant pumping leads to elaborate and therefore expensive optical pump system. Using only resonances to increase pump absorption, the need of high precision in processing the structure also leads to higher costs. In combining both concepts one can get equal absorption levels with reduced costs.

The total length of the active layers in a semiconductor-disk lasers is very small, this leads to small out-coupling values and a high internal energy density. Thus, the system is suitable for nonlinear optical effects such as intra-cavity frequency doubling. This increases the range of possible applications for the semiconductor disk laser system.

Optically pumped VECSELs typically employ highly absorbing spacers between the quantum wells for the generation of electron-hole pairs. Therefore, standing wave effects have to be considered only for the laser field but not for the pumping process. When using the thin-disk laser approach the absorption of pump light per single-pass is very small for a quantum-well, i.e. the amplitude damping of pump radiation is very

low considering one round-trip inside the sub-cavity. This requires the development of a standing wave also for the pumpfield. Hence, the overall pump-absorption very strongly depends on the position of the quantum wells and their match with the pumpfield antinodes.

The aim of this work was the development of sets of differential equations to describe and understand the system behaviour in more detail. Starting with the common well-known rate equations for semiconductor lasers (from now on called the zero-dimensional model), a radial and a longitudinal laser model was introduced. Especially for the longitudinal problem a new pump-model was needed taking into account the resonant periodic gain structure. With this novel model one is able to calculate the carrier generation term in the carrierdensity rate equation separately for each quantum well. For these calculations it was necessary to determine the so-called confinement¹ factor Γ . This was done by considering the confinement factor of an ordinary VCSEL at first. The research on this topic showed that the overall confinement is specified by two factors, Γ_{Δ} and Γ_r , both depending on the wavelength. The first one describes the influence of the sub-cavity on the confinement, and it was possible to introduce the effective gain function g_{eff} which is valid for every well inside the considered structure. The second tells how electrical field and well are positioned relatively to each other. Combining this pump-model rate equation with the rate equations of laser field and carrier density, one can get a closed set of equations which allows to calculate all dependencies in a self-consistent way. The developed model is important for the design of high-quality structures with good characteristics for pumping and lasing at the same time. The studies on the developed pump-model showed that it can be reduced on its steady-state solution if only the zero-dimensional model has to be solved.

The calculations made with this model are in good agreement with experimental results. The considered structure consists of 13 quantum wells and was pumped with a diode-laser at a wavelength of 938 nm. For this wavelength there were great differences in the coupling values, represented by Γ_r , between quantum wells and the pumpfield. Therefore, for the 'good' quantum wells the carrier density rises very strongly with increasing pump power. The 'bad' ones stay at low density levels. This behaviour changes rapidly above threshold. From this point on a 'bad' one also shows an increase in the carrier density. This behaviour is caused by the build-up of lasing, by which the 'bad' quantum wells are pumped indirectly. This effect can only be calculated within a longitudinal model.

The other model implemented in this work is the radial model that takes into account the radial modal behaviour of the resonator. The aim in developing this model was to

¹Confinement defines what amount of stored energy is interacting with the active zones.

introduce these transverse effects in the system of rate equations without doing calculations on light propagation inside the resonator-cavity, because these calculations can only be done on high-performance computers. Regarding the modal behaviour of the semiconductor thin-disk laser it is possible to qualify the lateral sources function S_r which includes the influence of the resonator into the local two-dimensional photon-density function. The model uses the introduced lateral intensity-distribution function v_r , which can be deduced from the resonator design, in combination with former system-states to calculate the sources function. In steady-state operation it is possible to map S_r on the radial photon-lifetime function which is unique for the considered value of pump-power. This lifetime represents the resonators radial behaviour inside the photon-density function, just as the 'normal' photon-lifetime specifies the system losses caused by out-coupling and internal absorption in the photon-density equation. In this way one is able to bring all resonator effects in a local equation-system without doing calculations of light propagation. Finally it is possible to sum up those two lifetimes to one effective radial photon-lifetime. The calculations for the mentioned structure were also made with this radial model. In this case the pump-source is a Ti:sapphire-laser with a wavelength of 940 nm. The pump-spot diameter was 130 μm , the pumpfield distribution was a higher-order Gaussian distribution (from now called Super-Gauß). There are two different lasing-mode distribution functions considered for the calculations. The first one is a Gauß-distribution with the same order as the pumpfield. The second one is a pure Gauß-distribution. The diameter of the lasing-mode is set to 115 μm for both. The calculations on these two different setups showed the expected behaviour.

1. The pure Gauß with its gentle tails leads to a high energy transfer rate to the areas outside the pump-spot. This results in higher threshold values compared with the multi-mode setup.
2. Different sizes of pump-spot and lasing-mode and/or different distribution functions lead to reduced slope values. In the case of the pure Gauß-distribution the reduction was slightly smaller.
3. The calculated values for the Super-Gauß fit very well with the corresponding experimental results of the multi-mode designed laser system.

The deduced model is able to describe the radial behaviour of semiconductor thin-disk laser without performing complicated and extensive calculations. In this sense it is a simple model.

In summary, the major aims of this work are accomplished. Two new models are developed to understand the diode-laser system in more detail. The first model, the longitudinal model is able to simulate the interactions between pumpfield and lasing-mode

with several quantum wells. Therefore, it can play an important role in designing new structures that fit laser- and pumpfield at once. The radial model allows calculations on the effects of lateral modal behaviour in laser operation. Thus, both models can be used to optimise the laser system in the developing phase.

1 Einleitung

Halbleiterlaser eignen sich sehr gut als günstige und kompakte Laserquelle und finden deshalb Anwendungen in vielen technischen Geräten.

So werden Halbleiterlaser in Kombination mit Lichtleitern in Datenübertragungssystemen eingesetzt, im Bereich der Unterhaltungselektronik sind sie in CD- bzw. DVD-Playern zu finden, aber auch in Hochleistungsanwendungen der Materialbearbeitung sind Halbleiterlaser anzutreffen. So z.B. direkt, als Laser für das Wärmeleitungsschweißen, aber auch indirekt, als Pumpquelle des Festkörper-Scheibenlaser für Tiefschweißungen. Im zweiten Fall wird die relativ schlechte Strahlqualität des Diodenstacks über den Umweg Festkörper-Scheibenlaser gewandelt, er dient also als eine Art Qualitäts-transformator zur Verbesserung der Prozessqualität.

1.1 Anforderungen

Für moderne Projektionssysteme sind kompakte Strahlquellen mit guter Strahlqualität bei hoher Ausgangsleistung für brillante Bildarstellungen wünschenswert. Im Bereich der Spektroskopie wären Laserquellen mit frei wählbarer Wellenlänge, entsprechend den einzelnen spektroskopischen Anforderungen, von Vorteil. In beiden Fällen sollten die Laserquellen kostengünstig und im ersten Fall auch in Großserie herzustellen sein. Lasermaterialien, die solche Anforderungen erfüllen sind Halbleiter. Es bietet sich an hierfür Halbleitersysteme zu verwenden, die aus sehr dünnen Halbleiterschichten, den so genannten Quantenfilmen, aufgebaut sind. Bei diesen hängt die Laserwellenlänge nicht nur von den Materialeigenschaften des verwendeten Halbleiters, sondern auch von der Breite, der nur wenige nm dicken Quantenfilme ab. Im Vergleich zu Festkörpern, wie sie z.B. mit Yb:YAG in Festkörper-Scheibenlasern eingesetzt werden, bietet dieses Konzept die Möglichkeit, über Materialsauswahl und Schichtdicken die Laswellenlänge zu designen.

Da es sich prinzipiell bei diesen Laserstrukturen um flächige Systeme handelt, gibt es zwei unterschiedliche Anordnungsmöglichkeiten der Resonatorachse, in der Filmebene oder senkrecht dazu. Im ersten Fall spricht man von Kantenemittern, die Laserstrahlung tritt an den Kanten des Systems aus. Eine Leistungsskalierung ist nur über die Länge der

Kante möglich, die Folge sind stark astigmatische Strahlen, durch das große Aspektverhältnis, die in einer Ebene eine hohe Divergenz aufweisen. Im zweiten Fall handelt es sich um Oberflächenemitter, die im einfachsten Fall selbst den Resonator darstellen und oft nur die Dicke einer halben Wellenlänge haben. Die Resonatorspiegel werden durch epitaktisch gewachsene Bragg-Spiegel dargestellt. Dieser Typ von Oberflächenemitter wird auch als VCSEL bezeichnet. Im Gegensatz zum Kantenemitter besitzt der VCSEL zwar keinen störenden Astigmatismus und keine Divergenz, allerdings lassen sich durch die inhomogene Stromführung¹ und den kurzen Resonator nur sehr kleine Grundmodeleistungen realisieren.

Wird der Auskoppel-Bragg-Spiegel durch einen externen Spiegel ersetzt, so kann die Resonatorlänge deutlich gesteigert werden, wodurch sich das Grundmodeverhalten erheblich verbessert [4], die mit der inhomogenen Stromführung verbundenen Probleme lassen sich durch den Übergang von einem elektrisch auf ein optisch angeregtes System vermeiden [14]. Die Wellenlänge der Pumpstrahlung wird dabei so gewählt, dass sie oberhalb der Bandkante des sich zwischen den Quantenfilmen befindlichen Spacermaterials liegt. Die durch die dort absorbierte Strahlung erzeugten Ladungsträger diffundieren und driften in die Quantenfilme und stehen dort dem Laserprozess zur Verfügung. Durch die stark absorbierenden Spacer kann schon im Einfachdurchgang eine hohe Absorption erreicht werden. Die Vorteile des optisch gepumpten Systems bestehen im Fehlen von Dotierungen, die zu unerwünschten Absorptionsprozessen führen können, und der nicht vorhandenen ohmschen Wärmelast.

Für den Betrieb solcher VECSEL ist die Wärme der limitierende Faktor, weshalb geeignete Kühlkonzepte [47], aber auch die Reduktion der Wärmelast selbst, die Schlüssel für effiziente Lasersysteme sind. Durch das Pumpen der Spacer ist der energetische Abstand zur Mode sehr groß, eine Möglichkeit diesen Quantendefekt als Wärmequelle zu reduzieren besteht im direkten Pumpen der Quantenfilme. Bei diesem Halbleiterscheibenlaser-Konzept reduziert sich, in Analogie zum Festkörperscheibenlaser, die Absorption in einem Doppeldurchgang wesentlich, weshalb geeignete Maßnahmen ergriffen werden müssen, um diese zu steigern.

Der Halbleiterscheibenlaser hat eine geringe Gesamtverstärkung, weshalb er mit kleinen Auskoppelgraden betrieben werden muss. Aus diesem Grund eignet er sich hervorragend für die resonatorinterne Frequenzverdopplung [10], wodurch sich die darstellbaren Wellenlängenbereiche vergrößern lassen und neue Anwendungen erschlossen werden können.

¹In beiden Fällen handelt es sich um elektrisch angeregte Systeme.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, umfassende Modelle zur Beschreibung des Halbleiterscheibenlasers zu erarbeiten und die mit diesen Modellen erzielten Ergebnisse vorzustellen. Dar gestellt werden soll die Lasertätigkeit im einfachen nulldimensionalen Modell, um dann auf Basis dieses Zugangs die Quantenfilme einzeln aufzulösen sowie die lateralen Feldverteilungen in der Halbleiterstruktur wiederzugeben.

Insbesondere steht die Entwicklung eines Ratengleichungsmodells für den resonanten Absorptionsvorgang und dessen stationärer Limes im Vordergrund, sowie die Kopplung dieses Modells mit den erweiterten Lasergleichungen.

In Kapitel 2 wird das Halbleiterscheibenlaserkonzept vorgestellt und der prinzipielle Aufbau der Halbleiterstruktur besprochen. In Kapitel 3 wird das nulldimensionale Modell für die Darstellung der Lasertätigkeit eingeführt und die wichtigsten Begrifflichkeiten für die weitere Modellbildung erörtert.

Bevor in Kapitel 6 das nulldimensionale Modell in longitudinaler und radialer Hinsicht erweitert werden kann, muss zuerst in Kapitel 4 der Begriff des Confinements ganz allgemein, aber auch speziell in Bezug auf den Halbleiterscheibenlaser diskutiert werden, sowie in Kapitel 5 die für die Ermittlung des Confinements wichtige Matrixtransfermethode besprochen werden.

Im Anschluss an die erweiterte Modellbildung von Kapitel 6 wird in Kapitel 7 der resonante Pumpvorgang mit dem entwickelten Ratengleichungs-Pumpmodell beleuchtet und der stationäre Grenzfall vor dem Hintergrund der Skalentrennung in Bezug auf die Lasergleichungen berechnet. Ferner wird gezeigt, dass im Fall der longitudinalen Erweiterung die Ergebnisse dieses Grenzfalls nicht mehr anwendbar sind und deshalb auf das volle Gleichungssystem zurückgegriffen werden muss.

In Kapitel 8 werden die mit den entwickelten Modellen erzielten Ergebnisse dargestellt und mit den korrespondierenden experimentellen Ergebnissen verglichen. In Kapitel 9 folgt die Zusammenfassung der Ergebnisse und der Ausblick auf weitere Untersuchungsmöglichkeiten.

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorritz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO₂-Lasern
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebisch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißseignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung

1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser

1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung

1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren

1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren

1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen

1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung

1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden

1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Pläß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken

1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Mo-lybdän

1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW

1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser

1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser

1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern

1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern

1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspaltung

1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser

1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-

Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung

1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen

1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern

1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen

1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken

1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

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 Laser gasentladungen
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

Bahnmüller, 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 3-8316-0256-3

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 Alumi-
numguß- und Knetlegierungen mit CO₂-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 3-8316-0460-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. 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 Fokussmatrixtechnik
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 Fer-tigungssystemen
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 Naht-eigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen
2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen 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 Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente
2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6