

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des  IFSW

Katrin Sarah Wentsch

**Analyse Ytterbium-dotierter Materialien
für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten
Scheibenlasersystemen**



Herbert Utz Verlag 

Katrin Wentsch

**Analyse Ytterbium-dotierter Materialien
für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten
Scheibenlasersystemen**

Herbert Utz Verlag · München 2016

Laser in der Materialbearbeitung
Band 82

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7235-6 Version: 1 vom 17.06.2016
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4578-7
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

K. S. Wentsch
Analyse Ytterbium-dotierter
Materialien für den Einsatz in
ultrakurz-gepulsten
Scheibenlasersystemen

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.

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen

von Dr.-Ing. Katrin Sarah Wentsch
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.-Ing. Manfred Berroth

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., 2016

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 2016

ISBN 978-3-8316-4578-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

Kurzfassung der Arbeit

Ultrakurzpuls-Laserstrahlquellen mit hohen Spitzen- und Ausgangsleistungen sind derzeit Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Diese Lasersysteme werden zum Beispiel in der Materialbearbeitung, in der Medizin und im wissenschaftlichen Bereich eingesetzt. Das Konzept des modengekoppelten Scheibenlasers ist dazu prädestiniert, die Anforderungen an hohe Ausgangs- und Pulsspitzenleistungen direkt aus einem Hochleistungsoszillator ohne zusätzliche Verstärkerstufen zu ermöglichen.

Durch die Scheibengeometrie des laseraktiven Mediums, typischerweise mit einer Dicke im Bereich von 100 bis 300 μm und einem Durchmesser von 6 bis 20 mm, wird eine effektive Wärmeabfuhr erreicht, um gute Strahlqualitäten bei hohen Ausgangsleistungen zu erzielen. Durch das dünne laseraktive Medium sind bei hohen Spitzenleistungen nichtlineare Effekte vernachlässigbar. Die Kombination aus Scheibenlaser und sättigbarem Halbleiterspiegel (SESAM) bildet ein System, das über die Flächen der Moden auf der Scheibe und dem SESAM leistungsskalierbar ist. Es ermöglicht hohe Ausgangsleistungen bei kurzer Pulsdauer.

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wurde das Potenzial (neuartiger) Ytterbium-dotierter Laserkristalle für den Einsatz in passiv modengekoppelten Scheibenlaseroszillatoren untersucht. Folgende Laserkristalle wurden nach Materialeigenschaften wie z. B. der thermischen Wärmeleitfähigkeit und der Emissionsbandbreite, die hohe Ausgangsleistungen und ultrakurze Pulsdauern im Bereich von Pikosekunden (10^{-12}) und Femtosekunden (10^{-15}) ermöglichen, selektiert und eingehender analysiert: Yb:Sc₂SiO₅, Yb:CaGdAlO₄, Yb:CaF₂ und Yb:Lu₂O₃.

Die Eignung dieser Kristalle im Dauerstrichbetrieb wurde durch maximale Ausgangsleistungen von 280 W für Yb:Sc₂SiO₅, 152 W für Yb:CaGdAlO₄, 250 W für Yb:CaF₂ und 670 W für Yb:Lu₂O₃ gezeigt. In passiv modengekoppelten Scheibenlaseroszillatoren wurde mit Yb:Sc₂SiO₅ eine mittlere Ausgangsleistung von 27,8 W bei einer Pulsdauer von 298 fs demonstriert. Mit Yb:CaGdAlO₄ wurden bei 300 fs 28 W bzw. bei einer kürzeren Pulsdauer von 197 fs 20 W demonstriert.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Verzeichnis der Symbole | 9 |
| Abkürzungen | 13 |
| Extended Abstract | 15 |
| 1 Einleitung | 18 |
| 1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit | 18 |
| 1.2 Strukturierung der Arbeit | 19 |
| 2 Ytterbium-dotierte Kristalle für den Einsatz im Scheibenlaser | 21 |
| 2.1 Eigenschaften des Yb^{3+} -Ions | 21 |
| 2.2 Anforderungen an das laseraktive Material | 24 |
| 2.3 Auswahl Yb^{3+} -dotierter Kristalle und Vergleich zu $\text{Yb}:\text{YAG}$ | 25 |
| 2.4 Literaturübersicht ausgewählter Yb^{3+} -dotierter Kristalle | 33 |
| 3 Grundlagen der passiven Modenkopplung | 37 |
| 3.1 Theoretische Beschreibung der Pulsdynamik | 37 |
| 3.2 Sättigbarer Halbleiterspiegel (SESAM) | 38 |
| 3.2.1 Aufbau eines SESAM | 39 |
| 3.2.2 Parameter zur Wahl eines geeigneten SESAM | 40 |
| 3.3 Soliton-Modenkopplung | 43 |
| 3.4 Dispersionsmanagement und Selbstphasenmodulation | 44 |
| 4 Berechnungen und Analysen zur Resonatorauslegung | 47 |
| 4.1 Resonatorauslegung | 47 |
| 4.1.1 Dauerstrich-Laserbetrieb | 47 |
| 4.1.2 Passiv modengekoppelter Scheibenlaserbetrieb | 51 |
| 4.2 Berechnung der Temperaturen an den Oberflächen der Kristalle | 56 |
| 4.3 Berechnung der Phasenfrontdeformation | 63 |
| 5 Der $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{SiO}_5$ Scheibenlaser | 69 |
| 5.1 Materialeigenschaften | 69 |
| 5.2 Übersicht und Kontaktierung des Versuchsmaterials | 70 |
| 5.3 Experimentelle Untersuchungen | 74 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3.1 | Fluoreszenz- und Laserbetrieb..... | 74 |
| 5.3.2 | Wellenlängendurchstimmbarkeit..... | 77 |
| 5.3.3 | Dauerstrich-Laserbetrieb | 79 |
| 5.3.4 | Passiv modengekoppelter Yb:SSO Scheibenlaseroszillator..... | 84 |
| 6 | Der Yb:CaGdAlO ₄ Scheibenlaser | 88 |
| 6.1 | Materialeigenschaften..... | 88 |
| 6.2 | Übersicht und Kontaktierung des Versuchsmaterials..... | 89 |
| 6.3 | Experimentelle Untersuchungen..... | 92 |
| 6.3.1 | Fluoreszenz- und Laserbetrieb..... | 92 |
| 6.3.2 | Wellenlängendurchstimmbarkeit..... | 94 |
| 6.3.3 | Dauerstrich-Laserbetrieb | 95 |
| 6.3.4 | Passiv modengekoppelter Yb: CALGO Scheibenlaseroszillator | 98 |
| 7 | Der Yb:CaF ₂ Scheibenlaser | 102 |
| 7.1 | Materialeigenschaften..... | 102 |
| 7.2 | Übersicht und Kontaktierung des Versuchsmaterials..... | 104 |
| 7.3 | Experimentelle Untersuchungen..... | 108 |
| 7.3.1 | Fluoreszenz- und Laserbetrieb..... | 108 |
| 7.3.2 | Wellenlängendurchstimmbarkeit..... | 109 |
| 7.3.3 | Dauerstrich-Laserbetrieb | 110 |
| 8 | Der Yb:Lu ₂ O ₃ Scheibenlaser | 116 |
| 8.1 | Materialeigenschaften..... | 116 |
| 8.2 | Übersicht und Kontaktierung des Versuchsmaterials..... | 118 |
| 8.3 | Experimentelle Untersuchungen..... | 120 |
| 8.3.1 | Fluoreszenz- und Laserbetrieb..... | 120 |
| 8.3.2 | Dauerstrich-Laserbetrieb | 123 |
| 9 | Das Potenzial von Yb:YAl ₃ (BO ₃) ₄ und epitaktisch gewachsenes Yb:KY(WO ₄) ₂ / Yb:KLu(WO ₄) ₂ | 126 |
| 9.1 | Materialeigenschaften von Yb:YAl ₃ (BO ₃) ₄ | 126 |
| 9.2 | Materialeigenschaften von Yb:KY(WO ₄) ₂ und Yb:KLu(WO ₄) ₂ | 127 |
| 10 | Zusammenfassung und Ausblick | 130 |
| 11 | Literatur- und Quellenverzeichnis | 133 |

Verzeichnis der Symbole

| Symbol | Einheit | Bezeichnung |
|--------------------------|-----------------------|---|
| A | V/m | elektrische Feldamplitude |
| A_{eff} | m^2 | effektive Querschnittsfläche |
| A_0 | V/m | Spitzenamplitude des elektrischen Feldes |
| c | m/s | Vakuumlichtgeschwindigkeit ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s) |
| D | fs^2 | Gesamtdispersion |
| dn/dT | K^{-1} | Änderung des Brechungsindex mit der Temperatur |
| d_{Kristall} | m | Kristalldicke |
| d_{Scheibe} | m | Dicke des Scheibenlaserkristalls |
| d_{Pump} | m | Pumpfleckdurchmesser |
| $E_{\text{Sat,L}}$ | J | Sättigungsenergie des Lasermediums |
| $E_{\text{Sat,S}}$ | J | Sättigungsenergie des SESAM |
| E_q | J | Sättigungsenergie |
| F_2 | J/m^2 | Koeffizient der induzierten nichtlinearen Absorption |
| FOM_{th} | W/m^2 | Qualitätskennzahl für die thermo-optischen Eigenschaften eines laseraktiven Mediums |
| FOM_{TD} | W/m^3 | Qualitätskennzahl für die Eignung eines laseraktiven Mediums für den Scheibenlaserbetrieb |
| F_P | J/m^2 | Fluenz des einfallenden Laserpulses |
| F_{Sat} | J/m^2 | Sättigungsfluenz |
| G | 1 | Gesamtverstärkung |
| g_0 | m^{-1} | Verstärkungskoeffizient |
| $g(t)$ | 1 | Verstärkung pro Resonatorumlauf |
| h | J·s | Planck'sches Wirkungsquantum ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s) |
| I | W/m^2 | Leistungsdichte |
| I_P | W/m^2 | (einfallende) Pumpleistungsdichte |
| $I_{P,\text{min}}$ | W/m^2 | Minimale Pumpleistungsdichte |
| $I_{P,\text{Sat}}$ | W/m^2 | Pumpsättigungsintensität |
| I_{Sat} | W/m^2 | Sättigungsintensität eines SESAM |
| K | 1 | konstanter Faktor (0,28) |

| | | |
|---|------------------|---|
| $l_{\text{abs,eff}}$ | m | effektive Absorptionslänge |
| l_{ges} | l | Gesamtverluste des Resonators |
| L_{Kav} | m | Länge der Kavität |
| m | 1 | Anzahl der Durchgänge durch das Lasermedium bzw. den Absorber pro Resonatorumlauf |
| M | 1 | Doppeldurchgänge durch die Scheibe pro Resonatorumlauf |
| M^2 | 1 | Beugungsmaßzahl |
| M_{p} | 1 | Anzahl an Pumplichtdurchgängen durch die Scheibe |
| $M_{\text{p,min}}$ | 1 | Minimale Anzahl an Pumplichtdurchgängen durch die Scheibe |
| n | 1 | Brechungsindex |
| n_2 | 1 | nichtlinearer Brechungsindex |
| N_{Dot} | cm^{-3} | Dotierungskonzentration |
| $N_{\text{m}}, N_{\text{p}}$ und N_{g} | 1 | optische Hauptachsen der Wolframate |
| P_{abs} | W | absorbierte Pumpleistung |
| P_{Diode} | W | Pumpleistung |
| P_{int} | W | resonatorinterne Leistung |
| P_{out} | W | Laserausgangsleistung |
| P_{Sat} | W | Sättigungsleistung des SESAM |
| P_{th} | W | Laserschwellenleistung |
| q_0 | 1 | ungesättigte Verluste des SESAM |
| $q(t,T)$ | 1 | intensitätsabhängige Verluste |
| R_{Lin} | 1 | Reflektivität eines ungesättigten SESAM |
| R_{ns} | 1 | Reflektivität eines vollständig gesättigten SESAM |
| $R_{x,y}$ | m | Krümmungsradien der Laserscheibe in x- bzw. y-Richtung |
| S | 1 | Sättigungsparameter eines SESAM |
| T | K | Temperatur |
| T_0 | K | Referenztemperatur |
| T_{oc} | 1 | Transmissionsgrad des Auskoppelspiegels |
| T_{R} | 1/s | Resonatorumlaufzeit |
| \ddot{U}_{eff} | 1 | Überhöhung der effektiven über der einfallenden Leistungsdichte |

| | | |
|-----------------------|----------|---|
| w | m | Gaußscher Strahlradius |
| z_0 | m | Position der Scheibe in z-Richtung |
| α_0 | m^{-1} | Absorptionskoeffizient |
| α_{th} | K^{-1} | linearer Wärmeausdehnungskoeffizient |
| β_2 | s^2 | Dispersionskoeffizient |
| $\beta(z)$ | 1 | Zweiphotonenabsorptionskonstante (TPA) |
| β_{min} | 1 | Transparenzbesetzungsdichte des oberen Multipletts |
| Δn_s | 1 | Brechungsindexänderung |
| $\Delta\lambda_{abs}$ | m | spektrale Breite der Absorptionsbande (FWHM) |
| $\Delta\lambda_{emi}$ | m | spektrale Emissionsbreite (FWHM) |
| ΔL_{opt} | m | thermisch induzierte optische Weglängendifferenz |
| ΔR | 1 | Modulationstiefe |
| ΔR_{ns} | 1 | nichtsättigbare Verluste |
| η_{th} | 1 | Quantendefekt ($=1-\lambda_{pump}/\lambda_{laser}$) |
| η_{abs} | 1 | Absorptionswirkungsgrad |
| η_{opt} | 1 | optischer Wirkungsgrad |
| η_{Slope} | 1 | differenzieller Wirkungsgrad |
| ν | 1/s | Frequenz |
| κ_0 | W/(m·K) | thermische Wärmeleitfähigkeit |
| $\kappa_{undotiert}$ | W/(m·K) | Wärmeleitfähigkeit des undotierten Materials |
| κ_{th-opt} | K^{-1} | thermo-optischer Koeffizient |
| λ_f | m | mittlere Fluoreszenzwellenlänge |
| λ_{pump} | m | Pumpwellenlänge |
| λ_{laser} | m | Emissionswellenlänge |
| Ω_g | m | Verstärkungsbandbreite |
| Ω_f | m | Transmissionsbandbreite optischer resonatorinterner Bauelemente |
| π | 1 | Kreiszahl mit dem konstanten Wert 3,1415... |
| $\sigma_{abs,pump}$ | m^2 | effektiver Absorptionsquerschnitt bei der Pumpwellenlänge |
| $\sigma_{abs,laser}$ | m^2 | effektiver Absorptionsquerschnitt bei der Laserwellenlänge |
| $\sigma_{emi,pump}$ | m^2 | effektiver Emissionsquerschnitt bei der Pumpwellenlänge |
| $\sigma_{emi,laser}$ | m^2 | effektiver Emissionsquerschnitt bei der Laserwellenlänge |
| τ_{FWHM} | s | Pulsdauer (FWHM) |

| | | |
|----------------------------|------------------|---|
| τ_{Fluo} | s | Fluoreszenzlebensdauer |
| τ | s | Erholzeit des Absorbers |
| τ_p | s | Pulsdauer |
| τ_{Sech} | s | Pulsdauer eines sech ² -förmigen Pulses |
| Ψ | l | nichtlineare Phasenverschiebung pro Resonatorumlauf |
| ω_{Kristall} | cm | Radius des Pumpflecks auf dem Scheibenlaserkristall |
| ω_{SESAM} | cm | Radius des Modes auf dem SESAM |
| γ | rad/W | Selbstphasenmodulationskoeffizient |
| $\gamma_{\text{Atm.}}$ | rad/W | Selbstphasenmodulationskoeffizient der Umgebungsatmosphäre |
| γ_{Helium} | rad/W | Selbstphasenmodulationskoeffizient der Umgebungsatmosphäre Helium |
| γ_{Luf} | rad/W | Selbstphasenmodulationskoeffizient der Umgebungsatmosphäre Luft |
| γ_{Scheibe} | rad/W | Selbstphasenmodulationskoeffizient der Scheibe |
| ϕ | 1/m ³ | Photonendichte |

Abkürzungen

| | |
|---|--|
| AAs | Aluminium-Arsenid |
| AR | antireflektierend |
| CVD | Chemical Vapour Deposition |
| ESA | Excited State Absorption |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| GaAs | Gallium-Arsenid |
| GD | Group Delay |
| GDD | Group Delay Dispersion |
| GTI | Gires-Tournois-Interferometer |
| HEM | Heat Exchange Method |
| HR | hochreflektierend |
| LP4 | Laserpolitur |
| MBE | Molecular Beam Epitaxy |
| MOCVD | Metal-Organic Chemical Vapour Deposition |
| MOVPE | Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy |
| OPD | Optical Phasefront Deformation |
| SESAM | Semiconductor Saturable Absorber Mirror |
| SPM | Self-Phase Modulation |
| TBP | Time Bandwidth Product |
| TPA | Two Photon Absorption |
| Yb:CaF ₂ | Ytterbium-dotiertes Calciumfluorid |
| Yb:CaGdAlO ₄ | Ytterbium-dotiertes Calcium-Gadolinium-Aluminiumoxid |
| Yb:Lu ₂ O ₃ | Ytterbium-dotiertes Lutetiumoxid |
| Yb:Sc ₂ SiO ₅ | Ytterbium-dotiertes Scandium-Siliziumoxid |
| Yb:KLu(WO ₄) ₂ | Ytterbium-dotiertes Kalium-Lutetium-Wolframat |
| Yb:KY(WO ₄) ₂ | Ytterbium-dotiertes Kalium-Yttrium-Wolframat |
| Yb:YAG | Ytterbium-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat |
| Yb:YAl ₃ (BO ₃) ₄ | Ytterbium-dotiertes Yttrium-Aluminium-Borat |

Extended Abstract

Ultrafast laser sources with pico- and femtosecond pulse duration open new prospects for applications in industry and medicine. In material processing ultra-short pulse durations are used for high-precision material ablation of different materials [1], for example processing carbon-fibre reinforced plastics (CFRP) of high quality [2]. In medicine high intensities and short pulse durations are used for ablation and for systematic influencing of tissues by irradiation [3], respectively. All these applications rely on reliable, compact, innovative, powerful, and efficient ultrafast laser sources.

For the generation of short laser pulses several mechanisms can be used, which differ with respect to the achievable pulse durations and pulse energies [4]. This work focuses on the generation of femtosecond pulses by means of semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM) [5]. Such devices consist of a semiconductor mirror structure with an incorporated saturable absorber and exhibit an increase in reflectivity with increasing light intensity.

The combination of SESAM and thin-disk laser allows for a compact and reliable ultrafast laser source with high pulse energy and high average output power in a diffraction-limited beam. The key advantage of the thin-disk technology is thereby the high-power capability in combination with good beam quality and high optical-to-optical efficiency due to the nearly one dimensional heat flow. The primary element of a thin-disk laser is thereby the thin active crystal which has the geometry of a disk with a thickness of typically 100 to 300 μm and a diameter of 6 to 20 mm. The efficient heat dissipation is achieved due to the high ratio of cooled surface to pumped volume. Due to the combination of large pump spot and short optical length inside the laser crystal, the limiting non-linear effects occur at several orders of magnitude higher pulse energies. Therefore high pulse energies can be achieved without the need for temporal stretching. The nearly one-dimensional heat dissipation in the axial direction and the short propagation length through the crystal drastically reduce the thermal lensing effect compared to rod lasers. A very important property arising from the thin-disk geometry is power scaling: the output power can e.g. be doubled by doubling the pump power and the pump area on the disk, leaving the overall pump intensity constant. This concept also applies for SESAM mode-locked thin disk lasers: here the output power can be scaled by multiplying the mode areas on gain medium and SESAM by the same factor [5, 6].