

**Neodym-dotierte
Quasi-Drei-Niveau-Scheibenlaser**
Hohe Ausgangsleistung
und Frequenzverdopplung

von Dr.-Ing. Jiancun Gao
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Günter Huber

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2005

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0521-1

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Inhaltsverzeichnis	3
Liste der verwendeten Symbole	6
Extended Abstract	9
1 Einleitung	13
2 Grundlagen und Stand der Technik	18
2.1 Scheibenlaserdesign	18
2.1.1 Konzept des Scheibenlasers	18
2.1.2 Technische Realisierung des Scheibenlasers	19
2.1.3 Potenzial Nd-dotierter laseraktiver Medien	21
2.2 Quasi-Drei-Niveau-Systeme	22
2.2.1 Ratengleichung	23
2.2.2 Der Drei- und Vier-Niveau-Übergang	26
2.2.3 Parasitäre Energietransferprozesse	26
2.3 Nd-dotierte laseraktive Materialien	27
2.3.1 Nd ³⁺ Ionen	27
2.3.2 YAG- und YVO ₄ -Kristalle	27
2.3.3 Nd ³⁺ -Ionen in YAG und YVO ₄ Kristallen	29
2.3.3.1 Absorptionsspektren	29
2.3.3.2 Emissionsspektren der Quasi-Drei-Niveau-Übergänge	31
2.3.3.3 Emissionseigenschaften von Vier-Niveau-Übergängen	33
2.4 Analytische Lösung der Ratengleichungen von Neodym dotierten Quasi-Drei-Niveau-Lasern	34
2.4.1 Einfluss der ASE	35
2.4.2 Einfluss der Upconversion	36
2.4.3 Analytische Lösung der Ratengleichungen	37
2.5 Resonator und Gausscher Strahl	42
2.5.1 Linearer Resonator und Strahlqualität	44

2.5.2	Resonatoren für Frequenzverdopplung innerhalb des Resonators	45
2.6	Grundlagen der Frequenzverdopplung	47
2.6.1	Die Polarisation des Mediums	47
2.6.2	Erzeugung der frequenzverdoppelten Strahlung	48
2.6.3	Phasenanpassung und Akzeptanzbandbreite	49
2.6.4	Konversionseffizienz der Frequenzverdopplung eines Gaußstrahls	51
2.6.5	Nichtlinearer Kristall – Eigenschaften von LBO	53
2.6.6	Frequenzverdopplung innerhalb eines Resonators	55
3	Experimenteller Aufbau	59
3.1	Die Pumpstrahlungsquelle	59
3.1.1	Laserdiodenmodul mit Faserbündel	61
3.1.2	Laserdiodenmodul mit einer einzelnen Faser	62
3.2	Aufbau der Laserexperimente	63
4	Laserbetrieb bei der Grundwelle	65
4.1	Temperaturabhängigkeit der Absorptions- und Emissionsspektren	65
4.1.1	Spektren von Nd:YAG	66
4.1.2	Spektrale Eigenschaften von Nd:YVO ₄	69
4.2	Nd:YVO ₄ in Multimodebetrieb	72
4.2.1	Einfluss der Kühltemperatur des Laserkristalls	73
4.2.2	Einfluss der Größe des Pumpflecks	75
4.2.3	Einfluss der Dotierung	76
4.2.4	Einfluss des Auskoppelgrads	78
4.2.5	Untersuchungen der Laserschwelle	82
4.2.6	Laser mit optimierten Betriebsparametern	85
4.2.7	Leistungskalierung	86
4.2.8	Einfluss der Beschichtung der Kristallscheibe	88
4.3	Nd:YVO ₄ Laser in Grundmode- und Single-Frequency-Betrieb	90
4.3.1	Strahlqualität eines kurzen Resonators und Charakterisierung der thermischen Linse	91
4.3.2	Realisierung des Lasers mit transversalem Grundmode	94
4.3.3	Realisierung des Single-Frequency-Betriebs	95
4.3.3.1	Frequenzselektive Elemente	96
4.3.3.2	Single-Frequency-Betrieb und Stabilität	97
4.4	Quasi-Drei-Niveau-Nd:YAG-Laser	100
4.4.1	Laserbetrieb bei zwei Wellenlängen	101
4.4.1.1	Einfluss der Dotierung des Kristalls	101

4.4.1.2	Laserbetrieb mit verschiedenen Auskoppelspiegeln	102
4.4.1.3	Skalierung der Ausgangsleistung	104
4.4.1.4	Steigerung der Ausgangsleistung	105
4.4.2	Laserbetrieb mit einer Wellenlänge und linearer Polarisation	106
4.4.2.1	Selektion der Laserwellenlänge mit einem Etalon	107
4.4.2.2	Selektion der Laserwellenlänge mit einem doppelbrechenden Filter	108
4.5	Nd:YAG-Laser bei den Übergängen ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	110
4.5.1	Laserbetrieb bei zwei Linien	110
4.5.2	Laserbetrieb bei einer einzelnen Linie	111
5	Frequenzverdopplung	114
5.1	Frequenzverdopplung des Nd:YVO ₄ -Lasers bei 914 nm	114
5.1.1	Laserbetrieb mit gefaltetem Resonator	114
5.1.2	Frequenzverdopplung mit LBO	116
5.2	Frequenzverdopplung des Nd:YAG-Lasers	119
5.2.1	Linear polarisierter Laser bei der Grundwelle	119
5.2.2	Erzeugung frequenzumgewandelter Strahlung im roten Spektralbereich	121
5.2.3	Stabilität der Frequenzkonversion	125
6	Zusammenfassung und Ausblick	127
	Literaturverzeichnis	131
	Danksagung	138

1 Einleitung

Dank der Eigenschaften von Laserstrahlung, wie Monochromasie, zeitliche und räumliche Kohärenz und hoher Brillanz ist der Laser heute eine unersetzbare Strahlquelle in zahlreichen Anwendungsgebieten von Wissenschaft und Technik. Es gibt beispielsweise Anwendungen in der Spektroskopie, der Nachrichtentechnik, der Messtechnik, der Medizin und der Materialbearbeitung [1]. Nach über 40 Jahren intensiver Grundlagenforschung, Weiterentwicklung und ständiger Verbesserung gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Lasertypen wie z.B. Gas-, Farbstoff-, Halbleiter-, und Festkörperlaser mit umfangreichen Einsatzmöglichkeiten. Für die Materialbearbeitung sind Laser mit hoher Ausgangsleistung, hohem Wirkungsgrad und guter Strahlqualität nötig [2]. Der CO₂-Laser weist eine hohe Ausgangsleistung, einen hohen Wirkungsgrad und einen beugungsbegrenzten Strahl auf. Deshalb spielt der CO₂-Laser in der Materialbearbeitung immer noch eine große Rolle. Zunehmend Interesse gewinnt heute der Festkörperlaser. Die Gründe dafür sind:

1. Seine fast 10-fach kürzere Wellenlänge ($\approx 1 \mu\text{m}$) ermöglicht eine 10-fach höhere Strahlfokussierbarkeit.
2. Der Laserstrahl kann in eine flexible Glasfaser eingekoppelt und in ihr geführt werden.
3. Die Materialbearbeitungseffizienz wird durch den höheren Absorptionsgrad und niedrigeren Plasmaabsorptionsgrad erhöht.
4. Leistungsstarke und zuverlässige Diodenlaser ermöglichen die Realisierung von Festkörperlasern mit hoher Ausgangsleistung, guter Strahlqualität, und hohem Wirkungsgrad. Mit schmalbandigem Emissionsbereich, kompakter Baugröße, hohem elektrisch-optischem Wirkungsgrad und langer Lebensdauer ist der Diodenlaser eine besonders geeignete Lichtquelle zur Anregung des laseraktiven Mediums des Festkörperlasers.

Ein wesentliches Problem bei der Realisierung von Festkörperlasern mit hoher Ausgangsleistung und gleichzeitig guter Strahlqualität sind die starken thermischen Effekte in einem kompakten laseraktiven Medium, wodurch die Eigenschaften des Lasers negativ beeinflusst werden. Die thermischen Effekte können im Prinzip durch zwei Methoden verringert werden. Zum einen gilt es, laseraktive Medien zu entwickeln, die eine geringere Wärmeenergieerzeugung und bessere Wärmeleitfähigkeit besitzen. Zur Zeit stehen

allerdings nur eine begrenzte Anzahl von laseraktiven Medien zur Verfügung. Vor allem kommen Yb^{3+} -dotierte Kristalle in Frage. Im Vergleich zum traditionell verwendeten laseraktiven Medium Nd:YAG, das einen durch den Quantendefekt bedingten Wärmeproduktionsgrad von mindestens 0,24 ($1 - \lambda_p/\lambda_l$, Wellenlänge der Pumpstrahlung: $\lambda_p = 808$ nm, Wellenlänge der Laserstrahlung: $\lambda_l = 1064$ nm) besitzt, ist dieser bei Yb:YAG nur von 0,087 ($\lambda_p = 940$ nm, $\lambda_l = 1030$ nm), und bei Yb:KYW oder Yb:KGW nur 0,044 ($\lambda_p = 980$ nm, $\lambda_l = 1025$ nm). Aber aufgrund der Quasi-Drei-Energieniveau-Struktur ist es schwer mit einem normalem Laserdesign einen effektiven Laserbetrieb mit Yb^{3+} -dotierten Materialien zu erreichen, da hier eine hohe Pumpleistungsdichte und effektive Kühlung des laseraktiven Mediums erforderlich ist. Zum anderen gilt es neues Laserdesigns mit effektiven Kühlmechanismen zu entwickeln. Die Hauptidee zur effektiven Kühlung des laseraktiven Mediums ist, dass das Verhältnis der gekühlten Oberfläche zum gepumpten Volumen des laseraktiven Mediums so groß wie möglich sein soll. So wurden aus dem traditionellen Stablaserdesign, bei dem das laseraktive Medium die Form eines Stabs hat, neue Laserdesigns entwickelt. Wenn die Stablänge immer mehr erhöht wird und der Durchmesser des Stabs immer mehr verkleinert wird, hat das laseraktive Medium schließlich die Form einer Lichtleitfaser. Mit der so erreichten großen Manteloberfläche wird die Kühlung des laseraktiven Medien verbessert. Diesen Lasertyp nennt man Faserlaser [3]. Wenn die Stablänge immer mehr verkürzt wird, erhält das laseraktive Medium die Form einer Scheibe, wodurch ebenfalls ein großes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen erreicht wird. Hieraus resultieren gleich zwei neue Laserdesigns: Je nach Einkopplungsart der Pumpstrahlung und Schwingungsrichtung der Laserstrahlung werden sie Slablaser oder Scheibenlaser genannt:

- Beim Slablaser wird das laseraktive Medium normalerweise seitlich gepumpt und die Laserstrahlung seitlich ausgekoppelt. Die beiden Stirnflächen des laseraktiven Mediums werden gekühlt [4]. Ein so genannter Hybrid-Resonator (lateral stabil, transversal instabil) [5] wird oft zusammen mit dem slabförmigen laseraktiven Medium benutzt, um eine gute Strahlqualität zu erhalten.
- Das Konzept des Scheibenlasers wurde Anfang der 90er Jahre am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt gemeinsam entwickelt [6, 7, 8]. Das scheibenförmige laseraktive Medium wird von einer Stirnfläche gepumpt, und von der anderen Stirnfläche gekühlt. Mit Hilfe einer speziellen Pumpoptik wird die Pumpstrahlung mehrfach durch die Scheibe geleitet, wodurch ein hoher Absorptionsgrad für die Pumpstrahlung in der dünnen Scheibe ($< 0,5$ mm) ermöglicht wird. Der Laserstrahl steht fast senkrecht zur Stirnfläche und somit fast parallel zur Richtung, in die die Wärme abgeleitet wird. Mit diesem Design verringern sich auch die thermo-optischen

Effekte, die eine schlechtere Strahlqualität verursachen. Deshalb ermöglicht der Laser im Scheibenlaserdesign einen hohen Wirkungsgrad mit guter Strahlqualität.

Nach über 10 Jahren Entwicklung und Verbesserung hat die Ausgangsleistung des Yb:YAG-Scheibenlasers schon den kW-Bereich erreicht [9]. Ein Yb:YAG-Scheibenlaser mit einer Dauerstrichleistung von 4 kW wird von der Firma Trumpf hergestellt. Die Laserstrahlung kann in einer Faser mit einem Kerndurchmesser von 200 μm geführt werden [10]. Das Konzept des Scheibenlasers ist nicht nur für den Dauerstrichbetrieb geeignet, sondern wurde auch für den Pulsbetrieb, beispielsweise im modengekoppelten Betrieb [11], im Q-switch Betrieb und im regenerativen Verstärker [12, 13] eingesetzt.

Das Scheibenlaserdesign ist auch für andere laseraktive Medien, insbesondere für Laser mit Quasi-Drei-Niveau-Übergängen geeignet. Beispiele hierfür sind Yb:KYW und Yb:KGW. Mit Yb:KYW im Scheibenlaserdesign wurde mit einer beugungsbegrenzten Strahlqualität eine Ausgangsleistung von 52 W und einem optischen Wirkungsgrad von 45 % erreicht [14].

Nd-dotierte Materialien sind wichtige laseraktive Medien im Bereich der Materialbearbeitung und der wissenschaftlichen Forschung. Die zahlreichen Emissionslinien der Nd-dotierten laseraktiven Medien in Kombination mit optischer Frequenzumsetzungstechnik liefern eine Menge von Laserlinien in einem großen spektralen Bereich vom UV über VIS bis ins mittlere Infrarot. Ein zunehmende Interesse liegt im sichtbaren Spektralbereich für Anwendungen wie z.B. Laserdisplaysysteme [15].

Nd:YVO₄-Kristalle besitzen besonders gute spektrale Eigenschaften, deshalb findet Nd:YVO₄ häufig Anwendung in diodengepumpten Festkörperlasern im mittleren Leistungsbereich. Der stärkste Laserübergang ist der Vier-Niveau-Übergang bei 1,064 μm . Frequenzverdoppelte Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm mit über 10 W Dauerstrichleistung sind schon kommerziell erhältlich. Die Wellenlänge des Quasi-Drei-Niveau-Übergangs von Nd:YVO₄ liegt bei 914 nm. Der frequenzverdoppelte Laser hat eine Wellenlänge von 457 nm, die als eine ideale blaue Lichtquelle für Displaysysteme eingesetzt werden kann. Mit einem traditionellen Laserdesign ist eine hohe Ausgangsleistung mit Nd:YVO₄ bei 914 nm nur schwer zu erhalten. Vor den Experimenten, die in dieser Arbeit beschrieben werden, lag die maximal erreichte Laserleistung bei 3 W [16].

Die Quasi-Drei-Niveau-Übergänge von Nd:YAG wurden am meisten untersucht. Durch Verbinden (engl.: bond) des Nd:YAG-Kristalls mit zwei undotierten YAG-Kristalle wurde eine Laserleistung bei 946 nm von 7,4 W erreicht [17]. Es gibt noch eine weitere

Emissionslinie unter den Quasi-Drei-Niveau-Übergängen von Nd:YAG bei einer Wellenlänge von 938 nm. Eine maximale Ausgangsleistung von 3,9 W wurde bei dieser Wellenlänge erreicht [18]. Die frequenzverdoppelte Laserstrahlung der Strahlung bei 946 nm ist nicht nur als Lichtquelle von Laserdisplaysystemen sondern auch als eine Alternative zum Argon-Ion-Laser interessant. Die maximal erreichte frequenzverdoppelte Leistung des Lasers bei 946 nm wurde mit BiB_3O_6 [19] als nichtlinearer Kristall erreicht und betrug 2,8 W [20].

Für die Quasi-Drei-Niveau-Übergänge von Nd-dotierten laseraktiven Medien erwartet man mit dem Scheibenlaserdesign eine höhere Ausgangsleistung und eine bessere Strahlqualität. Diese Arbeit konzentriert sich daher auf die experimentelle Realisierung eines Scheibenlasers bei den Quasi-Drei-Niveau-Übergängen von Nd:YVO₄ und Nd:YAG mit hoher Laserleistung und guter Strahlqualität. Außerdem werden Laser beim Vier-Niveau-Übergang ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ von Nd:YAG bei 1300 nm im Scheibenlaserdesign experimentell untersucht. Die frequenzverdoppelte Laserstrahlung liegt im roten Spektralbereich, welcher für Laserdisplaysysteme auch angewandt werden kann. Die Realisierung blauer und roter Laserstrahlung durch Frequenzverdopplung ist daher ein weites Ziel dieser Arbeit.

Im Kapitel 2 wird zunächst das Konzept und der Aufbau des Scheibenlasers vorgestellt. Nach einer Zusammenstellung der Grundlagen von Quasi-Drei-Niveau-Lasern und den Eigenschaften von Nd:YAG und Nd:YVO₄ wird eine theoretische Analyse von Quasi-Drei-Niveau-Lasern aus Nd-dotierten Materialien unter Berücksichtigung von ASE (engl.: amplified spontaneous emission) und Upconversion durchgeführt. Außerdem werden die für die Experimente benötigte Resonatortheorie, die Grundlagen der Frequenzverdopplung und die Eigenschaften des nichtlinearen Kristalls zusammengestellt. Kapitel 3 beschreibt den experimentellen Aufbau und stellt die Anforderungen an die in den Experimenten verwendeten Laserdiodenmodule dar. Danach kommt als Hauptteil dieser Arbeit die Realisierung der hohen Ausgangsleistung von Quasi-Drei-Niveau-Lasern mit dem Scheibenlaserdesign und deren experimentellen Untersuchung. Ausgangspunkt ist die experimentelle Untersuchung der spektralen Eigenschaften von Nd:YVO₄ und Nd:YAG bei verschiedenen Temperaturen. Anschließend werden die Einflüsse verschiedener Parameter wie z.B. der Dotierung des Kristalls, der Temperatur des Kühlmittels des Kristalls, der Größe des gepumpten Durchmessers auf der Scheibe, des Beschichtungsdesigns der Kristallscheibe und des Auskopplungsgrads des Resonators auf die Eigenschaften des Nd:YVO₄ Lasers systematisch untersucht. Durch Verwendung frequenzselektiver Elemente im Resonator wird mit Nd:YVO₄ der transversale Grundmodebetrieb und der Single-Frequency-Betrieb realisiert.

Quasi-Drei-Niveau-Laser auf Basis von Nd:YAG werden unter verschiedenen Betriebsbedingungen auch experimentell untersucht. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des Vier-Niveau-Übergangs ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ von Nd:YAG im Laserbetrieb dargestellt. Im Kapitel 5 wird die Frequenzverdopplung mit LBO untersucht. Die blaue Laserstrahlung wird durch die Frequenzverdopplung der Grundwelle des Quasi-Drei-Niveau-Übergangs von Nd:YVO₄ erzeugt und die rote Laserstrahlung wird durch Frequenzumwandlung der Grundwelle des ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ Übergangs des Nd:YAG-Kristalls realisiert.