Florian Lenhardt (Autor)

Experimentelle Realisierung von neuen Konzepten für Hochleistungs-Nd:YVO4-Laser bei 1342 nm

https://cuvillier.de/de/shop/publications/80

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

Kapitel 1

Einleitung

Aufgrund ihrer ausgezeichneten Strahlqualität im Vergleich zu anderen Lasertypen, der kompakten und stabilen Bauweise und ihres hohen Wirkungsgrades finden sich für diodengepumpte Festkörperlaser eine Vielfalt von Einsatzmöglichkeiten, wie in der Medizin, der Spektroskopie, der Faseroptik oder der Materialbearbeitung.

Vor allem Festkörperlaser, die auf einer Kombination von Ionen der Seltenen Erden (z.B. Nd^{3+}, Yb^{3+}, Er^{3+},...) und einem geeigneten Wirtskristall (z.B. YVO_4, YAG, $GdVO_4$,...) basieren, haben in der Vergangenheit immer mehr an Bedeutung gewonnen. Ein charakteristisches Merkmal von Seltenen Erden ist, dass das lokale Feld des Wirtskristalls durch die äußeren Elektronen abgeschirmt wird [1], weshalb sie spektral sehr schmalbandige Laserübergänge aufweisen. Zudem sind die Lebensdauern des oberen Laserniveaus sehr groß und bewegen sich im Bereich von einigen Mikro- bis Millisekunden, da der Dipolübergang ins untere Laserniveau eigentlich verboten, aber aufgrund der Wechselwirkung mit dem Kristallfeld schwach erlaubt ist. Deshalb lässt sich eine sehr große Besetzungsinversion aufbauen, was vor allem für die Erzeugung von kurzen gütegeschalteten Impulsen von Vorteil ist. Ein Nachteil dieser Lasermaterialien ist, dass sie nur wenige diskrete Laserübergänge aufweisen, die alle im infraroten Spektralbereich liegen. Durch die Methoden der Nichtlinearen Optik, ist es möglich durch Frequenzkonversion andere Wellenlängenbereiche zu erreichen. Vor allem die Erzeugung von Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich eröffnet eine Vielzahl neuer Anwendungsfelder für solche Festkörperlaser, wie zum Beispiel in der Display-Technologie, der LCD-Display-Produktion, der Mikromaterialbearbeitung, der Stereolithographie, als Pumpquelle für einen Laser- oder weiteren nichtlinearen Prozess oder generell für Wellenlängen-sensitive Prozesse.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Aufgrund des Fehlens von leistungsstarken Festkörperlaser-basierten Strahlquellen im Sichtbaren, den grünen Spektralbereich ausgenommen, ist besonders die Erzeugung von roter und blauer Laserstrahlung durch die Frequenzverdopplung beziehungsweise Frequenzverdreifachung der Strahlung eines Nd-basierten Festkörperlasers, der den $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$-Übergang bei $1,3\ \mu$m ausnutzt, von Interesse.

Gerade im Bereich der Wellenlängen-sensitiven Prozesse in der Materialbearbeitung finden sich viele Einsatzmöglichkeiten für ein Lasersystem, das sowohl rote als auch blaue Laserstrahlung zur Verfügung stellt. Wellenlängen-sensitive Prozesse finden sich zum Beispiel in der Reparatur von LCD-Displays, bei der gezielt defekte Farbpixel zerstört werden, oder aber auch im selektiven Ausbleichen von Farbstoffen für die RGB-Laserbeschriftung. Dabei findet vor allem Strahlung in Form von kurzen intensiven Impulsen mit hoher Repetitionsrate Verwendung, was zu einer hohen Prozessgeschwindigkeit führt.

Eine weitere Anwendung, speziell für die zweite Harmonische von Laserstrahlung bei $1,3\ \mu$m, ist zum Beispiel die Verwendung als Strahlquelle für die Anregung von Cr:LiSAF- [2] oder Cr:LiCAF-Lasern [3], die im roten Spektralbereich gepumpt werden. Dabei sind vor allem eine möglichst hohe Ausgangsleistung und gute Strahlqualität der roten Strahlung erwünscht. In der Nichtlinearen Optik kann durch die Anregung eines PPLN-OPOs oder OPGs mit Strahlung im roten Spektralbereich die grün-induzierte Infrarot-Absorption (GRIIRA) vermieden werden, die bei der Verwendung von Pumplasern auftritt, die bei $1\ \mu$m und deren zweiter Harmonischer arbeiten [4]. Zudem kann mit Hilfe einer leistungsstarken gepulsten Laserstrahlquelle bei $1,3\ \mu$m durch die Erzeugung von weiteren Harmonischen Strahlung bis ins mittlere und ferne UV (zum Beispiel sechste Harmonische bei 224 nm und siebte Harmonische bei 192 nm) generiert werden, welche im Fall der siebten Harmonischen Anwendung in der VUV-Lithographie findet [5, 6].

Es besteht also ein großer Bedarf an der Entwicklung leistungsstarker Laserstrahlquellen im sichtbaren Spektralbereich. Je nach Anwendung wird dabei kontinuierlich emittierte Laserstrahlung oder aber in Form von kurzen intensiven Impulsen im Nanosekunden (mittels Güteschaltung) oder Pikosekunden-Bereich (mittels Modenkopplung) benötigt. Dabei stellt die Frequenzkonversion von auf Nd-basierenden Lasern bei $1,3\ \mu$m einen vielversprechenden Ansatz für die Erzeugung von roter und blauer Laserstrahlung dar. Bisher waren auf Nd-dotierten Festkörpermaterialien basierende, kontinuierlich emittierende Laserstrahlquellen bei $1,3\ \mu$m mit guter Strahlqualität in ihrer Ausgangsleistung limitiert. Die Ausgangsleistungen betrugen dabei zwischen 6 W und 11 W [7, 8, 9, 10, 11]. Es konnten zwar Systeme mit Ausgangsleistungen von bis zu 120 W realisiert werden, diese wiesen aber eine sehr schlechte Strahlqualität

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

mit einer Beugungsmaßzahl $M^2 > 34$ auf [12, 13]. Das Fehlen von leistungsstarken Festkörperlasern bei $1,3\ \mu$m mit guter Strahlqualität resultiert aus der thermischen Belastung des Laserkristalls durch die absorbierte Pumpleistung. Der Laserübergang bei 1342 nm in Nd:YVO_4 weist, bei optischer Anregung bei 808 nm, einen sehr hohen Quantendefekt auf. Zusätzlich wird der Wärmeeintrag in den Laserkristall durch die bei 1342 nm auftretende *excited state absorption* (ESA) erhöht [14]. Dadurch tragen über 40 % der absorbierten Pumpleistung direkt zur Erwärmung des Kristalls bei. Dies führt zur Bildung einer sehr starken, thermisch induzierten Linsenwirkung im Laserkristall, die durch entsprechend stark gekrümmte Spiegel im Resonator kompensiert werden muss. Für die, bei sehr starken thermischen Linsen auftretenden, asphärischen Anteile ist dies nicht mehr möglich [15]. Zudem kommt es beim Überschreiten der Bruchspannung des Kristalls aufgrund der thermischen Ausdehnung letztendlich zu dessen Zerstörung.

Aufgrund der thermischen Problematik bei der Leistungsskalierung von Laserstrahlquellen bei $1,3\ \mu$m sind auch die bisher veröffentlichten gütegeschalteten Laser bei $1,3\ \mu$m in ihrer Leistung beschränkt. Die meisten dieser Systeme basieren auf passiver Güteschaltung mit Hilfe eines V^{3+}:YAG-Kristalls als sättigbaren Absorber und lieferten mittlere Ausgangsleistungen um 1 W [16, 17, 18, 19]. Mittels aktiver Güteschaltung konnten die höchsten mittleren Ausgangsleistungen und Impulsspitzenleistungen erreicht werden. M. Nittmann realisierte einen ns-Nd:YVO_4-Laser mit einer mittleren Ausgangsleistung von $4,9$ W und einer Impulsdauer von 11 ns bei einer Repetitionsrate von 15 kHz, was einer Impulsspitzenleistung von 30 kW entspricht [20]. C. Lu erzeugte ebenfalls mit Nd:YVO_4 bei einer Repetitionsrate von 50 kHz eine mittlere Ausgangsleistung von $11,2$ W bei einer Impulsdauer von 60 ns, also eine Impulsspitzenleistung von $3,7$ kW [21].

Die Entwicklung von leistungsstarken modengekoppelten Lasern bei $1,3\ \mu$m wurde, zusätzlich zur thermischen Problematik, durch das Fehlen von geeigneten Modenkopplungsverfahren bei 1342 nm erschwert. Die passive Modenkopplung mit Hilfe von sättigbaren Halbleiterabsorberspiegeln (SESAM) ist zwar eine gebräuchliche Methode zur Erzeugung ultrakurzer Impulse [22, 23, 24, 25], war aber in der Vergangenheit durch das Fehlen von Halbleiterstrukturen, die sich für den Wellenlängenbereich um $1,3\ \mu$m eignen, nur eingeschränkt nutzbar [26]. Erst in den letzten Jahren konnte durch die Entwicklung neuer Konzepte für SESAMs bei $1,3\ \mu$m das Problem behoben werden [26, 27, 28]. Dennoch sind die bisher durch Modenkopplung mit einem SESAM erreichten Leistungen auf $2,3$ W bei einer Impulsdauer von 29 ps beschränkt [29], da bei einer Leistungsskalierung das Auftreten von Q-switch-Modenkopplung und die damit

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

verbundene Zerstöranfälligkeit des SESAMs immer mehr in den Fokus rücken [30, 31]. Die besten Ergebnisse, im Bezug auf die mittlere Ausgangsleistung, konnten bisher von D. Krennrich mit Hilfe einer modifizierten selbststabilisierenden Form des *additive pulse mode-locking* (APM) mit einer Ausgangsleistung von $4,7$ W bei einer Impulsdauer von 7 ps erzielt werden [32]. Ein großer Nachteil ist aber, dass APM eine interferometrische Stabilisierung der Längen beider gekoppelter Resonatoren benötigt.

Als Konsequenz des Fehlens von leistungsstarken Strahlquellen bei $1,3$ μm mit guter Strahlqualität sind auch die durch Frequenzkonversion erreichbaren Ausgangsleistungen im sichtbaren Spektralbereich limitiert. Man kann zwar auch bei geringen Ausgangsleistungen der fundamentalen Strahlung durch resonatorinterne Frequenzverdopplung und -verdreifachung sehr hohe Effizienzen für den jeweiligen Prozess erreichen, die Ausgangsleistung ist aber dennoch durch die zur Verfügung stehende Leistung der $1,3$ μm-Strahlung beschränkt. Die SHG von Dauerstrich-Lasern in den roten Spektralbereich wurde bisher ausschließlich resonatorintern durchgeführt. Dabei konnten mittlere Ausgangsleistungen im Bereich zwischen 1 W und 5 W bei guter Strahlqualität erreicht werden [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]. Im Fall von gütegeschalteter Strahlung wurden die meisten Ergebnisse ebenfalls mittels resonatorinterner SHG beziehungsweise THG realisiert. Die erreichten mittleren Ausgangsleistungen bei guter Strahlqualität waren dabei für die SHG auf den einstelligen Watt-Bereich beschränkt [20, 40, 41, 42, 43] und für die THG kleiner als 2 W [20, 44, 45]. Da die modengekoppelten Laser bei 1342 nm in ihrer Leistung stark begrenzt sind, gibt es bisher nur sehr wenige Veröffentlichungen, die die Frequenzverdopplung der Strahlung eines solchen Systems beschreiben. Die bisher höchste mittlere Ausgangsleistung im Bezug auf die SHG modengekoppelter Strahlung bei $1,3$ μm wurde mit 3 W von D. Krennrich durch externe SHG in periodisch gepoltem KTP bei einer sehr hohen Konversionseffizienz von 80 % erreicht [46].

Es wird deutlich, dass für die Realisierung von Hochleistungslasern bei $1,3$ μm und damit auch einer möglichen Steigerung der Ausgangsleistung, der durch Frequenzkonversion erzeugten Strahlung im sichtbaren Spektralbereich, die Entwicklung neuer innovativer Konzepte nötig ist, durch die die bei $1,3$ μm auftretenden Limitierungen, wie die starke thermische Linse und die mögliche Zerstörung des Laserkristalls, überwunden werden können.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung und experimentelle Realisierung von neuen Konzepten zur Leistungsskalierung von Nd-dotierten Lasern bei $1,3$ μm. Als Lasermaterial wird dabei Neodym-dotiertes Yttrium Vanadat (Nd:YVO_4) verwendet, dessen $^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$-Übergang einer Wellenlänge von 1342 nm entspricht. Nd:YVO_4

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

verfügt über herausragende spektroskopische Eigenschaften. Vor allem in Bezug auf den Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission übertrifft dieses Lasermaterial alle anderen gebräuchlichen Festkörpermaterialien. Nd:YVO_4 eignet sich aufgrund der relativ langen Lebensdauer des oberen Laserniveaus sehr gut für die Verwendung in gütegeschalteten Lasern. Des Weiteren ermöglicht die Fluoreszenzbandbreite von Nd:YVO_4 die Erzeugung kurzer Pikosekunden-Impulse mit Impulsdauern kleiner 10 ps mittels Modenkopplung.

In dieser Arbeit wird erstmals das Pumpkonzept, das auf der optischen Anregung des Lasers mit einer Laserdiode bei einer Wellenlänge von 888 nm basiert, für die Erzeugung von Laserstrahlung bei 1342 nm in Nd:YVO_4 angewandt. Aufgrund der nur schwach ausgeprägten Absorption bei 888 nm kann die Wärmelast des Kristalls durch die Verwendung eines langen, niedrig-dotierten Nd:YVO_4-Kristalls auf ein größeres Volumen verteilt werden. Ein weiterer Vorteil stellt der um 15 % reduzierte Quantendefekt, im Vergleich zur optischen Anregung bei 808 nm, dar. Durch die optische Anregung bei 888 nm ist es also möglich mit wesentlich höheren Pumpleistungen zu arbeiten, ohne eine Zerstörung des Laserkristalls zu riskieren. Zudem wird durch die Verteilung der Wärmelast die thermisch induzierte Linse erheblich reduziert. Dieses Pumpkonzept wurde von L. McDonagh entwickelt und mit großem Erfolg für die Leistungsskalierung eines 1064 nm-Nd:YVO_4-Lasers ausgenutzt [47].

Um das Pumpkonzept erfolgreich umsetzen zu können, müssen als erstes die thermooptischen und thermo-mechanischen Eigenschaften des Laserkristalls unter Pumplichteinstrahlung untersucht werden. Dadurch erhält man eine Abschätzung der im Kristall auftretenden Spannungsintensitäten, wodurch sich eine mögliche Zerstörung des Kristalls durch die thermische Ausdehnung ausschließen lässt. Des Weiteren wird es durch die Kenntnis der Brennweite der thermischen Linse möglich, diese bei der Resonatorplanung zu berücksichtigen. Dazu wird sowohl eine numerische Simulation der Kristalleigenschaften mittels Finite Elemente Analyse als auch eine experimentelle Bestimmung der Brennweite der thermisch induzierten Linse durchgeführt, sowohl mit aktivem Laserprozess bei 1342 nm als auch ohne Laserbetrieb. Die thermische Linse ohne Laserbetrieb ist wichtig, da der Laserresonator auch für diese Brennweite stabil sein muss, um den Laserprozess starten zu können.

Anhand dieser Ergebnisse ist es möglich einen, speziell an die sehr kleinen und zudem stark unterschiedlichen Brennweiten mit und ohne Laserbetrieb, angepassten Resonator für den Dauerstrich-Betrieb zu konzipieren, der sowohl mit als auch ohne Laserbetrieb stabil ist. Zusätzlich wird durch das Resonatordesign gleichzeitig guter Modenüberlapp gewährleistet. Dadurch ist die Entwicklung eines leistungsstarken Dauerstrich-Lasers

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

bei 1342 nm möglich, der beugungsbegrenzte Strahlung im Gauß'schen Grundmode emittiert. Basierend auf diesem Laser können durch aktive Güteschaltung mit Hilfe eines akusto-optischen Modulators intensive ns-Impulse erzeugt werden. Dazu wird der Resonator des Dauerstrich-Lasers durch geeignete Modifikationen an die Anforderungen für die Güteschaltung angepasst. Der Laser wird dabei bei Repetitionsraten betrieben, die eine hohe Impulsspitzenleistung gewährleisten, um in der Folge effiziente Frequenzkonversion erreichen zu können.

Zur Erzeugung von ultrakurzen Impulsen bei 1342 nm ergaben sich, durch die Verwendung von kaskadierten $\chi^{(2)}$-Prozessen, eine Reihe neuer vielversprechender Modenkopplungsverfahren, wie zum Beispiel das *nonlinear mirror mode-locking* (NLM) oder Stankov-Modenkopplung [48] und die parametrische Kerrlinsen-Modenkopplung (PKLM) [49]. Ein Vorteil dieser Verfahren ist die Verwendbarkeit bei allen Laserwellenlängen, eine hohe Transmission des nichtlinearen Kristalls für die jeweilige Wellenlänge vorausgesetzt. Bisher wurden damit,aufgrund der bei 1342 nm grundlegenden thermischen Leistungslimitierung, nur mittlere Ausgangsleistungen bis zu $1,4$ W erreicht [50, 51]. C. Schäfer demonstrierte 2011 die Realisierung eines 888 nm-gepumpten Hochleistungs-Nd:YVO_4-Lasers bei 1064 nm mittels PKLM [52]. Durch die Überführung dieses Verfahrens zu der Emissionswellenlänge 1342 nm ist es möglich einen leistungsstarken ps-Nd:YVO_4-Laser bei 1342 nm zu entwickeln.

Basierend auf den zuvor realisierten Hochleistungs-Nd:YVO_4-Lasern bei 1342 nm kann, für die verschiedenen Betriebsmodi und durch daran angepasste Wahl geeigneter nichtlinearer Materialien, effizient leistungsstarke Strahlung im roten Spektralbereich bei 671 nm durch externe Frequenzverdopplung der 1342 nm-Strahlung erzeugt werden. Für die gütegeschaltete Strahlung wird zusätzlich die dritte Harmonische erzeugt und damit eine Laserstrahlquelle mit hoher Leistung im blauen Spektralbereich bei 447 nm realisiert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Kapitel 2

Leistungsskalierung diodengepumpter Festkörperlaser bei 1342 nm

Das Ziel dieser Arbeit ist die Leistungsskalierung von Festkörperlasern bei $1,3\ \mu$m. Die Hauptlimitierug stellen dabei die thermischen Effekte im Laserkristall aufgrund des Wärmeeintrags durch die absorbierte Pumpleistung dar. Der sehr große Quantendefekt und die zusätzlich auftretende *excited state absorption* (ESA) für Nd-dotierte Festkörperlaser, die den $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$-Übergang bei $1,3\ \mu$m ausnutzen, führen zu einem sehr hohen Wärmeeintrag in den Laserkristall. Die starke Erwärmung des Laserkristalls führt dabei zu sehr starken thermischen Linsen im Kristall und bei hohen Pumpleistungen letztendlich zur Zerstörung des Kristalls. Daher waren Festkörperlaser bei $1,3\ \mu$m in der Vergangenheit in ihrer Ausgangsleistung beschränkt.

In diesem Kapitel sollen die in dieser Arbeit experimentell realisierten, neuartigen Konzepte beschrieben werden, mit deren Hilfe eine Leistungsskalierung von Festkörperlasern bei $1,3\ \mu$m möglich ist. Um zu verdeutlichen warum in den folgenden Experimenten Nd:YVO_4 als Lasermaterial verwendet wird, werden zunächst dessen spektroskopische und thermo-mechanischen Eigenschaften vorgestellt und mit anderen gebräuchlichen Nd-dotierten Lasermaterialien verglichen. Danach werden die Ursachen der thermischen Belastung von Laserkristallen bei Laseremission bei $1,3\ \mu$m und deren Auswirkungen im Bezug auf die Leistungsskalierung diskutiert. Durch ein neues Pumpkonzept bei einer Pumpwellenlänge von 888 nm kann eine Reduzierung des Quantendefekts und eine Verteilung der Wärmelast auf ein größeres Volumen erreicht werden. Damit werden höhere Pumpleistungen ohne Zerstörung des Laserkristalls möglich und die Brennweite der thermischen Linse reduziert. Um den Einfluss des neuen Pumpkonzepts auf die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

thermo-optischen und thermo-mechanischen Eigenschaften des Laserkristalls theoretisch vorhersagen zu können, werden numerische Simulationen mittels Finite Elemente Analyse (FEA) durchgeführt. Zusätzlich wird die Brennweite der thermischen Linse des Kristalls, unter den in den späteren Experimenten vorherrschenden Bedingungen, experimentell bestimmt, um eine zuverlässige Berechnung eines geeigneten Resonators zu ermöglichen.

2.1 Das Lasermaterial Nd:YVO_4

In der Regel basieren Festkörperlaser auf einem dielektrischen Wirtsmaterial, in welches laseraktive Ionen als Dotierung eingebracht werden. Dabei kommen häufig Oxide, wie Saphir oder YAG, oder auch Vanadate, wie YVO_4 oder $GdVO_4$, als Wirtskristall zum Einsatz. Dotiert werden diese mit Vertretern der Seltenen Erden, wie zum Beispiel Nd oder Yb, oder Übergangsmetallen, wie zum Beispiel Ti oder Cr. Die optischen Eigenschaften, wie Absorption und Emission, werden in erster Linie vom Dotierungsion bestimmt. Die mechanischen und thermischen Eigenschaften, wie Bruchspannung und Wärmeleitfähigkeit, werden durch das Wirtsmaterial vorgegeben [20].

Neodym-dotierte Yttrium Vanadate (Nd:YVO_4) erweisen sich aufgrund ihrer spektroskopischen Eigenschaften als besonders geeignet für die optische Anregung mit Diodenlasern. Zum einen überzeugt Nd:YVO_4 durch einen großen Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission, welcher fünf mal so hoch ist als der von Nd:YAG. Zudem besitzt Nd:YVO_4 eine starke breitbandige Absorption bei 808 nm. Durch stetige Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren ist es heutzutage möglich sehr große Nd:YVO_4-Kristalle von hervorragender Qualität herzustellen. Dies ermöglicht die optische Anregung mit Laserdioden, unter Verwendung einer longitudinalen Pumpgeometrie. Mit Hilfe der starken Absorption bei 808 nm kann durch das longitudinale Pumpen eine hohe Verstärkung in einem begrenzten Pumpvolumen erreicht werden. Zudem weisen die Vanadat-Kristalle eine natürliche Doppelbrechung auf. Daher ist die Laserstrahlung linear polarisiert in Richtung der außerordentlichen π-Achse. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass dadurch unerwünschte thermisch induzierte Doppelbrechung vermieden wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass Nd:YVO_4-Kristalle in Standardgrößen relativ günstig zu erwerben sind. Bei allen Vorteilen stellen die relativ schlechten mechanischen und thermischen Eigenschaften den größten Nachteil von Nd:YVO_4 dar. Nd:YVO_4 weist eine wesentlich geringere Bruchspannung als Nd:YAG auf und besitzt eine geringere Wärmeleitfähigkeit. Dadurch ergibt sich ein niedrigeres Limit, der maximalen absorbierten Pumpleistung in Nd:YVO_4, bevor zu starke thermische Linsen und Ab-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

berationen und letztendlich die Zerstörung des Kristalls auftreten. Weitere Informationen zu Nd:YVO_4 finden sich in den Monographien von Haken und Wolf [53], Powell [54] und Kaminskii [55]. Der nächste Abschnitt behandelt zunächst die physikalischen Eigenschaften von Nd:YVO_4, worauf abschließend die laserspezifischen Eigenschaften von Nd:YVO_4 mit den Eigenschaften anderen potentieller Lasermaterialien verglichen werden.

2.1.1 Physikalische Eigenschaften

Neodym gehört zu der Gruppe der Seltenen Erden, genauer gesagt zu der Gruppe der Lanthanoiden. Es besitzt eine Ordnungszahl von 60 und hat daher die folgende Elektronenkonfiguration [53]:

$$(Xe)4f^4 6s^2 \tag{2.1}$$

In Xenon sind dabei die ersten drei Elektronenhüllen komplett gefüllt. Die vierte Elektronenhülle hat alle s-, p- und d-Orbitale voll besetzt und besitzt vier f-Elektronen. Die fünfte besitzt komplett gefüllte s- und p-Orbitale und die sechste Elektronenhülle nur zwei s-Elektronen. Die Valenzelektronen, die für die Bindung mit dem Wirtskristall verwendet werden, sind die $4f^4$- und die $6s^2$-Elektronen [54]. Bei der Dotierung von YVO_4 mit Neodym wird ein Y^{3+}-Ion durch ein Nd^{3+}-Ion ersetzt. Dabei lautet die Elektronenkonfiguration des aktiven Laserions Nd^{3+}:

$$(Xe)4f^3 \tag{2.2}$$

Als Absorptions- und Emissionsübergänge, die für den Laserbetrieb verwendet werden, dienen Übergänge zwischen den 4f-Zuständen (4f-4f-Übergänge). Diese stellen einen eigentlich verbotenen Dipolübergang dar, der aufgrund der Wechselwirkung mit dem Kristallfeld schwach erlaubt ist. Daher weist Nd:YVO_4 eine relativ lange Lebensdauer des oberen Laserniveaus im Bereich um hundert Mikrosekunden auf.

Die drei 4f-Elektronen können sich in unterschiedlichen Zuständen neu anordnen, die in drei Arten von Wechselwirkungen unterteilt sind. Dies resultiert in einer Vielzahl an Energieniveaus (Abbildung 2.1). Die erste und stärkste Wechselwirkung ist die elektrostatische Coulomb-Wechselwirkung zwischen den drei 4f-Elektronen. Diese spaltet die 4f-Zustände um $\sim$ 10000 cm^{-1} auf, wie zum Beispiel zwischen den ^{4}I- und ^{4}F-Niveaus. Jedes dieser Niveaus ist zudem durch die Spin-Bahn-Wechselwirkung in Mannigfaltigkeiten mit dem Abstand $\sim$ 2000 cm^{-1} aufgeteilt. Dadurch entstehen die Grundniveaus und die unteren Laserniveaus der Laserübergänge (^{4}I-Niveaus) sowie die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Pump- und oberen Laserniveaus (^{4}F-Niveaus). Die schwächste Wechselwirkung ist die Wirkung des Kristallfeldes auf die 4f-Zustände. Der sogenannte Stark-Effekt ist, als Folge des Abschirmeffekts der $5s^2$- und $5p^6$-Elektronen auf die 4f-Elektronen, die effektiv den Einfluss des lokalen Kristallfeldes einschränken, auf Energieabstände von $\sim 200\ \mathrm{cm}^{-1}$ beschränkt. Zudem ist jede Atomlinie, die zu Übergängen zwischen diesen Niveaus gehört, thermisch verbreitert durch Elektronen-Phonon-Wechselwirkung, wobei die Schwingungszustände des Gitters mit den 4f-Zuständen gekoppelt sind. Aber auch hier schränkt der Abschirmeffekt der äußeren Elektronen die Größenordnung der thermischen Verbreiterung ein, so dass die Übergangslininen bei Raumtemperatur sehr schmal bleiben.

Die Benennung der Zustände folgt der $^{2S+1}\mathrm{L}_J$-Schreibweise. Dabei ist S die Spin-Quantenzahl, L die Drehimpuls-Quantenzahl und J die Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl. Daher gehört der Grundzustand $^4\mathrm{I}_{9/2}$ zu einem Zustand in dem $S = 3/2$, $L = 6$ und $J = 9/2$ sind. Jedes Niveau ist $(2J + 1)$-fach entartet, wobei die Quantenzahl m_J Werte von -J bis J in ganzzahligen Schritten annimmt. Die Symmetrie des Kristallfeldes bewirkt zudem, dass Zustände mit gleichem $|m_J|$ die gleiche Energie besitzen. Dadurch spaltet sich jedes $^{2S+1}L_J$-Niveau in $(2J+1)/2$ doppelt entartete Unterniveaus auf, weshalb man jedes Unterniveau als einzelnes nicht entartetes Niveau betrachten kann. Daher bestehen der Grundzustand $^4I_{9/2}$, das untere Laserniveau $^4I_{13/2}$ und das obere Laserniveau $^4F_{3/2}$ jeweils aus fünf, sieben und zwei Unterniveaus, wie in Abbildung 2.1 dargestellt.

Der Wirtskristall kann speziell nach seinen physikalischen Eigenschaften und seinem Einfluss auf die spektroskopischen Eigenschaften des Laserions ausgewählt werden. Die Größe des Dotierungsions wird ähnlich der Größe des Atoms, das im Wirtskristall durch dieses ersetzt wird, gewählt. Dadurch werden die Spannungen, die dadurch auf das Gitter ausgeübt werden, reduziert. Zudem wird dadurch eine wesentlich höhere Dotierung mit aktiven Ionen möglich. Für die Leistungsskalierung von Festkörperlasern ist es wichtig, dass dabei harte Materialien, die eine hohe Bruchspannung, hohe thermische Leitfähigkeit, eine geringe Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex und hohe optische Transparenz sowie geringe Streuverluste aufweisen, verwendet werden. Diese sollen gleichzeitig einfach und günstig herstellbar sein. Außerdem sind die Effekte der Struktur des Wirtsmaterials auf die Energieniveaus, die Absorptions- und Emissionswirkungsquerschnitte, die Fluoreszenzlebensdauer und die spektrale Linienbreite des aktiven Ions von großer Bedeutung.

Der Radius von Nd^{3+} ist um 5 % größer als der von Y^{3+}, weshalb hohe Dotierungen zu Kristallen mit hohen Spannungsintensitäten führen. Daher ist es von Vorteil,

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

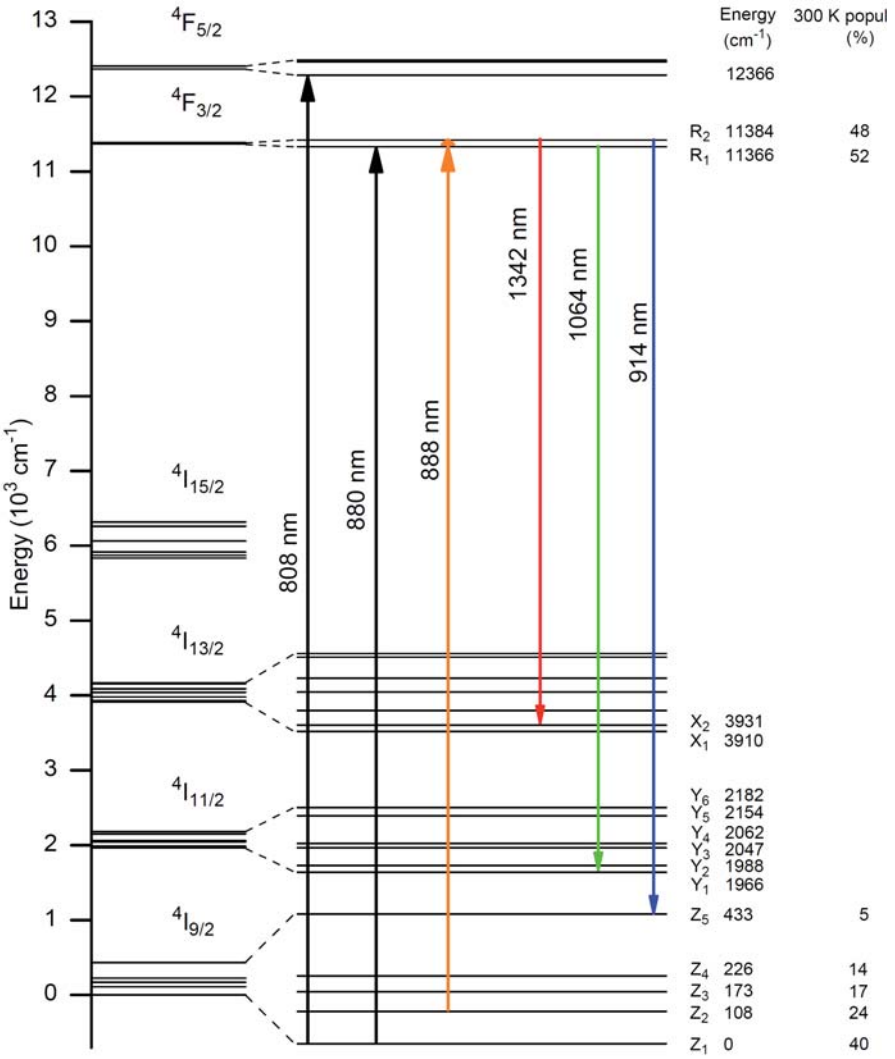

Abbildung 2.1: Energieniveauschema von Nd^{3+} in einem YVO_4 Wirtskristall. Eingezeichnet sind die wichtigsten Pump- und Laserübergänge [47].

dass die Absorptionskoeffizienten für die Pumpwellenlängen so groß sind, dass in den meisten Fällen nur Dotierung unter 1 *at.*% nötig sind. Da das Kristallgitter nur eine Stelle besitzt an der Neodym an Stelle von Yttrium eingesetzt werden kann, sieht jedes Neodymion, aufgrund der Ordnung der Kristallstruktur, dasselbe lokale Feld. Dadurch liegt eine rein homogene Linienverbreiterung vor. Im Gegensatz dazu weisen Wirtskristalle aus Glas eine ungeordnete Struktur und damit unterschiedliche Fehlstellen auf, was zu einer inhomogenen Verbreiterung der Linien führt. In Kristallen von sehr hoher

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Qualität, wie zum Beispiel den heutzutage erhältlichen Nd:YVO_4-Kristallen, können die Änderungen der lokalen Felder geringer sein als $0,5\ cm^{-1}$ [56]. Dies ist wesentlich kleiner als die homogene Verbreiterung der 1064 nm-Emissions-Linie bei Raumtemperatur von $6,9\ cm^{-1}$ [57].

Üblicherweise wird Nd:YVO_4 wegen seiner hohen Schmelztemperatur von 1810 °C mit Hilfe des Czochralski-Verfahrens in einem Iridium-Schmelztiegel unter einer inaktiven Gas-Atmosphäre gewachsen [58]. Dabei wird ein richtig orientierter Einzelkristall-Keim gedreht und nach und nach aus der Schmelze gezogen, so dass die Kristallisation auf der Oberfläche der Keim-Schmelze auftritt. Optimierte Wachs-Techniken erlauben heutzutage die Herstellung von qualitativ hochwertigen Einkristallstäben bis zu einer Höhe von 50 mm. Obwohl so 50 mm lange Kristalle hergestellt wurden, sind heute kommerziell Kristalle einer Länge von 30 mm erhältlich, die eine hohe homogene Qualität aufweisen [59].

2.1.2 Spektroskopische und thermo-mechanische Eigenschaften

Im vorherigen Abschnitt wurde beschrieben, wie sich die Wahl des verwendeten Dotierungsions und Wirtsmaterials sowohl auf die spektroskopischen als auch auf die thermo-mechanischen Eigenschaften des daraus resultierenden laseraktiven Materials auswirkt. Anhand dieser Eigenschaften soll ein Vergleich zwischen Nd:YVO_4 und den gebräuchlichsten ebenfalls Nd-dotierten Wirtsmaterialien, Nd:YAG und Nd:$GdVO_4$, durchgeführt werden. Dadurch wird deutlich, warum in den folgenden Experimenten zur Leistungsskalierung von Festkörperlasern bei $1,3\ \mu m$ Nd:YVO_4 verwendet wird.

Dazu sind in Tabelle 2.1 die wichtigsten Materialparameter für die drei zu vergleichenden laseraktiven Materialien aufgetragen. Da diese Arbeit auf die Realisierung eines Lasersystems abzielt, das Strahlung bei einer Wellenlänge von $1,3\ \mu m$ emittiert, kommen als laseraktive Medien nur Nd-dotierte Wirtsmaterialien in Frage, weil die Wellenlänge der Laserübergänge hauptsächlich durch die Wahl des Dotierungsions vorgegeben wird. Dabei entspricht der $^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$-Übergang bei Nd:$YVO_4$ und Nd:$GdVO_4$ einer Emissionswellenlänge von 1342 nm und bei Nd:YAG einer Emissionswellenlänge von 1319 nm.

Der Vergleich der thermo-mechanischen Eigenschaften zeigt zum einen, dass Nd:YAG eine wesentlich höhere Bruchspannung aufweist als die anderen beiden Materialien. Die Bruchspannung liegt dabei für Nd:YAG zwischen 220 und 270 MPa und für Nd:YVO_4 und Nd:$GdVO_4$ fast identisch bei ca. 50 MPa. Dies führt dazu, dass Nd:YAG mit einer

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.