

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

S.-S. Beyertt
Quantenfilm-Pumpen zur
Leistungsskalierung von
Halbleiter-Scheibenlasern

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern

von Dr.-Ing. Svent-Simon Beyertt
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. Peter Unger

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., 2010

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 2011

ISBN 978-3-8316-4051-5

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Symbolverzeichnis.....	3
Kurzfassung.....	9
Extended Abstract	12
1 Einleitung.....	17
1.1 Hintergrund und Zielsetzung.....	17
1.2 Struktur der Arbeit.....	19
2 Stand der Technik.....	20
2.1 Aufbau des Halbleiter-Scheibenlasers.....	20
2.2 Absorption und Verstärkung beim Absorber-Pumpen.....	23
2.3 Einfluss der Temperatur	27
3 Möglichkeiten zur Leistungssteigerung.....	29
3.1 Kühlung	29
3.2 Wärmeeintrag	33
3.2.1 Barrieredesign	33
3.2.2 Quantenfilm-Pumpen	33
3.2.3 Vor- und Nachteile der Methoden	34
4 Grundlagen zum Quantenfilm-Pumpen	35
4.1 Mehrere Pumpstrahlungsdurchgänge.....	35
4.2 Absorption beim Quantenfilm-Pumpen	36
4.3 Optimierung der Proben	42
4.3.1 Resonante Absorption.....	42
4.3.2 Einfluss der numerischen Apertur und der Breite des Pumpspektrums ..	47
4.3.3 Transparenzschwelle	54
5 Experimenteller Vergleich Quantenfilm- und Absorber-Pumpen	60
5.1 Absorptionsverhalten.....	60
5.1.1 Aufbau der Probe	61
5.1.2 Aufbau des Experiments	62

5.1.3	Ergebnisse	64
5.2	Temperaturverhalten	66
5.2.1	Aufbau der Probe	66
5.2.2	Aufbau des Experiments	67
5.2.3	Laserkennlinie	68
5.2.4	Temperaturmessung aus Resonanzlinien	70
5.2.5	Ergebnisse	73
5.3	Leistungsskalierung	75
5.3.1	Messaufbau	75
5.3.2	Ergebnisse	78
6	Experimente mit optimierter Probe	80
6.1	Aufbau der Probe	80
6.2	Resonante Absorption	81
6.3	Laserkennlinien	82
7	Bewertung der Ergebnisse Quantenfilm- / Absorber-Pumpen	85
8	Ausblick	87
	Literaturverzeichnis	92
A	Anhang	97
A.1	Spektroskopie	97
A.1.1	Messaufbau für Photolumineszenz- und Reflexionsmessungen	97
A.1.2	Einfluss der Resonanzen auf die Spektren	99
A.2	Rekonstruktion des Schichtaufbaus	102
A.2.1	Γ -, Γ_{RPG} - und Γ_{CAV} -Funktionen der Proben	104
A.2.2	Rekonstruktion der intrinsischen Photolumineszenz	108
A.3	Direkte Messung der Wärmeerzeugung	110
A.3.1	Messaufbau zur Wärmemessung	110
A.3.2	Ergebnisse	111
	Danksagung	115

Kurzfassung

Viele Anwendungen der Medizin- und Displaytechnik benötigen Lasersysteme mit guter Strahlqualität bei immer höherer Leistung. Ein vielversprechender Kandidat hierfür ist der Halbleiter-Scheibenlaser. Das laseraktive Medium besteht aus mehreren Quantenfilmen, die von Barrieren-Schichten umgeben sind, und liegt in Form einer Scheibe vor, welche als End- oder Umlenkspiegel in einem Laser Resonator verwendet wird. Die Anregung erfolgt in der Regel durch optisches Pumpen der Barrieren-Schichten.

Verwendet man die Eigenschaften derzeitiger Mikrokanal Wärmesenken auch für das Kühlen großer Flächen und limitiert die Erwärmung auf 100K, so ergibt sich eine kühlbare Wärmestromdichte von ca. $0,5 \text{ kWcm}^{-2}$. Ist eine Skalierung der Ausgangsleistung über die gepumpte Fläche gewünscht, definiert dies die obere Schranke für die Wärmestromdichte. Berücksichtigt man nur den Quantendefekt von typisch 20 %, welcher letztlich in Wärme umgewandelt wird, so ergibt schon dies eine Beschränkung der maximalen Pumpleistungsdichte auf $2,5 \text{ kWcm}^{-2}$. Bei typischen Laserschwelldichten von 1 kWcm^{-2} ist auf diese Weise kein effizienter Laserbetrieb weit über der Schwelle möglich.

In dieser Arbeit wird daher untersucht, ob durch direktes Pumpen der Quantenfilme eine deutliche Verringerung der anfallenden Wärme erreicht werden kann. Durch die Reduktion des Quantendefekts auf Werte um 5 % wird die entstehende Wärme daher im Idealfall um das Verhältnis der beiden Quantendefekte verkleinert (Faktor 4). Mit dem Übergang auf das Quantenfilm-Pumpen geht jedoch auch eine Verringerung der Absorption der Pumpstrahlung einher. Daher werden Konzepte vorgestellt und in wichtigen Teilen experimentell verifiziert, die es erlauben, durch ein angepasstes Design der Halbleiterscheibe eine zum konventionellen Pumpen vergleichbare Absorption unter Beibehaltung der Lasereigenschaften sicherzustellen. Durch eine Optimierung der gleichzeitigen Überlappung der Lage der Quantenfilme mit den Stehwellenmaxima des Pump- und des Laserfeldes kann die benötigte Anzahl an Quantenfilmen stark verringert werden. Experimentell wurden für nur 6 Quantenfilme Absorptionsgrade bis 80 % bei einer einfachen Rückabbildung der Pumpstrahlung demonstriert. Die absorbierte Laserschwelldichte kann so auf $0,6 \text{ kWcm}^{-2}$ gesenkt werden. Im direkten Vergleich beider Pump-Konzepte kann im Quantenfilm-gepumpten Fall eine um den Faktor 3 geringere Erwärmung der aktiven Zone nachgewiesen werden. Die Laserleistung kann um etwa 60 % gesteigert werden, ohne dass eine thermische Degradation der Leistungskennlinie auftritt. Die Ausgangsleistung im Quantenfilm-gepumpten Fall war einzig durch die limitierte Leistung der vorhandenen Pumpdiode begrenzt.

Extended Abstract

At the present state of the art, the output power of a single-mode vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is limited to several milliwatts. To increase the output power the active area has to be enlarged which has disadvantages such as multimode behaviour as well as problems when using electrical pumping. To avoid these problems optical pumping can be used in combination with an external cavity, leading to the so-called vertical external cavity surface emitting laser (VECSEL), optically pumped semiconductor laser (OPSL) or semiconductor thin-disk laser. However, the absorption in the quantum wells forming the active region of conventional semiconductor disk lasers is very low. Therefore, in conventional systems, the barriers surrounding the quantum wells are used as absorption layers, thus decoupling pump-radiation absorption from quantum-well absorption. This leads to comparatively modest requirements on the spectrum of the pump diodes because their wavelength only has to be shorter than the corresponding bandgap of the barrier-material. Since the difference in the bandgaps of the quantum wells and the adjacent layers needs to be sufficiently large the minimum distance of pump wavelength to lasing wavelength is rather high, setting a lower limit for the quantum defect of typically 20 %.

Using copper heat sinks, output powers of up to 8 W have been demonstrated. The output power in this case is limited by the strong heating of the active region, which is due to the high pump power densities needed for efficient operation of the semiconductor thin-disk laser in combination with the poor thermal conductivity of the semiconductor materials. Therefore, ways to counteract the temperature rise inside the active region are considered and experimentally proven as part of this work.

First, the thermal conductivity of the semiconductor thin-disk laser has to be optimized. This is usually achieved by using diamond heat sinks and pump spot sizes of similar size or smaller than the heat sink thickness. Thus, three dimensional heat flow can efficiently increase the cooling power of the system. However, the need for three-dimensional heat flow limits the maximum pump-spot diameter and thus the maximum possible output power. True power scaling requires the less effective, purely one-dimensional heat flow perpendicular to the disk surface for cooling. To make this work, the heat generated in the semiconductor disk has to be minimized. Therefore, minimizing the quantum defect is highly desirable and can be done by direct optical pumping of the quantum wells.

To do so, the basics of quantum-well pumping are analyzed, and methods to optimize the structures are developed. One difficulty is that a single quantum well absorbs less than one percent in a single pass, or even less when the quantum well is pumped to the carrier density needed to reach transparency at the laser transition. This leads to an overall pump radiation absorption of only a few percent per single pass. Increasing the

pump absorption - prerequisite for a good overall laser efficiency - requires the pump radiation to pass the quantum wells several times. There are two ways of doing this, one or both of which can be utilized in a given instance:

1. Use external pump optics that reflect back the pump radiation for multiple passes through the gain medium; and/or:
2. Take advantage of the Fabry-Perot resonator formed by the uncoated top surface of the semiconductor disk and the highly-reflective Bragg mirror at the bottom of the disk, a technique known as resonant absorption.

Traditionally, standing-wave effects have been considered for the laser field only. There is no need to do so for the pump radiation when highly absorbing barrier layers are present. To take advantage of the standing waves in quantum-well pumping the quantum wells have to be placed at the antinodes of the standing wave pattern. In this way the intensity at the quantum wells is twice the average intensity. The intensity is further enhanced by the internal resonator formed by the Fresnel reflection from the top of the disk and the Bragg reflector on the bottom. Because of the dependence of the light-matter interaction on the light intensity this leads to an enhanced effective gain of the structure.

Due to the small single-pass absorption present for quantum-well pumping, standing waves also exist for the pump radiation field. This gives rise to the possibility of optimizing the resonances of the internal resonator as well as the quantum well spacing for the laser and simultaneously for the pump field. To accomplish this, the device has to be designed so that the antinodes of both the laser radiation and the pump radiation lie at the locations of the quantum wells. To achieve this, the dependence of the electrical field on the angle of incidence as well as on the wavelength is analyzed.

Since the pump wavelength is necessarily shorter than the laser wavelength, the antinodes of the two fields can be brought into alignment by increasing the angle of incidence of the pump radiation. In this way the angle-shifted laser resonance can be used for pumping. However, due to the high index of refraction, a difference between laser and pump wavelength of 30 nm, which is needed to minimize bleaching of the transition, already requires an external angle α of 70°. This requires the use of pump lasers with good beam quality in the plane of incidence.

Unfortunately, the highly divergent, unpolarized and spectrally broad beam of a typical fiber-coupled diode array pump source does not allow for such large pump angles. Therefore, a different resonance has to be used for pumping. Ways to optimize the overlap between quantum well location and antinodes of the standing wave field pattern for the pump and the laser radiation are presented, and the influence of the numerical aperture (NA) of the focusing system on the total absorption of the structure is analyzed. For optimum performance of the device the NA should be as small as possible. Antinodes of the laser field inside the structure with only minor overlap with

the pump radiation field maxima should not be occupied by quantum wells. For low NA systems the surface reflectance could be beneficially increased by dielectric coating, to maximize the overall absorption using impedance matching.

Using absorption-spectra calculated for 8 nm thick $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ quantum wells using kp-theory, the optimum number of wells as a function of the number of pump radiation passes is calculated and experimentally analyzed for 940-nm pump radiation and a laser emission wavelength of 980 nm. Considering the total absorption of the structure, the lasing threshold for one back reflection of the pump radiation (four pump radiation passes) is optimized for 5 quantum wells. Increasing the number of pump radiation passes to 12 the minimum lasing threshold is reached at 3 wells with an absorbed threshold density of only 0.4 kWcm^{-2} .

To verify the theoretical advantages of quantum well pumping experimentally, i.e. the minimisation of the heat load at still reasonably good absorption – the performance of a thin-disk semiconductor laser for quantum-well and barrier pumping under otherwise identical conditions was examined. In a first experiment a comparatively small spot was pumped at low powers with a Ti:Sa-laser, in a second experiment a larger spot was pumped using fiber-coupled diode lasers.

The semiconductor disk used in the Ti:Sa experiments had six 8 nm thick $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ single quantum wells emitting near 980 nm. For barrier pumping the Bragg mirror at the bottom of the laser had a second reflectance peak at 800 nm to reflect the pump radiation back for another pass through the gain medium, thus homogenizing the absorption for barrier-pumping. For quantum-well pumping the angle-shifted laser resonance was used. An external lens-mirror combination reflected the unabsorbed pump radiation back for a second double pass through the gain medium.

The major experimental results were:

1. Although a plot of laser power versus incident power would show slightly higher efficiency for barrier pumping at low powers, a plot of laser power vs. absorbed power shows higher efficiency for quantum-well pumping.
2. The absorption efficiency for quantum-well pumping of a standard sample can be as high as 70 percent with only a single reflection back through the gain medium (two double passes).

The increase in temperature in the gain medium with absorbed pump power is 17 K/W for barrier pumping and 6 K/W for quantum-well pumping. Therefore, the thermal load with barrier pumping is larger by a factor of 3 than with quantum-well pumping. To put this into perspective, if the only contribution to the thermal load were the quantum defect, one would expect a factor of 4.3.

The experiment was repeated with a second sample that had 13 quantum wells and fiber-coupled diode lasers as pump source to determine whether these advantages also

show up at higher power levels. For barrier pumping, the 800-nm radiation from a fiber-coupled diode array was directed directly onto the sample at an angle of incidence of 30° . The Bragg reflector at the bottom was not designed to reflect this wavelength. For quantum-well pumping of that sample it was not possible to use a cavity resonance. To compensate for the low absorption then present, a pump-optics arrangement that was originally designed for Yb:YAG pumping, with 24 single passes of 938-nm pump radiation, was used. The resulting pump spots had diameters of approximately 300 μm .

Again, the power curves for barrier and quantum-well pumping are quite similar at low power. The slopes show more pronounced differences for different values of output coupling which is due to the higher resonator losses apparent for bigger pump spot diameters. The slopes are generally lower than those measured with six quantum wells using the angle shifted laser resonance for pumping. For higher powers, thermally induced roll-over starts much earlier when the laser is barrier pumped, limiting the output power to 1.2 W. By pumping directly into the quantum wells, 1.9 W of output have been achieved, limited only by the available pump power - another indication of the reduced heat generation with quantum-well pumping.

A third experiment was carried out using a structure that is optimized for quantum-well pumping, and is no longer suitable for barrier-pumping. In a first step the length of a cavity containing 6 quantum wells was matched to give the mode spacing needed for the desired difference between pump- and laser-wavelengths. This was done by incorporating an optically inactive layer after the multiple quantum-well active region. Additionally, the Bragg mirror uses only GaAs and AlAs layers, making it thinner than the AlAs/AlGaAs counterpart, increasing the thermal conduction. In this way a pump radiation absorption of 70 % at pump power densities of up to 12 kWcm^{-2} was demonstrated using the Ti:Sa laser to pump the 2nd cavity resonance at an angle of incidence of 70° . The optical to optical efficiency is shown to be 44 % based on the absorbed pump power with output powers up to 800 mW. Using a fiber-coupled diode laser for pumping an output power of 2.4 W is demonstrated. The lasing threshold absorbed pump power density is reduced to 0.6 kWcm^{-2} , which fits nicely to the calculated value of 0.7 kWcm^{-2} .

These results were achieved without special heat spreaders or particularly small pump spots to increase three-dimensional heat flow. Therefore this method can lead the way to true power scalability by simply increasing the pumped area and keeping the pump power density constant. Using the optimization procedures mentioned in this work, the reachable power level of semiconductor disc lasers should reach the 100-W level just by the decreased heating of the active region, allowing to extract much more power from the same pumped area as if pumped using conventional barrier pumping.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Medizinische Anwendungen sowie Anwendungen in der Projektions-Technik verlangen nach immer kompakteren und preisgünstigen Laserquellen mit Ausgangsleistung im Bereich mehrerer zehn Watt, bei gleichzeitig hoher Strahlqualität. Ein Halbleiter stellt in vieler Hinsicht ein ideales Lasermaterial dar. Er lässt sich elektrisch und optisch pumpen und er besitzt eine sehr hohe Quanteneffizienz. Als laseraktives Medium werden typischerweise ein oder mehrere Quantenfilme verwendet. Die Laserwellenlänge hängt somit nicht von diskreten Linien atomarer Übergänge, sondern von Aufbau und Dicke der Quantenfilme ab. Sie ist daher in gewissen Grenzen frei wählbar. Nachteilig ist jedoch, dass die Strahlqualität herkömmlicher, elektrisch gepumpter Kantenemitter bei großen Ausgangsleistungen schlecht ist. Laser mit einem beugungsbegrenzten Ausgangsstrahl besitzen typischerweise Ausgangsleistungen von unter 1 Watt. Hinzu kommt der Astigmatismus des Laserstrahls, der durch die Unterschiede in der lateralen bzw. vertikalen Ausdehnung der aktiven Flächen entsteht, sowie die starke Divergenz, die durch die kleine Dimension der aktiven Fläche in mindestens einer Ebene entsteht.

Die Probleme des Astigmatismus und der großen Divergenz lassen sich durch den Übergang zu vertikal emittierenden Lasern beheben (VCSEL, „vertical-cavity surface-emitting laser“). Hier liegt die optische Achse des Resonators senkrecht zur Ebene der Quantenfilme, der Resonator wird durch zwei epitaktisch gewachsene Bragg-Spiegel vor und hinter dem aktiven Bereich der Quantenfilme gebildet. Probleme mit der homogenen Stromführung durch die aktive Fläche und die Kürze des Resonators (meist nur eine halbe Laserwellenlänge) beschränken die Grundmode-Leistung auf einige Milliwatt. Dies führte zur Entwicklung des vertikal emittierenden Halbleiterlasers mit externem Resonator (VECSEL, vertical-external-cavity surface-emitting laser) durch Kuznetsov et al [1, 2]. In diesem Design wird der vordere Bragg-Spiegel durch einen externen Resonatorspiegel ersetzt. Die Inversion wird durch optisches oder elektrisches Pumpen erzeugt. Um beim optischen Pumpen eine ausreichende Absorption der Pumpstrahlung sicherzustellen, wird die Pumpwellenlänge derart gewählt, dass auch die Barrieren, welche die Quantenfilme umgeben, angeregt werden. Die erzeugten Ladungsträger gelangen durch Diffusion in die Quantenfilme. Auf diese Weise kann trotz der geringen Dicke der Quantenfilme eine vollständige Absorption der Pumpstrahlung im einfachen Durchgang erreicht werden, da hauptsächlich die wesentlich dickeren Barrieren zur Absorption beitragen. Im Festkörperlaser-Bereich ist dieser Ansatz schon länger bekannt und wird als Kodotierung bzw. „Sensitizer“ bezeichnet. In dieser Arbeit wird diese Art der optischen Anregung als Absorber-

Pumpen bezeichnet. Mit Hilfe dieses Ansatzes wurden auf Kupferwärmesenken Laserleistungen bis 8 Watt demonstriert [3]. Durch den Einsatz von Diamant-Wärmespreizern lassen sich so sogar Leistungen bis 30 Watt realisieren [4].

Aufgrund der geringen Verstärkung und damit verbunden dem niedrigen optimalen Auskoppelgrad kann der Halbleiter-Scheibenlaser auch sehr gut zur resonatorinternen Frequenzverdoppelung eingesetzt werden [5], was den mit diesem Konzept realisierbaren Wellenlängenbereich deutlich vergrößert. Neben den Lasern mit Wellenlängen um 1 μm wurden bisher Laser mit Wellenlängen im UV (391 nm) [6], im sichtbaren Bereich (650 nm) [7], im nahen infrarot Bereich (850 nm) [8] sowie im infraroten Wellenlängenbereich (1.5 μm bis 2.4 μm) [9, 10, 11, 12] realisiert. Einen guten Überblick hierüber gibt [13]. Durch die Frequenzverdopplung sind auch Wellenlängen zugänglich, die nicht oder nur schlecht direkt erzeugt werden können [14].

Leistungsbegrenzend für dieses Design ist nicht die Schädigung der Struktur durch zu große Leistungsdichten der Laserstrahlung (COD), sondern die Temperatur der aktiven Zone und dem damit verbundenen Verlust an Verstärkung. Eine zu große Erwärmung führt zum „Überrollen“ der Leistungskennlinie und limitiert damit die maximale Pumpleistungsdichte. Da der Optimierung des Wärmewiderstandes des Schichtpaketes Grenzen gesetzt sind, werden daher in der Regel Pumpfleckdurchmesser in der Größenordnung weniger hundert Mikrometer verwendet. Die Wärme kann dann zu einem großen Anteil durch dreidimensionale (3D) Wärmeleitung abgeführt werden. Durch den Einsatz so genannter Wärmespreizer, meist Diamant- [15] oder SiC-Scheiben [16, 17], die direkt auf die aktive Zone gebondet werden, kann die Pumpfleckgröße auf etwa 1 mm angehoben werden [18, 19]. Da jedoch auch hier die effektivere 3D-Wärmeleitung zur Kühlung auftritt, sind diese Verfahren nicht über die Fläche leistungsskalierbar.

Um eine Flächenskalierbarkeit zu erreichen, muss sichergestellt sein, dass die Temperatur der aktiven Zone auch bei reiner eindimensionaler (1D) Wärmeleitung unterhalb eines kritischen Wertes bleibt. Ist die Wärmeabfuhr aus der aktiven Zone optimiert, bleibt einzig die Möglichkeit die erzeugte Wärme zu reduzieren. Neben der Optimierung der Quanteneffizienz der Proben (verbesserte Qualität des Materials) bietet sich die Möglichkeit den Quantendefekt zu minimieren. Hierzu kann man zum einen die Barrierenhöhe reduzieren, was jedoch nicht mit allen Halbleiter-Materialsystemen gleichermaßen möglich ist, oder zum anderen die Quantenfilme direkt anregen [20], was im Folgenden als Quantenfilm-Pumpen bezeichnet werden soll. Da die zweite Methode prinzipiell für alle Materialsysteme möglich ist, soll in dieser Arbeit untersucht werden, ob die freie Leistungs-Skalierbarkeit über die Fläche durch direktes Pumpen in die Quantenfilme erreicht werden kann und ob sich der damit verbundene erhöhte Aufwand zur Sicherstellung einer genügenden Absorption der Pumpstrahlung lohnt.

1.2 Struktur der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 2 auf die grundlegenden Eigenschaften eines Absorbergepumpten Halbleiter-Scheibenlasers eingegangen, wie es Stand der Technik ist. Da die Temperatur des Bauteils die eigentliche Begrenzung für die mögliche Leistungsskalierung darstellt, werden in Kapitel 3 die Möglichkeiten erörtert, die Temperatur der aktiven Zone zu reduzieren. Da die meist angewandte Methode der Wärmespreizung mit Hilfe von Diamant-, Saphir- oder ähnlichen thermisch gut leitfähigen Wärmesenken nicht flächenskalierbar ist, wird in dieser Arbeit untersucht, inwieweit sich die Temperatur der aktiven Zone durch eine Reduzierung des Wärmeeintrags verkleinern lässt, so dass auch bei reinem 1D Wärmetransport ein effizienter Laserbetrieb gesichert ist. Um dies zu realisieren, bietet es sich an, den Quantendefekt zwischen Pump- und Laserphoton zu minimieren, die Quantenfilme also direkt zu pumpen und nicht den sonst üblichen Weg über spezielle Absorberschichten zu gehen. Daher wird in Kapitel 4 untersucht, unter welchen Bedingungen Quantenfilm-Pumpen möglich ist, und wie der optimale Aufbau des Halbleiter-Scheibenlasers aussehen sollte. Kapitel 5 zeigt dann den experimentellen Vergleich zwischen konventionellem Absorber- und Quantenfilm-Pumpen anhand einiger ausgewählter Ergebnisse. Im Speziellen werden die Ergebnisse zum Vergleich der realisierbaren Absorption, zum Vergleich der Erwärmung des Bauteils sowie zur Leistungsskalierung vorgestellt. Im Anschluss zeigt Kapitel 6 die Ergebnisse, welche mit einer für das Quantenfilm-Pumpen optimierten Probe erreicht wurden. Die vorgestellten Ergebnisse werden anschließend in Kapitel 7 bewertet. Kapitel 8 beinhaltet die Diskussion der Ergebnisse.

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

Gorriz, 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-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

Grünwald, 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

Griebsch, 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

Laserschweißignung 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

Plaß, 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 Molybdän
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 Zerspansung
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 magnetofluidynamische 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 Lasergasentladungen

2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität

2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik

2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern

2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren

2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-811-9

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 Karoseriebau

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 Weichlötens 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 Laserpräzisionsabtrags 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

Schinz, 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 Hochleistungsdiodelnlasern
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. 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 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 Nahteig-enschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

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

Mikhail Larionov

Kontakterung 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 Breitting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

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

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

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

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

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

Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

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

Christian Stolzenburg

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

Svent-Simon Beyertt

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