

**Abstimmbare Einfrequenz-Strahlquellen
hoher Stabilität im infraroten, sichtbaren
und ultravioletten Spektralbereich**

Vom Fachbereich Physik
der Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor der Naturwissenschaften

- Dr. rer. nat. -

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Phys. Markus Bode
geboren am 17.03.1970 in Hildesheim

1999

Zusammenfassung

Markus Bode

Abstimmbare Einfrequenz-Strahlquellen hoher Stabilität im infraroten, sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich

Schlagwörter: Frequenzkonvertierte diodengepumpte Festkörperlaser, Einfrequenz-Betrieb, Optisch-parametrische Oszillation

Frequenzkonvertierte diodengepumpte Festkörperlaser im Einfrequenz-Betrieb besitzen das Potential, in zahlreichen wissenschaftlichen und meßtechnischen Anwendungsbereichen die bislang eingesetzten Gaslasersysteme zu ersetzen. Ziel der vorliegenden Arbeit war die Realisierung geeigneter abstimmbarer Einfrequenz-Strahlquellen in kurzwelligen Spektralbereichen mit hoher Gesamteffizienz auf der Basis nichtplanarer Nd:YAG Miniatur-Ringlaser.

So wurde ein kompaktes, abstimmbares Einfrequenz-Lasersystem im grünen Spektralbereich mit hoher Effizienz realisiert, welches eine maximale kontinuierliche Ausgangsleistung von 1.2 Watt bei 532 nm mit beugungsbegrenzter Strahlqualität und hoher Frequenz- und Amplitudenstabilität erreicht. Die Emissionsfrequenz ist kontinuierlich über 15 bis 20 GHz abstimmbar, erstmals wurde zudem eine schnelle, dreieckförmige Frequenzabstimmung bei 532 nm mit bis zu 5 kHz über einen Frequenzbereich von mehr als einem GHz demonstriert.

Im blauen Spektralbereich konnte erstmalig ein hoch effizientes Einfrequenz-Lasersystem realisiert werden, welches eine kontinuierliche Ausgangsleistung von 0.5 Watt bei 473 nm erzielt und über 20 GHz modensprungfrei abstimmbar ist. Durch resonante Frequenzverdopplung des Einfrequenz-Lasersystems im grünen Spektralbereich konnte zudem eine Ausgangsleistung von über 100 mW im ultravioletten Spektralbereich bei 266 nm erzielt werden.

Zur Demonstration der hohen Frequenz- und Amplitudenstabilität wurde ein doppelt-resonanter optisch-parametrischer Oszillator im Dauerstrich-Betrieb mit extrem schmaler Linienbreite aufgebaut. Hier konnte erstmalig stabiler Einfrequenz-Betrieb ohne Modensprünge über mehrere Stunden in Kombination mit einer hohen Ausgangsleistung von nahezu 0.4 Watt demonstriert werden. Das erzeugte Frequenzpaar war hierbei im gesamten abgedeckten Wellenlängenbereich (120 nm) jeweils über 8 GHz ohne Modensprünge abstimmbar.

Parallel dazu wurden frequenzkonvertierte, passiv gütegeschaltete Einfrequenz-Lasersysteme aufgebaut, welche ausgehend von Pulsspitzenleistungen zwischen 40 und 50 kW bei 1064 nm, bis zu 22 kW Pulsspitzenleistung mit 240 mW mittlerer Leistung bei 532 nm und über 10 kW Pulsspitzenleistung mit 110 mW mittlerer Leistung bei 266 nm erreichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden somit einsatzfähige Strahlquellen für zahlreiche wissenschaftliche und meßtechnische Anwendungen realisiert, welche abstimmbare, kurzweilige Strahlung im Einfrequenz-Betrieb mit hoher Stabilität und Ausgangsleistung erfordern.

Abstract

Markus Bode

Tunable single-frequency light sources with high stability in the infrared, visible and ultraviolet spectral region

Key words: Frequency-converted diode-pumped solid-state lasers, single-frequency operation, optical parametric oscillation

Frequency-converted diode-pumped solid-state lasers in single-frequency operation are attractive to substitute gas laser systems like argon ion or HeCd lasers in a growing number of scientific and industrial applications. This thesis deals with the development of highly efficient tunable single-frequency laser sources in the visible and ultraviolet spectral region based on nonplanar Nd:YAG miniature ring lasers in the infrared, suitable to fulfil this aim.

Using a resonant external cavity, a compact, frequency-tunable single-frequency laser system in the green spectral region with high overall efficiency has been developed, generating as much as 1.2 Watts continuous wave output power at 532 nm with diffraction limited beam quality and high amplitude and frequency stability. The continuous tuning range covers 15 - 20 GHz, moreover a fast frequency tuning at 532 nm with a chirp modulation of 5 kHz and a tuning range of more than 1 GHz has been demonstrated for the first time.

A highly efficient single-frequency laser system in the blue spectral region has been developed by a similar technique, combining for the first time a continuous wave output power of 0.5 Watts at 473 nm with a modehop-free tuning range of 20 GHz. Furthermore, fourth harmonic generation of the infrared laser at 1064 nm has been demonstrated, generating more than 100 mW of tunable ultraviolet radiation at 266 nm in single-frequency operation.

To demonstrate the high amplitude and frequency stability of the green laser system, it was used successfully as a pump source for a continuous wave doubly resonant optical parametric oscillator, known for its extremely high demands in these categories. Stable operation on a single axial mode pair without mode hops was achieved for several hours combined for the first time with a high output power of 0.4 Watts. Continuous modehop-free tuning over as much as 8 GHz was demonstrated, the overall tuning range was 120 nm.

In addition, frequency-converted passively Q -switched single-frequency laser systems have been developed. Starting with peak powers of 40 - 50 kW at 1064 nm, up to 22 kW peak power combined with 240 mW average output power at 532 nm and more than 10 kW peak power with 110 mW average output power at 266 nm have been demonstrated.

In conclusion, a variety of compact and efficient laser sources have been realized, suitable for various scientific and industrial applications, that require tunable single-frequency radiation in the visible or ultraviolet spectral region with high output power and stability.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Festkörperlaser im Einfrequenz-Betrieb	5
2.2	Frequenzkonversion in nichtlinearen Kristallen	7
2.2.1	Näherungslösungen für ebene Wellen	9
2.2.2	Phasenanpassung	11
2.2.3	Berücksichtigung der Fokussierung	16
2.3	Optimierung der Konversionseffizienz	20
2.3.1	Leistungsüberhöhung im externen Resonator	21
2.3.2	Impedanzanpassung	26
2.3.3	Geometrische Optimierung	28
2.4	Aktive Frequenzstabilisierung	31
2.4.1	Regelsignalerzeugung durch Frequenzmodulation	33
2.4.2	Regelsignalerzeugung durch Phasenmodulation	34
3	Nd:YAG Miniatur-Ringlaser	37
3.1	Das aktive Lasermaterial Nd:YAG	37
3.2	Monolithische Nd:YAG Ringlaser	39
3.3	Vier-Niveau-Laserbetrieb bei 1064 nm	40
3.3.1	Aufbau und Laserkenndaten	40
3.4	Quasi-Drei-Niveau-Laserbetrieb bei 946 nm	41
3.4.1	Aufbau und Laserkenndaten	42
3.5	Amplituden- und Frequenzstabilität	43
3.5.1	Aktive Frequenzabstimmung	44

4	Resonante Frequenzkonversion	45
4.1	Einfrequenz-Betrieb im grünen Spektralbereich	45
4.1.1	Geeignete nichtlineare Kristalle	46
4.1.2	Experimenteller Aufbau	47
4.1.3	Laserkenndaten	49
4.1.4	Schnelle Frequenzabstimmung	52
4.2	Einfrequenz-Betrieb im blauen Spektralbereich	54
4.2.1	Geeignete nichtlineare Kristalle	54
4.2.2	Experimenteller Aufbau	55
4.2.3	Laserkenndaten	56
4.3	Einfrequenz-Betrieb im ultravioletten Spektralbereich	58
4.3.1	Geeignete nichtlineare Kristalle	58
4.3.2	Experimenteller Aufbau	59
4.3.3	Laserkenndaten	60
4.4	Doppeltresonanter optisch-parametrischer Oszillator	61
4.4.1	Theoretische Grundlagen	61
4.4.2	Experimenteller Aufbau	65
4.4.3	Leistungskenndaten	68
4.4.4	Abstimmverhalten	69
5	Gepulste Nd:YAG Miniatur-Ringlaser	71
5.1	Güteschaltung mittels sättigbarer Absorber	72
5.1.1	Geeignete sättigbare Absorber für 1064 nm	74
5.1.2	Charakterisierung verschiedener Cr ⁴⁺ :YAG-Absorber	75
5.2	Gütesgeschaltete Strahlquellen im Einfrequenz-Betrieb	76
5.2.1	Aufbau und Laserkenndaten	77
5.3	Frequenzkonversion in den sichtbaren Spektralbereich	79
5.3.1	Aufbau und Laserkenndaten	79
5.4	Frequenzkonversion in den ultravioletten Spektralbereich	81
5.4.1	Aufbau und Laserkenndaten	82
6	Zusammenfassung und Ausblick	85
A	Dispersionsformeln	89
A.1	Temperaturabhängige Dispersion in 5%MgO:LiNbO ₃	89
A.2	Temperaturabhängige Dispersion in KNbO ₃	90

Abbildungsverzeichnis

91

Tabellenverzeichnis

93

Literaturverzeichnis

95

1 Einleitung

Die mit zunehmender Miniaturisierung und Integrationsdichte in der Fertigungstechnik gestiegenen Anforderungen an Qualität und Präzision erfordern eine optimierte Überwachung der Produktion mit immer geringeren Toleranzwerten. Die hierzu eingesetzten Meß- und Prüfverfahren haben *online* und zerstörungsfrei zu erfolgen, um den Produktionszyklus möglichst minimal zu beeinflussen oder zu verzögern. Obwohl geeignete laseroptische Meßverfahren mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung auf der Basis interferometrischer Längen- und Formvermessung schon seit vielen Jahren bekannt sind, konnten sich diese bislang in der Fertigungsmeßtechnik und der Qualitätskontrolle nicht durchsetzen. Ursache hierfür ist eine mangelnde Verfügbarkeit geeigneter kohärenter Strahlquellen. So konnte bisher insbesondere die für viele Anwendungen geforderte Kombination einer hohen Ausgangsleistung im Einfrequenz-Betrieb mit einer schnellen, definierten Abstimmung der Emissionsfrequenz nur ungenügend gewährleistet werden.

Zwar stehen im nahinfraroten Spektralbereich kompakte und zuverlässige Einfrequenz-Strahlquellen zur Verfügung, welche die genannten Kriterien erfüllen [1], die Emissionswellenlänge im Bereich um $1\ \mu\text{m}$ erfordert jedoch die Verwendung von speziellen Detektoren für diesen Spektralbereich (z. B. InGaAs), was bisher nur in einigen wenigen Spezialfällen Anwendung findet. Eine kürzere Wellenlänge im sichtbaren Spektralbereich sorgt dagegen für eine höhere Auflösung sowie ein deutlich verbessertes Signal- zu Rausch-Verhältnis und erlaubt den Einsatz von Standard-Detektoren aus der Massenproduktion. Die Geschwindigkeits- und Strömungsmeßtechnik (*Laser-Doppler-Velocimetrie*) profitiert hierbei beispielsweise von größeren Streuquerschnitten, bei anderen Anwendungen wie der flächenhaften holographischen Schwingungsanalyse oder der Formvermessung ausgedehnter Körper erlaubt sie den Einsatz von CCD-Kameras, welche im sichtbaren Spektralbereich ihre größte Effizienz aufweisen. Ein positiver Nebeneffekt ist zudem die Visualisierung der zur Messung eingesetzten Laserstrahlung, was insbesondere unter dem Aspekt der Lasersicherheit, aber auch unter psychologischen Gesichtspunkten ein nicht zu vernachlässigender Faktor ist.

Der Bereich kontinuierlich emittierender Laser im sichtbaren Spektralbereich, wie sie bisher für diese Art von Anwendungen, aber auch zur Anregung von anderen Lasern oder Verstärkern eingesetzt werden, wurde in den vergangenen Jahrzehnten durch Gaslasersysteme dominiert. Hier sind insbesondere Argon-Ionen-, Krypton-Ionen- sowie Helium-Cadmium-

Laser zu nennen, deren Technologie noch aus den Anfangstagen der Lasertechnik stammt. Dies läßt sich speziell an der geringen Gesamteffizienz, der Systemgröße, der kurzen Lebensdauer sowie der mangelnden Amplituden- und Frequenzstabilität ablesen. Erfordert die Anwendung darüber hinaus noch den Betrieb auf einer einzigen optischen Frequenz und eine Stabilisierung oder Abstimmbarkeit dieser Frequenz, wie beispielsweise die *Global-Doppler-Technik*, so sind aufwendige resonatorinterne Komponenten erforderlich.

Eine in den letzten Jahren immer ernster zu nehmende Alternative hierzu bilden *diodengepumpte Festkörperlaser* [2], welche durch Methoden der *nichtlinearen Optik* in kurzwelligere Spektralbereiche konvertiert werden. Die Fortschritte in diesem Bereich beruhen sowohl auf Weiterentwicklungen der Laser als auch auf dem Gebiet der nichtlinearen Optik. Diodengepumpte Festkörperlaser stellen heute bereits eine etablierte Technologie dar, die durch neue Materialien und Konzepte ständig an kommerzieller Bedeutung gewinnt [3]. Dies spiegelt sich in der Kompaktheit der Systeme, der Ausgangsleistung sowie der Stabilität wider.

Auf dem Gebiet der nichtlinearen Optik lassen sich die Fortschritte in den letzten Jahren an der steigenden Kristallqualität, der Kommerzialisierung von neuartigen optisch nichtlinearen Kristallen sowie gänzlich neuen Konzepten festmachen. Hier sind beispielsweise periodisch gepolte Kristalle zur *Quasi-Phasenanpassung* zu erwähnen, die durch ihre großen nichtlinearen Koeffizienten und die Möglichkeit zur individuellen Anpassung an die Strahlquelle von steigendem Interesse sind [4]. Aufgrund mangelnder Verfügbarkeit und zahlreicher technischer Probleme, die bislang nur sehr unzulänglich gelöst sind, ist ihr praktischer Einsatz jedoch zur Zeit stark eingeschränkt¹. Durch die erreichten Qualitätsstandards sollten sich aber auch mit konventionellen optisch nichtlinearen Kristallen neuartige Strahlquellen realisieren lassen, welche die Kompaktheit, Effizienz und Stabilität diodengepumpter Festkörperlaser vom nahinfraroten in den sichtbaren und den ultravioletten Spektralbereich übertragen [5].

Zwar existiert eine Reihe von Konzepten zur effizienten Frequenzkonversion diodengepumpter Festkörperlaser, von denen die Platzierung des optisch nichtlinearen Kristalls im Laserresonator die bekannteste ist [6], diese sind jedoch zumeist nur sehr begrenzt kompatibel mit den Anforderungsprofilen der lasergestützten Meßtechnik nach stabilem Einfrequenz-Betrieb mit definierter Abstimmbarkeit der Emissionsfrequenz. Eine modifizierte Realisierung dieses Konzepts mit deutlich besserer Stabilität basiert auf dem Einsatz von Lasersystemen mit Resonatorlängen, deren Modenabstand die Verstärkungsbandbreite des Lasermaterials übersteigt [7], in Kombination mit *optisch kontaktierten* nichtlinearen Kristallen. Die Ausgangsleistung im Einfrequenz-Betrieb dieser sog. *Mikrochip*-Laser ist jedoch durch das kleine aktive Volumen und thermooptische Probleme auf Werte um 100 mW begrenzt, was insbesondere für flächenhafte Meßverfahren nicht ausreichend ist. Zudem ist eine kontinuierliche Frequenzabstimmung nur schwer zu realisieren.

¹Nach einer Faustregel dauert die Entwicklung eines nichtlinearen Kristalls 10 Jahre und kostet US\$ 10 Mio.

Eine alternative Technik hierzu ist die resonante Überhöhung der Strahlung der infraroten Fundamentalwelle in einem externen Resonator, in dem sich der optisch nichtlineare Kristall befindet [8]. Dies erfordert zwar eine elektronische Stabilisierung der Laserfrequenz auf eine der Resonanzfrequenzen der Kavität oder eine entsprechende Regelung der Resonatorlänge. Wie aus der Literatur bekannt, können aber mit dieser Methode hohe Konversionseffizienzen von deutlich über 50 % mit kontinuierlich emittierenden Einfrequenz-Lasern erreicht werden [9]. Kompakte und zuverlässige Einfrequenz-Strahlquellen dieser Art sind jedoch bis zum Beginn der vorliegenden Arbeit nur mit Hilfe monolithischer Verdopplerresonatoren demonstriert worden, deren Ausgangsleistung im sichtbaren Spektralbereich zumeist zwischen 100 und 200 mW liegt [10]. Höhere Leistungen führen zu thermooptischen und photorefraktiven Effekten im Kristall, welche die Resonator-Einkopplung verschlechtern und die gewöhnlich verwendete Stabilisierung über den elektrooptischen Effekt erschweren. Da keine beweglichen Resonator-Komponenten vorhanden sind, kann die Stabilisierung alternativ nur über den Pumplaser selbst erfolgen [11], wodurch dessen Frequenzstabilität negativ beeinflusst wird und die Möglichkeit zur aktiven Frequenzabstimmung verloren geht.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung und Bereitstellung von hoch effizienten kohärenten Einfrequenz-Lasersystemen im kontinuierlichen und gepulsten Betrieb, welche die Limitierungen der existierenden Konzepte überwinden und erstmalig die Kombination einer hohen Ausgangsleistung im Einfrequenz-Betrieb mit einer schnellen, definierten Abstimmung der Emissionsfrequenz im infraroten, sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich für wissenschaftliche und meßtechnische Anwendungen zur Verfügung stellen.

Die Grundlage hierfür bilden monolithische bzw. quasi-monolithische Nd:YAG Miniatur-Ringlaser [1], [12], welche auf verschiedenen Laserübergängen im nahinfraroten Spektralbereich Ausgangsleistungen im Watt-Bereich mit hoher Stabilität, geringer Linienbreite sowie der Möglichkeit zur Frequenzabstimmung bereitstellen. Durch geeignete Charakterisierung und Adaption der Anregungs- und Resonatorgeometrie erfolgt eine Optimierung dieser Systeme zu hohen Ausgangsleistungen im jeweiligen Wellenlängenbereich sowie eine Anpassung an die externen Kavitäten durch Qualifizierung geeigneter elektronischer Stabilisierungsverfahren.

Ausgehend von einer vollständigen theoretischen Modellierung werden Optimierungsstrategien für resonante Frequenzkonversionseinheiten entwickelt, welche eine Konzeptionierung unter den Gesichtspunkten der Minimierung der passiven Verluste, der Optimierung der erreichbaren Konversionseffizienz sowie insbesondere einer möglichst vollständigen Übertragung der charakteristischen Eigenschaften der eingesetzten Nd:YAG Miniatur-Ringlaser auf die erzeugte Oberwelle erlauben. Hierzu zählt neben einer hohen Frequenz- und Amplitudenstabilität die Möglichkeit zur schnellen, definierten Frequenzabstimmung sowie die Beibehaltung der *beugungsbegrenzten* Strahlqualität.

Parallel dazu wird die Erzeugung einfrequenter Strahlung im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich auf der Basis von nichtplanaren Nd:YAG Miniatur-Ringlasern im gepulsten Betrieb untersucht. Dieser läßt sich beispielsweise durch passive Güteschaltung mit Hilfe sog. *sättigbarer Absorber* realisieren [13]. Durch theoretische und experimentelle Optimierung dieser Lasersysteme zu hohen Pulsspitzenleistungen werden die Voraussetzungen geschaffen, welche eine effiziente Frequenzkonversion im einfachen Durchgang ermöglichen.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit experimentell realisierten abstimmbaren Einfrequenz-Lasersysteme vom nahinfraroten bis zum ultravioletten Spektralbereich erfüllen erstmalig die beschriebenen Anforderungsprofile der laseroptischen Meßtechnik sowie einer Vielzahl wissenschaftlicher Problemstellungen und stellen damit das Potential effizient frequenzkonvertierter Festkörperlaser im Einfrequenz-Betrieb für diese Anwendungsbereiche eindrucksvoll unter Beweis. Die praktische Einsatzfähigkeit konnte bereits erfolgreich in einigen exemplarischen Anwendungen demonstriert werden. Durch die Bereitstellung der physikalischen und technischen Grundlagen kann somit der Generationswechsel von der Röhrentechnologie der sechziger Jahre zu kompakten, effizienten Strahlquellen auf der Basis von Festkörperlaser-Technologie vollzogen werden [3].