

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des



Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie

Herbert Utz Verlag



Georg Stöppler

**Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im
Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive
Chirurgie**

Herbert Utz Verlag · München 2015

Laser in der Materialbearbeitung
Band 77

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7113-7 Version: 1 vom 18.03.2015
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4437-7
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

G. Stöppler
Untersuchung eines OPOs im mittleren
Infrarot im Hinblick auf Anwendungen
für minimalinvasive Chirurgie

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. 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.

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie

von Dr.-Ing. Georg Stöppler
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Alois Herkommer

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., 2014

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 2015

ISBN 978-3-8316-4437-7

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Symbolverzeichnis	7
Kurzfassung der Arbeit	13
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Motivation	19
1.2 Gliederung der Arbeit	24
2 Theoretische Grundlagen	27
2.1 Festkörperlaser	27
2.1.1 Thulium ³⁺ -Laser	28
2.1.2 Holmium ³⁺ -Laser	30
2.2 Nichtlineare Wellenlängenkonversion	33
2.2.1 Der optisch parametrische Oszillator	33
2.2.2 Phasenanpassung	36
2.2.3 Resonatordesign für OPOs	43
3 OPOs im mittleren Infrarot	49
3.1 CSP-OPO zur direkten Frequenzkonversion, von Strahlung bei $\lambda = 1 \mu\text{m}$	49
3.1.1 Aufbau des Experiments	50
3.1.2 Konversionsresultate mit CSP	53
3.1.3 Fazit zur direkten Frequenzkonversion mit einem CSP-OPO . . .	55
3.2 ZGP-OPO zur indirekten Frequenzkonversion mit Tandem-OPO bei $\lambda =$	
$2 \mu\text{m}$	56
3.2.1 Aufbau des Experiments	57
3.2.2 Resultate des indirekt gepumpten ZGP-RISTRA-OPOs	60
3.2.2.1 Nicht kollineare Wellenlängenabstimmung	64
3.2.3 Fazit zur indirekten Frequenzkonversion mit einem ZGP-OPO . .	65

3.3	ZGP-OPO zur direkten Frequenzkonversion, gepumpt bei $\lambda = 2 \mu\text{m}$. . .	67
3.3.1	Aufbau des Experiments	68
3.3.2	Resultate des direkt gepumpten ZGP-RISTRA-OPOs	70
3.3.2.1	Gaußförmiges Pumpprofil	70
3.3.2.2	Top-Hat Pumpprofil	73
3.3.2.3	Einfluss der nicht kollinearen Phasenanpassung	76
3.3.2.4	Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Strahlung des OPOs	77
3.3.3	Fazit zum direkt bei $\lambda = 2 \mu\text{m}$ gepumpten ZGP-OPO	80
3.4	OP-GaAs-OPO zur direkten Frequenzkonversion, gepumpt bei $\lambda = 2 \mu\text{m}$	81
3.4.1	Aufbau von Pumplaser und OPO	81
3.4.2	Ergebnisse und Auswertung	84
3.4.3	Skalierung der Pulsenergie des Tm^{3+} :YAG-Lasers	87
3.4.4	Fazit zur direkten Frequenzkonversion mit einem OP-GaAs-OPO	90
4	Zusammenfassung	93
A	Kristalldaten	99
A.1	Cadmium-Silizium-Phosphid (CdSiP_2 , CSP)	99
A.2	Zink-Germanium-Phosphid (ZnGeP_2 , ZGP)	101
A.3	Gallium-Arsenid (GaAs)	102
B	Realisierung der RISTRA-Kavität	103
C	Nicht kollineare Phasenanpassung	105
D	Alternative Pumpquelle für Ho^{3+}-dotierte Lasermedien	107
D.1	Überblick der Scheibenlaser bei $\lambda \approx 2 \mu\text{m}$	108
D.2	Scheibenlasermaterial aus Fluorid	109
D.3	Ergebnisse mit Tm^{3+} :LLF	111
D.3.1	Auswahl der Laserlinie mit einem Etalon	117
D.4	Fazit zum neuen Scheibenlasermaterial Tm^{3+} :LLF	119
	Literaturverzeichnis	121

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	[m]	Aperturradius
c_o	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
d_{14}, d_{36}	[m/V]	Nichtlinearer optischer Koeffizient
d_{eff}	[m/V]	Effektiver nichtlinearer Koeffizient
d_{Pump}	[m]	Durchmesser des Pumpstrahls
d_{QPM}	[m/V]	Effektiver nichtlinearer optischer Koeffizient bei QPM
dn_e/dT	[1/K]	Thermooptischer Koeffizient des außerordentlichen Strahls
dn_o/dT	[1/K]	Thermooptischer Koeffizient des ordentlichen Strahls
ΔE	[1/m]	Differenz zwischen zwei Energieniveaus
E_g	[eV]	Bandlückenenergie
E_{Ph}	[1/m]	Phononenenergie
E_p	[J]	Pulsenergie
f'	[m]	Brennweite einer Linse
f_{Rep}	[Hz]	Repetitionsrate
h	[Js]	Planck-Konstante
I_{Pump}	[W/m ²]	Pumpintensität
J_{Sat}	[J/m ²]	Sättigungsfluenz
J_Z	[J/m ²]	Optische Zerstörschwelle
Δk	[1/m]	Phasenfehlانpassung beim parametrischen Konversionsprozess
\vec{k}_i	[1/m]	Wellenvektor der Idlerstrahlung
\vec{k}_p	[1/m]	Wellenvektor der Pumpstrahlung
\vec{k}_s	[1/m]	Wellenvektor der Signalstrahlung
$L_{Kohärenz}$	[m]	Kohärenzlänge in nicht phasenangepassten Materialien
$L_{Kristall}$	[m]	Kristalllänge
$L_{Resonator}$	[m]	Einfache Resonatorlänge
$m_{Umlenkung}$	[–]	Anzahl Umlenkungen durch die Scheibe
m_{QPM}	[–]	Ordnung der Kristallperiode bei QPM

Symbol	Einheit	Bedeutung
M^2	[-]	Beugungsmaßzahl
M_x^2	[-]	Beugungsmaßzahl in Richtung der x -Achse, parallel zur Tischebene
M_y^2	[-]	Beugungsmaßzahl in Richtung der y -Achse, senkrecht zur Tischebene
n	[-]	Brechungsindex
n_e	[-]	Außerordentlicher Brechungsindex
n_i	[-]	Brechungsindex bei der Idlerwellenlänge
n_o	[-]	Ordentlicher Brechungsindex
n_p	[-]	Brechungsindex bei der Pumpwellenlänge
n_s	[-]	Brechungsindex bei der Signalwellenlänge
N_{Dot}	[1/m ³]	Dotierungsbedingte räumliche Ionenkonzentration
N_F	[-]	Fresnelzahl
N_m	[1/m ³]	Ionendichte im Energieniveau m
P_{avg}	[W]	Mittlere Laserleistung eines Lasers
P_{Mittel}	[W]	Mittlere Pumpleistung eines Lasers
P_{Pump}	[W]	Pumpleistung eines Lasers
P_{Rest}	[W]	Nicht absorbierte Pumpleistung
rH	[-]	Relative Luftfeuchte
$R_{HR-Scheibe}$	[-]	Reflektivität der Rückseite eines Scheibenlasermediums
R_{OC}	[-]	Reflektivität des Auskoppelspiegels
R_P	[-]	Reflektivität des Parabolspiegels eines Scheibenlasers
R_{Pr}	[-]	Reflektivität der Prismen eines Scheibenlasers
$R_{Scheibe}$	[m]	Krümmungsradius der Scheibe
$R_{Spiegel}$	[m]	Krümmungsradius eines Spiegels
T	[K]	Temperatur
T_{HT}	[-]	Transmission der Vorderseite eines Scheibenlasermediums
T_p	[s]	Zeitabschnitt in dem das laseraktive Medium gepumpt wird
$T_{Scheibe}$	[-]	Transmission durch Scheibenlasermedium
w_{Mode}	[m]	Transversaler Modenradius
w_p	[m]	Radius des Pumpstrahls
W_{Kr}	[1/s]	Übergangsrate durch Kreuzrelaxation
W_L	[1/s]	Übergangsrate des Laserprozesses
W_P	[1/s]	Pumprate

Symbol	Einheit	Bedeutung
W_{Reabs}	[1/s]	Übergangsrate durch Reabsorption
W_{Up}	[1/s]	Übergangsrate durch Upconversion
α	[°]	Winkel im Kristall zwischen den Wellenvektoren des Pump- und des Signalstrahls
α_{abs}	[1/m]	Absorptionskoeffizient
β	[°]	Winkel im Kristall zwischen den Wellenvektoren des Pump- und des Idlerstrahls
Γ_{OPA}	[1/m]	Verstärkungskoeffizient der parametrischen Verstärkung
γ	[°]	Winkel im Kristall zwischen den Wellenvektoren des Signal- und des Idlerstrahls
δ	[°]	Winkel außerhalb des Kristalls zwischen den Wellenvektoren des Signal- und des Idlerstrahls
ϵ_0	[As/Vm]	Elektrische Feldkonstante
η_{diff}	[-]	Differentieller Wirkungsgrad
η_{opt}	[-]	Optischer Wirkungsgrad
η_p	[-]	Pumpeffizienz im gepulsten Betrieb
θ_{CSP}	[°]	Kristallschnittwinkel von CSP
θ_{ZGP}	[°]	Kristallschnittwinkel von ZGP
θ_{PM}	[°]	Kollinearer Phasenangepassungswinkel zwischen der c -Achse und dem Wellenvektor des Pumpstrahls
λ	[m]	Wellenlänge
λ_D	[m]	Degenereszenzwellenlänge
λ_i	[m]	Idlerwellenlänge
λ_L	[m]	Laserwellenlänge
λ_{OPA}	[m]	Laserwellenlänge des optisch parametrischen Verstärkers
λ_p	[m]	Pumpwellenlänge
λ_s	[m]	Signalwellenlänge
Λ	[-]	Resonatorverluste
$\Lambda_{Periode}$	[m]	Domänenperiode
σ_{abs}	[m ²]	Wirkungsquerschnitt für Absorption
σ_{em}	[m ²]	Wirkungsquerschnitt für Emission
τ_f	[s]	Fluoreszenzlebensdauer (Abfall auf 1/e)
τ_{FWHM}	[s]	Pulsdauer bei voller Halbwertsbreite
τ_i	[s]	Fluoreszenzlebensdauer der angeregten Ionen in Niveau i

Symbol	Einheit	Bedeutung
φ	[rad]	Azimutwinkel zwischen einer a -Achse und der Projektion auf die von den a -Achsen aufgespannte Fläche
ω_i	[1/s]	Kreisfrequenz der Idlerstrahlung
ω_p	[1/s]	Kreisfrequenz der Pumpstrahlung
ω_s	[1/s]	Kreisfrequenz der Signalstrahlung

Abkürzungen

AR	Antireflektierend
BaF ₂	Bariumfluorid
CaF ₂	Calciumfluorid
CSP	Cadmium-Siliziumphosphid (CdSiP ₂)
ESA	Absorption aus einem angeregten Zustand (engl.: excited state absorption)
FEL	Freie-Elektronen Laser
FWHM	Volle Halbwertsbreite (engl.: full width at half maximum)
HR	Hochreflektierende Beschichtung
KTH	Königlich Technische Hochschule, Stockholm
LLF	Lithium-Lutetium-Fluorid (LiLuF ₄)
MBI	Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, Berlin
MIRSURG	Mid-infrared solid-state laser systems for minimally invasive surgery
MOPA	Laser mit Verstärkungsstufe (engl.: master oscillator power amplifier)
OP-GaAs	Periodisch orientiert gewachsenes Galliumarsenid (engl.: orientation-patterned gallium arsenide)
OPA	Optisch-parametrischer Verstärker (engl.: optical parametric amplifier)
OPG	Optisch-parametrischer Generator
OPO	Optisch-parametrischer Oszillator
PM	Phasenanpassung (engl.: phase-matching)
PPKTP	Periodisch gepoltes Kaliumtitanylphosphat (KTiOPO ₄)
PPLN	Periodisch gepoltes Lithiumniobat
PPRKTp	Periodisch gepoltes Kaliumtitanylphosphat mit Rubidium-Dotierung (RbKTiOPO ₄)

QPM	Quasi-Phasenanpassung (engl.: quasi-phase-matching)
RISTRA	Einfach resonante Ringkavität mit 90° Bildrotation (engl.: rotated image singly-resonant twisted rectangle cavity)
RMS	Effektivwert (engl.: root mean square)
UMCU	Medizinisches Universitätszentrum Utrecht
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat ($Y_2Al_3O_{12}$)
YAP	Yttrium-Aluminium-Perowskit ($YAlO_3$)
YLF	Yttrium-Lithium-Fluorid ($LiYF_4$)
KLu(WO_4) ₂	Kalium-Lutetium-Wolframat
KY(WO_4) ₂	Kalium-Yttrium-Wolframat
ZGP	Zink-Germanium-Phosphid ($ZnGeP_2$)
ZPA	Zwei-Photonen Absorption