

Multi-Pass and Quantum-Well Pumped AlGaInP Disk Lasers

von Dr.-Ing. Cherry May Dannecker
Universität Stuttgart



utzverlag 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. Peter Michler

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.

Bei Fragen zur Produktsicherheit wenden Sie sich bitte
an unsere Adresse: utzverlag GmbH · Herr Matthias
Hoffmann-Nymphenburger Straße 91 · 80636
München · Telefon: 0049-89-27779100 oder
www.utzverlag.de

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2025

D DE 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2025

ISBN (Print) 978-3-8316-5082-8
ISBN (E-Book) 978-3-8316-7824-2

Printed in Germany

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

Contents

Contents	5
List of Symbols and Acronyms	7
Kurzfassung der Arbeit	11
Extended Abstract	15
1 Introduction	19
1.1 Motivation, Aim and Concept of this work	19
1.2 Outline	22
2 Semiconductor disk lasers	24
2.1 Historical key moments of VECSELs and solid-state Thin-Disk Lasers	24
2.2 The state-of-the-art of VECSELs	26
2.2.1 The state-of-the-art of red-emitting VECSELs	27
2.3 Device structure	30
2.4 Distributed Bragg Reflector (DBR)	30
2.5 The active region	31
3 Comparison of barrier- and quantum well-pumped VECSELs	35
3.1 Device description, preparation and characterization	36
3.1.1 Sample design	36
3.1.2 Angle-dependent reflectivity	37
3.1.3 Approach with an intracavity diamond heatspreader	44
3.2 Resonator design	46
3.3 Characteristics of red-emitting VECSELs	47
3.3.1 Laser performance	47
3.3.2 Measurements of photoluminescence	52
3.3.2.1 Temperature-dependent photoluminescence	52
3.3.2.2 Power-dependent photoluminescence	55
3.3.3 Power-dependent spectra of laser emission	57
3.4 Thermal calculation using COMSOL Multiphysics	59

3.5 Comparison of the calculated and the measured increase of temperature	65
3.6 Summary	68
4 Reflective multi-pass pumping	70
4.1 Multi-pass pumping with dye laser	73
4.1.1 Configurations with 2 and 12 reflections of the pump light	73
4.1.2 Characterization of laser performances	76
4.2 Multi-pass pumping with diode laser	83
4.2.1 VECSEL sample and set-up	83
4.2.2 Laser performance	86
4.2.3 Laser spectra	88
4.2.4 Frequency doubling to generate UV laser light	91
4.3 Discussion of the results	97
5 Transmissive multi-pass pumping	101
5.1 The diamond-sandwiched active region	101
5.1.1 Wafer structure	101
5.1.2 Lift-off of the active region	102
5.2 Bonding to diamond heatspreaders	105
5.2.1 Spectroscopic characterization of the sandwiched active region	106
5.2.2 The multi-pass pump optics for the transmissive gain element	111
5.2.3 Laser operation	114
5.3 Summary	116
6 Conclusion and Outlook	117
References	121
Appendices	131
I Epitaxial structures	131
A.1 Reflective sample (RS): VECSEL architecture, 5×4 QWs	131
A.2 Transmissive Sample (TS): MECSEL architecture, 10×2 QWs	133
A.3 Parameters for calculation of the second-harmonic generation	135
Acknowledgement	137

List of Symbols and Acronyms

Symbol	Description	Value	SI-Unit
P	Laser power	...	W
α_{tot}	Total absorption coefficient	...	1/m
α_B	Brewster's angle	...	rad
α_d	Pump absorption coefficient of the DBR region	...	1/m
α_g	Pump absorption coefficient of the gain region	...	1/m
c	Speed of light	2.998×10^{-8}	m/s
$\Delta\lambda$	Spectral shift	...	nm
$\Delta\lambda_{BW}$	resonance bandwidth	...	nm
$\Delta\lambda_{PLpeak}$	spectral shift of the PL peak	...	nm
$\Delta\lambda_{DBRpeak}$	spectral shift of the side lobes of the DBR	...	nm
ΔP	Change of pump power	...	W
ΔT	Change of temperature	...	°C
$\overline{\Delta T}_{r,z}$	Average change of temperature in the gain region	...	°C
$d_{diamond}$	Thickness of the heatspreaders	...	mm
d_{Bifi}	Thickness of the birefringent filter	...	mm
η_{abs}	Efficiency of pump absorption	...	%
η_{quant}	Quantum defect	...	%
η_{slope}^{abs}	Slope efficiency wrt. the absorbed pump power	...	%
η_{total}	Total overall efficiency	...	%
E_{photon}	Energy of the photon	...	eV
Φ_{pump}	Angle of incidence of the pump	...	rad
f	Focal length	...	mm
k_B	Boltzmann's constant	8.617×10^{-5}	eV/K
κ_{Brass}	Thermal conductivity of Brass	120	W/(m · K)
κ_{Diam}	Thermal conductivity of Diamond	2000	W/(m · K)
$\kappa_{d,r}$	DBR's thermal conductivity in the radial direction	54.6	W/(m · K)
$\kappa_{d,z}$	DBR's thermal conductivity in the axial direction	19	W/(m · K)
$\kappa_{g,bar}$	Thermal conductivity of the barrier layer	8.2	W/(m · K)

Symbol	Description	Value	SI-Unit
$\kappa_{g,cl}$	Thermal conductivity of the cladding layer	6.6	W/(m · K)
$\kappa_{g,QW}$	Thermal conductivity of the QW package	8	W/(m · K)
$\kappa_{g,r}$	Gain region's thermal conductivity in the radial direction	10.2	W/(m · K)
$\kappa_{g,z}$	Gain region's thermal conductivity in the axial direction	8.6	W/(m · K)
κ_{In}	Thermal conductivity of Indium	84	W/(m · K)
κ_s	Thermal conductivity of the substrate	33	W/(m · K)
λ	Wavelength	...	nm
λ_{pump}	Wavelength of pumping laser	...	nm
λ_{laser}	Wavelength of laser emission	...	nm
L_{cavity}	Resonator length	...	m
M^2	Beam propagation factor	...	...
n	Index of refraction	...	...
Δn	Difference in index of refraction	...	...
n_{eff}	Effective index of refraction	...	...
n_e	Refractive index of the material on the exit side	...	...
n_h	Refractive index of the DBR material with higher value	...	...
n_i	Refractive index of the material on the incidence side	...	...
n_l	Refractive index of the DBR material with lower value	...	...
N	Carrier density	...	cm ⁻³
N_{DBR}	Number of pairs of the Bragg mirror	...	...
N_{th}	Carrier density at the laser threshold	...	cm ⁻³
N_w	Number of QWs	...	...
P_{abs}	Absorbed pump power	...	W
P_0	Threshold power at 0K	...	W
P_1	Effective power reaching the semiconductor device	...	W
$P_{n^{inc}}$	Fraction of incident power entering the n^{th} QW package	...	W
$P_{n^{ref}}$	Fraction of the back-reflected power entering the n^{th} QW package	...	W
P_m	Incident pump power	...	W
P_{out}	Optical output power	...	W
P_{pump}	Pump power	...	W
P_{th}	Pump power at laser threshold	...	W
ϕ_{pump}	Diameter of the pump beam	...	mm
Φ_{pump}	Angle of incidence of the pump beam	...	rad
r	radial distance	...	m
R	Reflectivity	...	...

Symbol	Description	Value	SI-Unit
R_{DBR}	Reflectivity of the DBR	...	...
R_{ext}	Reflectivity of the output coupling mirror	...	...
R_{other}	Product of reflectivities of all other mirrors	...	...
R_c	radius of curvature	...	m
R_{th}	Thermal resistance	...	K/W
Θ_{phase}	Phase-matching angle	...	rad
T	Temperature	...	K
T_{hs}	Temperature of the heat-sink	...	K

Acronyms

AlAs	Aluminium-Arsenide
AlGaInP	Aluminium-Gallium-Indium-Phosphide: $[(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}]_{0.50}\text{P}_{0.50}$
BBO	β -BaB ₂ O ₄ or β -Barium-Borate
CW	Continuous-wave
CdSe	Cadmium-Selenide
DBR	Distributed Bragg-reflector
EEL	Edge-emitting Laser
Exciton	Electron-Hole-Pair
FWHM	Full width at half maximum
GaAs	Gallium-Arsenide
GaInP	Gallium-Indium-Phosphide: $(\text{Ga}_x\text{In}_{1-x})_{0.50}\text{P}_{0.50}$
IFSW	Institut für Strahlwerkzeuge
IHFG	Institut für Halbleiteroptik und Funktionelle Grenzflächen
InP	Indium-Phosphide
InGaN	Indium-Gallium-Nitride
LED	Light-emitting diode
MECSEL	Membrane External-cavity surface emitting laser
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOVPE	Metal-organic vapor phase epitaxy
MQW	Multiple quantum well
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet
NTT	Nippon Telegraph and Telephone Corporation
OPSL	Optically pumped semiconductor laser
PL	Photoluminescence
Pr:YLF	Praseodymium-doped Lithium Yttrium tetra-Fluoride

QD Quantum dot
QDs Quantum dots
QW Quantum well
QWs Quantum wells
RS Reflective Sample
RPG Resonant periodic gain
SCOPE Stuttgart Research Center of Photonic Engineering
SEM Scanning electron microscope
SHG Second-harmonic generation
TDL Thin-disk laser
TS Transmissive Sample
UV Ultraviolet
VCSEL Vertical-cavity surface-emitting laser
VCSELs Vertical-cavity surface-emitting lasers
VECSEL Vertical-external-cavity surface-emitting laser
VECSELs Vertical-external-cavity surface-emitting lasers
Yb:YAG Ytterbium-doped Yttrium Aluminum Garnet

Kurzfassung der Arbeit

Optisch angeregte Halbleiterscheibenlaser (englisch “Optically-Pumped Semiconductor Disk Lasers”, OPSDLs), auch bekannt als VECSEL (englisch “Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser”, VECSEL), haben innerhalb der letzten Dekade zunehmende Aufmerksamkeit erfahren. VECSEL, welche auf Aluminium-Gallium-Indium-Phosphid (AlGaInP) basieren und im sichtbaren roten Spektralbereich emittieren, stellen geeignete Lichtquellen mit moderater Leistung, bei gleichzeitig guter Strahlqualität dar, wie sie beispielsweise für die RGB-Displaytechnologie benötigt werden. Darüber hinaus sind AlGaInP-VECSEL interessant, da sie die Möglichkeit bieten, mit einer Frequenzverdopplung direkt den ultravioletten (UV) Bereich zu erschließen. Zu Beginn dieser Arbeit waren aufwändige Kühltechnik und Pumplichtquellen hoher Brillanz notwendige Voraussetzungen für den Laserbetrieb roter AlGaInP-VECSEL. Zwar konnten Leistung und Effizienz der temperaturempfindlichen VECSEL durch den Einsatz resonatorinterner Diamant-Wärmespreizer verbessert werden und somit erstmals VECSEL im Dauerstrichbetrieb (englisch “Continuous-Wave”, CW) realisiert werden. Das Pumpen bei größeren Pumpfleckendurchmessern erwies sich hingegen weiterhin als schwierig. Bislang konnten lediglich Ausgangsleistungen von bis zu 1,3 W sowie differentielle Wirkungsgrade von weniger als 20% demonstriert werden, was die Beschränkung der möglichen Leistungsskalierung mit den bisherigen Bauformen verdeutlicht. In den bisherigen Veröffentlichungen zu rot emittierenden AlGaInP-VECSELn kamen Pumpfleckendurchmesser von weniger als 100 µm zum Einsatz. Zur Kühlung war es notwendig, die WärmesenkenTemperatur auf unter 0 °C (und auf bis zu -31 °C) abzusenken. Ziel dieser Arbeit war es, diese Limitierungen in der Leistungsskalierbarkeit zu untersuchen und mit geeigneten Konzepten zu überwinden.

In dieser Arbeit wurden zwei Konzepte zur Ausführung von AlGaInP-VECSELn untersucht, um die hochgradig temperaturabhängige Effizienz und maximal erzielbare Ausgangsleistung zu verbessern. Das erste Konzept bestand darin, die durch das optische Anregen verursachte Temperaturerhöhung zu verringern und dadurch die maximal erzielbaren Leistungen zu erhöhen. Dies wurde durch direktes Anregen der “Quantenfilme” (englisch “Quantum Well”, QW) im VECSEL erreicht. Dies wurde mit einer Pumpoptik kombiniert, die einen Mehrfachdurchgang des Pumplichts durch den VECSEL ermöglichte, ähnlich zu den üblicherweise bei diodengepumpten (Yb-dotierten)

Scheibenlasern genutzten Pumpoptiken. Das zweite Konzept kombiniert das direkte Anregen der Quantenfilme mit der beidseitigen Kühlung durch transparente, resonatorinterne Wärmespreizer. Dadurch wird kein Bragg-Spiegel am VECSEL benötigt, welcher den größten Wärmestau bei der konventionellen einseitigen Kühlung hervorruft.

Beim QW-Pumpen werden die Pumpphotonen mit einer Wellenlänge von 640 nm direkt im aktiven Volumen der Quantenfilm-Heterostruktur absorbiert, anstatt Pumpphotonen mit einer Wellenlänge von 532 nm in den Barriere- und Abstandsschichten zu absorbieren. Das letztgenannte Verfahren wird Barriereforschicht- oder Barriere-Pumpen genannt und wird typischerweise für AlGaInP-Laser mit Ausgangsleistungen von mehr als 1 W verwendet. Die Wärme, welche durch die Energiedifferenz von Pump- und Laserübergang frei wird, auch bekannt als Quantendefekt, wird bei Einsatz des QW-Pumpens anstelle des Barriereforschichtpumpens um 50-75% reduziert. Folglich wird die in den Laser eingebrachte Heizleistung insgesamt deutlich gesenkt. Um dies zu überprüfen wurde ein direkter Vergleich und damit eine quantitative Bewertung der beiden Pumpverfahren an dem selben VECSEL durchgeführt. Die Rahmenbedingungen für das Pumpen, d.h. Pumpfleckgröße, Einfallswinkel des Pumplichts, Wärmesenkentemperatur, und die Lage des Pumpflecks auf der Probe wurden beim Vergleich von QW- mit dem Barriere-Pumpen gleich gehalten. Dabei galt das größte Augenmerk der Frage, ob die Wärme, welche durch den Quantendefekt entsteht, wesentliche Auswirkungen auf das Verhalten des VECSELs im Laserbetrieb hat.

Das QW-Pumpen erscheint prinzipiell als leicht umsetzbare technische Lösung, für die erfolgreiche Umsetzung müssen jedoch einige grundlegende Voraussetzungen erfüllt werden. Um AlGaInP-Laser mit hohen Ausgangsleistungen zu realisieren, gibt es zwei wesentliche Faktoren: Die Effizienz bei der Pumpabsorption und die hohen notwendigen Pumpleistungsdichten. Da die Photonenenergie beim QW-Pumpen gerade oberhalb der Absorptionskante des aktiven Materials liegt, ist die Absorption pro Volumen bzw. pro Durchgang durch den VECSEL vergleichsweise gering. Aus diesem Grund wurden mehrere Pumplichtdurchgänge durch das aktive Material implementiert, was die effektive Absorptionslänge und die Gesamteffizienz der Absorption deutlich erhöhte. Wie viele Pumplichtdurchgänge bei einem VECSEL benötigt werden, hängt wiederum von der Leistungsdichte und von den folgenden spezifischen Eigenschaften der Probe ab: Dem Reflektionsspektrum des realisierten Braggspiegels und dem Absorptionsspektrum der Quantenfilme, sowie von der räumlichen Lage des Stehwellenmusters relativ zu den Quantenfilmen. Grundsätzlich werden hohe Pumpleistungsdichten angestrebt, um hohe Ausgangsleistungen zu erzielen. Die Laserschwelle wird bei AlGaInP VECSELn bei einer Pumpleistungsdichte von etwa $10\text{ kW}/\text{cm}^2$ erreicht, während die höchsten optischen Effizienzen bei etwa $80\text{ kW}/\text{cm}^2$ demonstriert wurden. Kommerziell erhältliche faserge-

koppelte Pumpdioden, die Licht bei einer Wellenlänge von 640 nm emittieren, weisen zum Beispiel im Vergleich zu herkömmlichen Pumpdioden mit einer Zentralwellenlänge von 940 nm eine wesentlich geringere Brillanz auf. Momentan ist eine direkte Skalierung der Ausgangsleistung durch Erhöhen der Pumpleistung zu beispielsweise mehreren 100 W nicht möglich. Um die notwendigen hohen Pumpleistungsdichten zu erzeugen, muss demzufolge ein kleiner Pumpfleckdurchmesser realisiert werden. Dies führt in der etablierten Pumpoptik für die Mehrfachabbildung zu vergleichsweise großen Strahl-durchmessern auf dem Parabolspiegel. Folglich limitieren der zur Verfügung stehende Raumwinkel und die Größe der Pumpstrahlen die Anzahl der umsetzbaren Pumplicht-durchgänge im VECSEL. Zukünftige Weiterentwicklungen der Ausgangsleistung und der Brillanz von Pumpdioden, welche bei einer Wellenlänge von 640 nm emittieren, wären äußerst nützlich für AlGaInP VECSEL Technologie.

Aus den Versuchen ergab sich bei der Verwendung von QW-Pumpen im Vergleich zum Barriereforschichtpumpen eine Verbesserung der Effizienz auf das 3,5-Fache. Somit konnte ein differentieller Wirkungsgrad von 60% mit QW-Pumpen bei einer Wärmesenkentemperatur von 15 °C erzielt werden. Des Weiteren konnte der CW-Laserbetrieb sogar bei Wärmesenkentemperaturen von bis zu 55 °C realisiert werden. Dabei wurden die temperatur- und die leistungsabhängige Photolumineszenz (PL) gemessen, um die in der Laserstruktur resultierende Temperatur aufgrund der eingebrachten Wärme zu bestimmen. Die Ergebnisse wurden mit Berechnungen der Wärmeleitung und der Temperaturverteilung im Halbleiterchip verglichen, welche mit der Software COMSOL Multiphysics durchgeführt wurden. Des Weiteren konnte sowohl anhand der Messungen als auch der Rechnungen gezeigt werden, dass die insgesamt erzeugte Wärme beim QW-Pumpen tatsächlich signifikant kleiner ist als beim Barriereforschichtpumpen. So wurde beispielsweise bei einem Pumpfleckdurchmesser von 40 µm bezogen auf die absorbierte Pumpleistungsdichte eine Temperaturerhöhung von nur 0,0214 K pro kW/cm² beim QW-Pumpen statt 0,251 K pro kW/cm² beim Barriere-Pumpen gemessen. Diese Resultate zeigen das Potenzial des QW-Pumpens beim Anregen von rot emittierenden AlGaInP Lasern auf. Insbesondere die Kombination des QW-Pumpens mit Mehrfachdurchgängen der Pumpstrahlung im VECSEL erschien vielversprechend und wurde daher untersucht. Durch das Umsetzen beider Verfahren mit einem fasergekoppelten Pumpdiodenlaser konnte mit einem Al-GaInP VECSEL eine Ausgangsleistung von 2,5 W bei einer Wellenlänge von 665 nm erzielt werden. Der Laser wurde bei einer Wärmesenkentemperatur von 10 °C betrieben. Durch resonatorinterne Frequenzverdopplung konnte mit diesem Laser eine Ausgangsleistung von bis zu 820 mW bei einer Wellenlänge von 333 nm demonstriert werden. Diese Werte sind nach bestem Wissen sowohl für die fundamentale als auch für die verdoppelte Frequenz der Emission die höchsten bislang mit dieser Art von Lasern im CW-Betrieb

realisierten Ausgangsleistungen. Durch Vergrößern des Pumpfleckdurchmessers konnte zudem die Ausgangsleistung des Lasers bei einer Wellenlänge von 665 nm auf 3,3 W gesteigert werden. Der Laserbetrieb war an diesem Arbeitspunkt allerdings nicht dauerhaft stabil, was höchstwahrscheinlich auf eine Überhitzung zurückzuführen ist. Unter Einsatz von gepulstem Pumpen mit einem Tastverhältnis von 50% konnte der Laser bei einer Spitzen-Ausgangsleistung von 3,6 W reproduzierbar und stabil betrieben werden. Die erzielten Ergebnisse zeigen das hohe Potenzial von QW-Pumpen und Mehrfachdurchgang der Pumpstrahlung für optisch gepumpte AlGaInP-basierte Halbleiter scheibenlaser auf. Die in dieser Arbeit untersuchte Kombination von QW-Pumpen und Mehrfachdurchgang des Pumplichts ermöglichen eine Erhöhung der Ausgangsleistung und der Effizienz von AlGaInP-VECSELn sowohl im roten Spektralbereich als auch im frequenzverdoppelten Betrieb.

Weiterhin wurde ein AlGaInP VECSEL in transmissiver Anordnung untersucht. Die aktive Membran ohne DBR wurde vom Wafer abgetrennt und zwischen zwei resonatorinternen Diamant-Wärmespreizern montiert. Die optische Anregung der aktiven Membran wurde mittels QW-Pumpen mit Mehrfachdurchgang des Pumplichts implementiert. Der Laserbetrieb wurde erstmals realisiert, womit die Machbarkeit dieses Konzepts nachgewiesen wurde.

Extended Abstract

Red-emitting Aluminium-Gallium-Indium-Phosphide (AlGaInP) optically pumped semiconductor disk lasers (OPSDLs) or vertical external-cavity surface-emitting lasers (VECSELs) have been subjects of interest for laser sources in the last decade because they are suitable for use in display technology which uses RGB sources with moderate power and good beam quality and due to their potential for 2nd harmonic generation to achieve emission of ultraviolet (UV) radiation. Prior to this work, elaborate cooling schemes and pump sources with very high brightness were prerequisites to operation of red AlGaInP VECSELs. Although heat extraction by means of using intracavity diamond heatspreaders have improved the performance of highly temperature-sensitive AlGaInP VECSELs, enabling them to be operated in continuous-wave (cw) mode, pumping with larger pump spots remained problematic. This is clearly manifested in the demonstrated output powers of only up to 1.3 W and slope efficiencies of less than 20%. These previously reported red-emitting AlGaInP VECSELs were operated with diameters of the pump spot that were smaller than 100 µm and at heat-sink temperatures ranging from 0 °C down to –31 °C. These limitations in power scaling have been addressed and have been overcome in the framework of the research reported on in the present thesis.

To address the highly temperature-dependent poor performance of the AlGaInP VECSELs, two conceptual designs are proposed in this thesis. The first one is a pumping configuration to overcome temperature-dependent limitations in the power scaling of AlGaInP VECSELs. Particular to this scheme is the direct pumping of the quantum wells (QWs) combined with the multi-pass pumping typical of diode-pumped solid-state thin-disk lasers. The second conceptual design comprises the combination of QW-pumping and a configuration using two intracavity heatspreaders in order to set up a VECSEL without distributed Bragg reflector (DBR), which represents the bottleneck in heat extraction.

While QW-pumping of AlGaInP VECSELs is based on the absorption of the pump photons with a wavelength of 640 nm within the QW heterostructures of the gain region, another kind of pumping scheme is commonly used, which is based on the absorption of the pump photons with a wavelength of 532 nm in the barrier and the spacer layers. The latter pumping scheme is called barrier-pumping and applied to AlGaInP VECSELs allows to obtain output powers of more than 1 W. By replacing barrier-pumping with QW-pumping, the heat generated within the active region due to the energy difference

of pump and laser photon (quantum defect) can be reduced by 50% to 75%. Hence, the overall heat load is strongly decreased. Following this argument, to quantify the actual improvement, a direct comparison of QW-pumping to barrier-pumping was carried out within this work. The conditions such as size of the pump spot, pumping angle, heat-sink temperature and position of the pump spot on the laser device, were kept the same for QW-pumping and barrier-pumping. The investigation on the laser performance was focused on determining whether the heat generated due to the quantum defect has a major effect on the overall performance of the device.

Although the implementation of QW-pumping for high-power operation appears to be a straightforward turnkey solution, there are several fundamental requirements to make this pumping scheme serve its purpose. Very important factors in realizing high-power AlGaInP VECSELs using QW-pumping are the efficiency of the pump absorption and the power density of the pump laser. The efficiency of the pump absorption per pump pass is comparatively low when using QW-pumping since the energy of the pump photon is slightly above the absorption edge of the active material. With this in mind, the overall efficiency of the pump absorption for an AlGaInP VECSEL was increased by implementation of several pump passes through the active material in order to increase the propagation length of the pump radiation in the active material. The number of necessary pump passes on the other hand is highly governed by the pump power density and the properties of the laser device, specifically the spectral position of the high-reflection band of the DBR and the absorption band as determined by the structure of the laser device. Additionally, the achievable pump power density should be as high as possible to obtain the maximum possible output power. The pump power density necessary to reach the laser threshold of an AlGaInP VECSEL amounts to approximately $10\text{ kW}/\text{cm}^2$, the highest efficiency is typically achieved at $80\text{ kW}/\text{cm}^2$. The commercially available fiber-coupled pump diodes emitting at a wavelength of 640 nm have a comparatively low brightness in comparison to e.g. the state-of-the-art diode lasers emitting at a wavelength of 940 nm. Since scaling of the pump power density by increasing the pump power to e.g. several 100 W is not possible at this time, in order to reach high pump power densities a small diameter of the pump spot is necessary. This results in comparatively large beam diameters on the parabolic mirror used for pumping. As a consequence, with the given size of the pump optics, the number of beams distributed on the parabolic mirror and therefore the number of pump passes in the VECSEL, is limited. Future increases of the output power and the brightness of the pump diodes emitting at a wavelength of 640 nm would be beneficial to the AlGaInP VECSELs.

The results of this work showed that the efficiency with respect to the absorbed pump power of AlGaInP VECSELs was enhanced by 3.5 times when using QW-pumping

instead of barrier-pumping. A slope efficiency of 60% was obtained with QW-pumping at a heat-sink temperature of 15 °C. Continuous-wave laser operation was further demonstrated at heat-sink temperatures of up to 55 °C. Both, temperature- and power-dependent photoluminescence (PL) measurements were carried out to measure the increase of temperature in the laser device. The measured values were compared with the increase of temperature resulting from heat transfer calculations using the COMSOL Multiphysics™ software. Both the measurement of photoluminescence and the COMSOL simulation show that the overall heat load in the QW-pumped laser is smaller than in the barrier-pumped laser. For instance, with a diameter of the pump spot of 40 µm the temperature rise with respect to the absorbed pump power density was measured to be only 0.0214 K per kW/cm² for QW-pumping instead of 0.251 K per kW/cm² for barrier-pumping. These results demonstrated the potential of QW-pumping for the operation of red-emitting AlGaInP disk lasers and encouraged to explore QW-pumping further, especially in combination with the multi-pass pumping. The implementation of both QW-pumping and multi-pass pumping with a fiber-coupled diode laser resulted in an output power of 2.5 W from an AlGaInP VECSEL emitting at a wavelength of 665 nm. It was operated at a heat-sink temperature of 10 °C. Intracavity frequency-doubling allowed to generate a UV laser beam with a power of 820 mW at a wavelength of 333 nm. To the best of my knowledge, these are the highest CW output powers from this type of laser when operated at the fundamental wavelength and in frequency-doubled operation so far. When operated at the fundamental wavelength, further power scaling by increasing the size of the pump spot resulted in an increased output power of 3.3 W. However, the laser operation was not stable on the long term, most likely due to overheating. When the laser was operated with a pump duty cycle of 50 %, a reproducible and stable peak output power of 3.6 W was obtained. The combination of QW-pumping and multi-pass pumping allowed to increase the output power and the efficiency of AlGaInP VECSELs, both at the fundamental wavelength of 665 nm and at the frequency-doubled wavelength of 333 nm.

Furthermore, a transmissive configuration of the AlGaInP VECSEL was investigated. A DBR-free active region was removed from the growth wafer and was mounted between two intracavity diamond heatspreaders. Quantum-well and multi-pass pumping were implemented for excitation of the active region. Laser operation of the VECSEL in transmissive configuration was realized for the first time within the scope of the research reported on in this thesis, hence, proving the concept's feasibility.

1 Introduction

1.1 Motivation, Aim and Concept of this work

Laser technology brought about new applications from laboratories to an indispensable tool in almost all relevant areas of our daily lives. Examples of applications include metal processing like drilling, welding, annealing and cutting using gas lasers, fiber lasers, thin-disk lasers and diode lasers. Manufacturing of semiconductor and microelectronic devices, as well as communications and optical data storage mainly use laser diodes. Further applications are in the field of defense, medicine and cosmetics, optical characterizations such as spectroscopy, microscopy and metrology. Nowadays, lasers are indispensable in display and projection technologies, printing and many more. As future applications will continue to emerge, the use of lasers will only become more widespread.

Concerning the semiconductor lasers, one of their major applications is in the field of lithography, which requires ultraviolet (UV) laser light. Semiconductor lasers offer advantages over conventional UV laser sources such as Nitrogen lasers and Helium-Cadmium lasers, because they are compact, inexpensive, efficient, reliable and can be designed to emit at the desired wavelength. However, generation of high-power, continuous-wave UV light by direct emission from semiconductor lasers is difficult. The shortest wavelength in the UV spectral range that has been achieved by direct emission is about 370 nm [1]. Another means of shortening the emission wavelength of semiconductor lasers is by frequency conversion. For example, Toptica applies second and fourth harmonic generation to generate light in the wavelength range of 190 nm to 680 nm [2].

A much more attractive means to generate UV light would be the *vertical-external-cavity surface-emitting laser* (VECSEL) or optically pumped *semiconductor disk laser* (SDL). VECSELs can be used to generate output beams of good beam quality more easily and the conversion efficiency is increased as the *second-harmonic generation* SHG of UV light is implemented in the external cavity of the VECSEL. VECSELs have drawn much attention from the research community in the last two decades due to their potential in combining favorable properties of two distinct types of lasers: The solid-state *Thin-Disk Laser* (TDL) and the *vertical-cavity surface-emitting lasers* (VCSELs). As its name

suggests, this comparatively new type of laser works by exciting a thin semiconductor gain material, by means of optical pumping to generate a laser radiation in a cavity which consists of a highly reflective gain mirror and one or more external partially transmitting laser mirrors. Due to these features, the architecture of the VECSEL is a composite of the solid-state TDL geometry and semiconductor gain material. quantum-well-pumped (QW-pumped) VECSELS typically contain a thin gain region, resulting in low single-pass absorption and single-pass gain, which in turn would benefit from multi-pass optical pumping and resonators with low round-trip losses.

VECSELS have features which are advantageous and are suitable for future applications. As mentioned by Okhotnikov in [3] these features include:

- Coverage of a broad wavelength range, from ultraviolet to the infrared, is possible out of the available GaN, GaAs, InP and GaSb semiconductor material systems and customized structural designs.
- With the know-how in band gap engineering, laser properties such as high output powers, low laser threshold, high efficiency of absorption of the pump light and high optical efficiency can be tailored.
- Since the semiconductor layers of VECSELS, in contrast to the ones of Vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELS), are not doped, the epitaxial growth is simplified. Additionally, the strong free-carrier absorption of the doped regions which can degrade laser threshold and efficiency is eliminated.
- As VECSELS are pumped optically, there are no p-n junctions and electrical interconnects and consequently, losses due to heating are reduced.
- With the availability of high-power, multimode diode lasers for pumping and the power scalability by means of increasing the size of the pump spot, output powers of several mW in continuous-wave (CW) fundamental-mode operation with a beam propagation factor of $M^2 \leq 1.3$ are possible.
- The external cavity of the VECSEL provides versatility in resonator design which is desirable for introducing or inserting of various intracavity optical elements. These include nonlinear optical crystals, etalons, Brewster's angle birefringent filters, saturable absorbers, high-reflectivity gratings, for intracavity techniques such as frequency mixing, wavelength tuning, stabilization of polarization, modelocking, or heat dissipation using intra-cavity heatspreaders. In addition, resonators can contain multiple semiconductor disks for further power scaling.

Red-emitting VECSELS with wavelengths ranging from 650 to 670 nm can efficiently be frequency-doubled to the wavelength range of 325 to 335 nm using intracavity nonlinear crystals [4]. Further extension towards shorter wavelengths is possible by external SHG

of the already frequency-doubled laser emission.

Despite the demonstrated success in the first stage of SHG of red VECSELs to UV emission, the output power has been rather modest which is to a large extent due to the limited performances of the laser already at the fundamental emission wavelength. Thus it is of critical importance to address firsthand the challenges in the fundamental red emission.

Improvement of the performance of the laser emitting in the red visible range would also benefit entertainment industry, in particular, the RGB sources in projector display technology. Lasers for this application require moderate output powers of several hundreds of mW to a few tens of W. One main advantage of using lasers instead of the conventional lamp projectors is the laser's wide range of spectral coverage with narrow spectral emission widths. Of course, lasers with good beam quality and power scalability are vital to the performance of projectors, leading to unrestricted depth of focus, high contrast ratio and sharpness of the resulting image. Aluminium-Gallium-Indium-Phosphide-based (AlGaInP-based) VECSELs can meet those requirements.

Commonly used laser oscillator architectures for the generation of red laser light for RGB applications as well as potential benefits of QW-pumped VECSELs will be described in the following. Noticeably, in the red spectral range, there are not that many elegant alternative solutions.

To date, $\text{Pr}^{3+}\text{:LiYF}_4^1$ (also known as Pr:YLF) rod lasers, have been widely exploited. Pr:YLF is typically used for emission in the visible spectral range with wavelengths ranging from 480 nm to 720 nm and is being pumped at one of the absorption peaks at around 440-480 nm. The revival of the Pr:YLF rod lasers in the laser market was ushered by the development of pump sources with emission in the blue spectral range with a wavelength of approximately 480 nm. For example, red emission at a wavelength of 640 nm was achieved from direct pumping of Pr:YLF by InGaN² laser diodes [5, 6]. With the development of high-power InGaAs based VECSELs emitting at a wavelength of 960 nm and intracavity frequency-doubled emission at a wavelength of 480 nm [7, 8], access to higher output powers of up to 3 W became possible with a Pr:YLF rod laser [9]. The structure of VECSELs suitable for red laser emission can be complex too if green pump light is necessary. To summarize, the commonly used red lasers require rather complex (SHG) pump sources, or are limited by the output powers available from InGaN based lasers. Development of VECSELs which can be excited directly using

¹Trivalent Praseodymium-doped Lithium Yttrium tetra-Fluoride or Pr:YLF

²Indium Gallium Nitride

the fundamental emission from another semiconductor pump laser, e.g. AlGaInP based lasers, would offer a simple laser layout, higher efficiencies and higher obtainable output powers.

Therefore the work for this thesis, which started in 2012, concentrated on developing and optimizing VECSELs emitting light at wavelengths of 660 to 670 nm and at wavelengths of 330 to 335 nm. It is a continuation of the work on the red-emitting VECSELs which was carried out during the past years. The main work discussed in this present thesis was focused on a conceptual pumping design that aimed to reduce the heating which is induced in the gain medium due to pumping and consequently increase the efficiency of the red VECSEL. Red emission was directly generated from a GaInP/AlGaInP/GaAs VECSEL while UV light was the result of frequency-doubling the red-emitting VECSEL. As frequency conversion is well known, this work will not elaborate the details of the conversion. The main focus was to investigate and optimize a concept for high-power red VECSELs, suitable for intracavity frequency-doubling to achieve generation of high-power UV radiation. As a consequence, within the studies of this work, AlGaInP-VECSELs emitting in the red and UV spectral ranges with record high output powers were demonstrated. A systematic scheme for direct excitation of the QWs of the active region combined with multi-pass pumping, led to an improvement of the obtainable output power to twice the value which was previously achieved with a red-emitting VECSEL [10]. Furthermore, the implementation of intracavity frequency-doubling enabled an increase of the output power of the generated UV radiation by a factor of two, as compared to the state of the art. In conclusion, this work showed a significant step forward for cw VECSELs in generating laser beams in both the red and the UV spectral range.

1.2 Outline

This thesis is structured as follows. Chapter 2 presents the basic principles of the VECSEL laser operation and the state of the art. Additionally, the structure and properties of the gain material, as well as different pumping schemes are described. A direct comparison of the laser performances of the QW- and barrier-pumped VECSEL operated in continuous-wave and at the fundamental wavelength are presented in chapter 3. Here, the laser performance is described regarding output power, efficiency and emission spectra. In another part of this chapter, calculations of the heat deposited in the active region using COMSOL Multiphysics finite element analysis are presented and compared with experimental measurements. Power scaling by increasing the efficiency of the absorption of the pump light of the VECSEL is discussed in chapter 4. Furthermore, chapter 4 covers results

of the intracavity frequency-doubling. The 5th chapter describes and presents the laser performance of the QW-pumped diamond-sandwiched DBR-free semiconductor gain chip.

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 Strahlführungs-
system von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

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

Rudlaff, Thomas

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

Borik, Stefan

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

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell
längsgeströmté CO₂-Laser
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
längsgeströmté CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

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

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstof-
fe 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 zwei-
stufiger 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 Gasentladungs-
strecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebisch, Jürgen

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

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hoch-
leistungslaser
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

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

- Wittig, Klaus**
Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungs-laserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5
- Grünenwald, Bernd**
Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mit-tels 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 Entwick-lungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3
- Bloehs, Wolfgang**
Laserstrahlhärten mit angepaßten Strahlfor-mungssystemen
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 mikrokanal-gekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8
- Plaß, Wilfried**
Zerstörtschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6
- Schaller, Markus K. R.**
Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetall-schichten 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**
Fluidodynamische und elektrophysikalisch opti-mierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9
- Volz, Robert**
Optimierte Beschichten von Gußeisen-, Alumi-nium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2
- Bartelt-Berger, Lars**
Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grund-mode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0
- Müller-Hummel, Peter**
Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvor-richtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung
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 Materialbearbei-tung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5
- Callies, Gert**
Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbe-stimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3
- Schubert, Michael E.**
Leistungsskalierbares Lasersystem aus faserge-koppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1
- Kern, Markus**
Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laser-strahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X
- Raiber, Armin**
Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermik-robohren 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 Lasergesamtladungen
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 Weichlötzens 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 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 3-8316-0460-6

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 Laserstrahltiefschweißen 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 variab-lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen
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 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 Breitling

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 Weerpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen
2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyert

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
- Sven-Simon Beyert**
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
- Tilman Froschmeier-Hanss**
Festigkeitsverhalten laserstrahlgeschweißter belastungsangepasster Stahlwerkstoffverbindungen
2014, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-4347-9
- 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 Stöpler**
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**
Fluidodynamische 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 Negele**
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 978-3-8316-4643-2

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 Brilanz
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

Andreas Heider

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

Marcel Schäfer

Energetische Beeinflussung von Schmelzeffuss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl
2018, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-4742-2

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

Forschungsberichte des IFSW ab 2019 erschienen im utzverlag, München

Tom Dietrich

Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern
2019, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4785-9

Christian Hagenlocher

Die Korngrenzen und der Heißrisswiderstand von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen
2020, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4864-1

Martin Rumpel

Applications of Grating Waveguide Structures in Solid-State Lasers
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4801-6

Florian Fetzner

Analysen der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahltiefschweißen mittels reduzierter Modelle.
2020, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-4874-0

Michael Eckerle

Generation and amplification of ultrashort pulsed high-power cylindrical vector beams
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4804-7

Michael Jarwitz

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften.
2020, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4882-5

Martin Stubenvoll

Messung und Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen in optischen Elementen
2019, 118 Seiten, ISBN 978-3-8316-4819-1

Christian Röhrrer

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern
2020, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4888-7

Martin Sommer

Laserstrahlschweißen der Aluminiumlegierung AlMgSi mittels Strahloszillation
2021, 110 Seiten, ISBN 978-3-8316-4898-6

Birgit Weichert

Experimental Investigations on Power Scaling of High-Brightness cw Ytterbium-Doped Thin-Disk Lasers.
2021, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4914-3

Sebastian Faas

Oberflächenfunktionalisierung von Stahl mit UKP-Lasern mit mehreren Hundert Watt mittlerer Leistung.
2021, 95 Seiten, ISBN 978-3-8316-4935-8

Daniel Weller

Erhöhung der Prozesssicherheit beim Remote-Laserstrahlfügen von Aluminiumwerkstoffen.
2021, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4940-2

Sebastian Hecker

Verfahren zur Inline-Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern
2022, 132 Seiten, ISBN 978-3-8316-4955-6

Frieder Beirow

Leistungsskalierung ultrakurz gepulster radial polarisierter Laserstrahlung.
2022, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4970-9

Meiko Boley

Bestimmung und Regelung der Kapillar- und Nahttiefe beim Laserstrahlschweißen.
2022, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4986-0

Christoph Röcker

Flexible Verstärkung und Frequenzkonversion ultrakurzer Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2022, 182 Seiten, ISBN 978-3-8316-4987-7

Oliver Bocksrocker

Mechanismen der Entstehung von Schnittunregelmäßigkeiten beim Laserschneiden mit 1 µm Wellenlänge
2023, 128 Seiten, ISBN 978-3-8316-4999-0

Daniel Förster

Energieeinkopplung und Energieumwandlungsprozesse bei der Bearbeitung von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen
2023, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-5009-5

Daniel Holder

Laser micromachining with target depth
2023, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-5010-1

Florian Bienert

Periodenchirp optischer Gitter
2024, 222 Seiten, ISBN 978-3-8316-5061-3

Jannik Lind

Einfluss von Strahlformung auf Absorption, Fugenquerschnitt und Produktivität beim Laserschneiden
2024, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-5062-0

Jan-Hinnerk Wolter

Scheibenlaser mit beidseitiger Kühlung des Laserkristalls
2025, 194 Seiten, ISBN 978-3-38316-5067-5

Benjamin Dannecker

Untersuchung von Scheibenlasern zur Erzeugung von Pulsen mit einer Dauer von weniger als 500 fs
2025, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-5080-4

Cherry May Dannecker

Multi-Pass and Quantum-Well Pumped AlGaNP Disk Lasers
2025, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-5082-8