

**Diodengepumpte Festkörperlaser  
im Spektralbereich um  $2\mu\text{m}$   
für Anwendungen in der Lasermedizin**

Vom Fachbereich Physik  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades

Doktor der Naturwissenschaften  
- Dr. rer. nat. -

genehmigte  
DISSERTATION

von:

Dipl.-Phys. Michael Fiebig  
geboren am 05.03.1968 in Gütersloh

1998

Referent: Prof. Dr. H. Welling

Korreferent: Prof. Dr. M. Kock

Tag der Promotion: 29.05.1998

## **Abstract**

Michael Fiebig

### **Diodengepumpte Festkörperlaser im Spektralbereich um 2 $\mu\text{m}$ für Anwendungen in der Lasermedizin**

Festkörperlaser für den Spektralbereich um 2 $\mu\text{m}$  finden Anwendungsgebiete in der Medizin oder optischen Meßtechnik. Als aktive Medien eignen sich besonders die Seltenen Erden Thulium und Holmium. Von entscheidender Bedeutung bei der Entwicklung derartiger Lasersysteme ist die Kontrolle der thermischen Eigenschaften und der Reabsorptionsverluste im aktiven Medium.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden detaillierte theoretische Untersuchungen angestellt, die eine zutreffende Beschreibung des Lasersystems ermöglichten.

Ausgehend von den theoretischen Modellierungen wurden Lasersysteme konzipiert und charakterisiert. Anhand dieser Systeme wurden Laserexperimente durchgeführt, die zur Verifizierung der Modellierungen dienten. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Laserkristalle mit unterschiedlichen Eigenschaften charakterisiert und die optimalen Laserparameter ermittelt. Die Beschreibung der thermooptischen Eigenschaften, im Einklang von Theorie und Experiment, ermöglichte die Reduzierung der thermischen und mechanischen Belastungen der Laserstäbe.

Auf der Grundlage dieser Arbeiten gelang die Entwicklung eines effizienten und überaus kompakten Lasersystems bei 2 $\mu\text{m}$ . Ausgangsleistungen über 135W und differentielle Wirkungsgrade von 40% wurden erzielt. Der Gesamtwirkungsgrad optisch zu optisch betrug über 30%. Weiterführende Untersuchungen ermöglichten erstmals die Demonstration des gütegeschalteten bzw. frequenzselektiven Laserbetriebes mit einem derartigen System.

In Voruntersuchungen wurde das Einsatzpotential des Lasersystems für medizinische Anwendungen eruiert. Hierzu wurden erstmalig Laser-Gewebewechselwirkungen an biologischen Geweben unter Einfluß hoher kontinuierlicher Leistungsdichten bei 2 $\mu\text{m}$  untersucht.

Schlagworte: Diodengepumpte Festkörperlaser, Quasi-3-Niveau-System, Lasermedizin

## **Abstract**

Michael Fiebig

Diode-pumped solid-state-lasers  
in the spectral region at 2  $\mu\text{m}$   
for medical applications

Solid state lasers in the spectral region at 2 $\mu\text{m}$  are of interest for a number of applications including medicine and remote sensing. The purpose of this work was the development and characterization of a diode-pumped continuous wave laser with high output power. The development of laser systems based on Thulium and Holmium materials is difficult due to the reabsorption losses and the thermal management.

In this work theoretical models were established in order to characterize and to optimize the laser parameters. Based on the results of the simulations efficient laser systems have been designed and investigated. Within these investigations the optimal laser rod parameters have been determined. These parameters were used to improve the simulations. The complete and correct description of the laser properties enabled to decrease the thermal loading and mechanical stresses.

Finally the experimental and theoretical investigations served to create an efficient and compact solid state laser system at 2 $\mu\text{m}$ . An continuous wave output power of more than 135W and a slope efficiency of 40% were achieved. The overall optical conversion efficiency of the device was more than 30%. Additional laser experiments demonstrated a tunable and q-switched operation of such a laser system for the first time.

The cw Tm<sup>3+</sup>:YAG laser was used for the first time for basic investigations in order to characterize the laser tissue interaction. Therefore biological tissue was irradiated at different intensities (up to 65kW/cm<sup>2</sup>) and irradiation times.

Keywords: Diode-pumped solid state lasers, quasi-3-level system, laser medicine

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Festkörperlaser für den Spektralbereich um 2µm</b> .....	<b>5</b>
2.1 Anforderungsprofil.....	5
2.2 Stand der Technik und Entwicklung.....	9
<b>3 Auswahl und Charakterisierung der Laserkristalle</b> .....	<b>13</b>
3.1 Tm <sup>3+</sup> :YAG: Anregungsschemata und Wechselwirkungsprozesse .....	13
3.2 Spektroskopie.....	17
<b>4 Theoretische Beschreibung des Festkörperlaser systems</b> .....	<b>21</b>
4.1 Anregungskonfiguration.....	21
4.2 Tm <sup>3+</sup> :YAG: Ein quasi-3-Niveau-System.....	24
4.2.1 Ratengleichungen.....	25
4.2.2 Theoretische Untersuchungen zur Laserschwelle .....	29
4.3 Thermische Effekte .....	33
4.3.1 Thermische Linse und Doppelbrechung .....	35
4.3.2 Modellierung der Temperaturverteilung.....	40
<b>5 Experimentelle Untersuchungen am Lasersystem</b> .....	<b>44</b>
5.1 Evaluierung der Laserparameter .....	44
5.1.1 Apparativer Aufbau.....	44
5.1.2 Verifikation der thermischen Eigenschaften .....	47
5.1.2.1 Depolarisation .....	48
5.1.2.2 Interferometrische Bestimmung des radialen Temperaturprofils.....	49
5.1.3 Untersuchung der laserspezifischen Kenndaten.....	54
5.1.3.1 Kristallparameter .....	55
5.1.3.2 Thermisches Verhalten und Strahlqualität.....	65

5.1.4 Bewertung der Ergebnisse.....	71
5.2 Laserbetrieb hoher Ausgangsleistung.....	72
5.2.1 Aufbau.....	72
5.2.2 Ergebnisse.....	75
5.2.3 Untersuchungen zu Güteschaltung und Abstimmverhalten.....	78
5.3 Perspektiven für Quasi-3-Niveau-Systeme.....	83
<b>6 Eruierung des medizinischen Einsatzpotentials.....</b>	<b>87</b>
6.1 Grundlagen: Laser-Gewebewechselwirkungen.....	87
6.2 Experimentelle Methoden.....	92
6.3 Ergebnisse und Diskussion.....	93
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>99</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>103</b>

## 1 Einleitung

Kurz nach der Realisierung des ersten Lasers in den sechziger Jahren wurden die verschiedensten Anwendungen für Lasersysteme im Bereich der Medizin vorgeschlagen, die jedoch aufgrund damals erreichbarer Systemparameter nicht intensiv verfolgt wurden. Neben der unbefriedigenden Ausgangsleistung und der niedrigen Effizienz limitierte die mangelnde Zuverlässigkeit den Einsatz der ersten Lasersysteme. Erst durch die stetige Weiterentwicklung von blitzlampen- oder bogenlampengepumpten Festkörperlasern sowie spezieller Gaslaser in den achtziger Jahren erfuhr der Laser als Werkzeug wachsende Bedeutung, und neue Anwendungsmöglichkeiten wurden aufgezeigt [Man92, Moo87, Pon95, Ree93].

Heutzutage gilt der Laser in der Medizin als Alternative zu dem mechanischen Skalpell. Die Laserstrahlung induziert aufgrund thermischer Prozesse eine blutungsstillende Koagulationszone, und minimal invasive Eingriffe werden mit diesem Instrument möglich. Aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften und Wechselwirkungsprozesse mit den zu bearbeitenden Geweben kommen Lasersysteme im infraroten Spektralbereich zwischen  $2\mu\text{m}$  und  $11\mu\text{m}$  zum Einsatz. Ausgezeichnet haben sich hier im besonderen der Holmium-Laser ( $2.1\mu\text{m}$ ), der Erbium-Laser ( $2.94\mu\text{m}$ ) und der  $\text{CO}_2$ -Laser ( $10.6\mu\text{m}$ ).

Der Erbium-Laser wird überwiegend in der Mikrochirurgie genutzt, bei der es vornehmlich auf geringe Schädigungsbereiche und eine hohe Präzision ankommt. Ein in der Lasermedizin ebenso weitverbreiteter Gaslaser stellt der sehr effiziente und im Aufbau überaus kompakte  $\text{CO}_2$ -Laser bei  $10.6\mu\text{m}$  dar. Der  $\text{CO}_2$ -Laser erlaubt einen kontinuierlichen oder gepulsten Betriebsmodus und wird unter anderem erfolgreich in der Orthopädie, Dermatologie oder Otorhinolaryngologie eingesetzt [Böhm, Fuchs, Kla91, Sei91, Ulrich]. Der kontinuierlich arbeitende  $\text{CO}_2$ -Laser wird vor allem in Bereichen eingesetzt, bei denen ein großes Gewebavolumen abgetragen werden muß. Hierbei kommen Systeme mit einer Leistung zwischen 50W und 100W zum Einsatz [Ber89]. An seine Grenzen in der Anwendung stößt der  $\text{CO}_2$ -Laser durch die Absorptionseigenschaften optischer Gläser, die eine verlustarme Führung der Laserstrahlung durch Lichtleitfasern verhindern. Hierdurch wird ein konstruktiv aufwendiger Spiegelgelenkarm erforderlich, der zudem in der Benutzung unhandlich ist.

Eine Alternative zum kontinuierlich arbeitenden  $\text{CO}_2$ -Laser stellt ein Holmium- oder Thulium-Laser im Dauerstrichbetrieb dar. Der Holmium Laser verursacht im gepulsten Betrieb im Vergleich zum  $\text{CO}_2$ -Laser um ein bis zwei Größenordnungen tiefere thermische Schädigungs-

zonen im Gewebe. Im kontinuierlichen Laserbetrieb gleichen sich jedoch die durch die verschiedenen Lasertypen verursachten thermischen Schädigungszonen, begründet durch die Wärmeleitung im Gewebe. Einen Hauptvorteil des Holmium- oder Thulium-Lasers stellt die verlustfreie Führung der Laserstrahlung durch relativ kostengünstige Quarz-Quarz-Lichtleiter dar, die eine direkte und einfache Leitung der Laserstrahlung an den Bearbeitungsort ermöglicht [LISA].

Zu Beginn dieser Arbeit waren noch keine effizienten Hochleistungslaser im kontinuierlichen Laserbetrieb bei  $2\mu\text{m}$  bekannt. Es fehlten Konzepte, welche die hohe thermische Belastung des aktiven Lasermediums, die sich unmittelbar auf die Lasereigenschaften auswirkt, reduzieren. So tritt bei der optischen Anregung durch Blitz- oder Bogenlampen nur ein geringer Überlapp zwischen dem Emissionsspektrum der Lampen mit den Absorptionsbanden der laserrelevanten Dotierungen auf. Hierdurch sind nur geringe Effizienzen zu erzielen, und ein großer Anteil der Pumpleistung wird in Wärme umgesetzt. Ein kontinuierlicher Hochleistungslaserbetrieb mittels Anregung durch Bogenlampen konnte daher nur bei negativen Temperaturen bis in den kryogenen Bereich erzielt werden.

Erst durch den Einsatz von Diodenlasern als Pumpquelle konnten diese Diskrepanzen prinzipiell überwunden werden. Durch die geringe spektrale Breite der Laseremission von wenigen Nanometern und die mögliche Anpassung an die Absorptionsbanden des Lasermediums reduziert sich die thermische Belastung des aktiven Lasermaterials. An Festkörperlasern im nahinfraroten Spektralbereich konnten diese Vorteile eindrucksvoll nachgewiesen werden.

Diodengepumpte Festkörperlaser auf der Basis von Thulium und Holmium dotierten Wirtskristallen im Wellenlängenbereich um  $2\mu\text{m}$  sind von mehreren Arbeitsgruppen demonstriert worden [Fuk92, Mah92, McG92]. Hierbei wurden die bekannten longitudinalen oder transversalen Anregungskonfigurationen verfolgt, die sich hervorragend für Nd:YAG-Hochleistungslaser bewährt haben. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf die Thulium- und Holmium-Lasersysteme ist durch die thermische Aufladung und starke Reabsorptionsverluste für die Laserstrahlung jedoch nicht möglich.

Neben den ausführlichen experimentellen Untersuchungen wurden von verschiedenen Forschungsgruppen auch theoretische Simulationen des Laserprozesses durchgeführt, um diese Probleme der Systeme theoretisch zu erfassen [Kal91, Qua91, Rus96, Sou97]. Erstmals wurde

hierbei von R. Beach ein neuer Weg beschriften [Bea96]. In dieser Arbeit wurde eine neuartige Anregungsgeometrie vorgeschlagen, die dem Prinzip des Faserlasers ähnelt und auf kristalline Lasermedien übertragen wurde. Die Untersuchungen resultierten erstmals in einem  $2\mu\text{m}$ -Festkörperlaser mit hohen Ausgangsleistungen im kontinuierlichen Betrieb, der jedoch aufgrund thermischer Belastungen nur bis zu einer Stunde stabil aufrecht erhalten werden konnte. Zudem lag die Betriebstemperatur des Systems bei  $3^\circ\text{C}$ .

Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die theoretische und experimentelle Entwicklung und Charakterisierung eines diodengepumpten kontinuierlich arbeitenden Festkörperlasersystems für den Spektralbereich um  $2\mu\text{m}$ . Das Lasersystem sollte sich durch eine hohe Effizienz, Kompaktheit und Zuverlässigkeit auszeichnen, um die Anforderungen in der Lasermedizin zu erfüllen.

Die Entwicklung eines derartigen Lasersystems erforderte theoretische und experimentelle Untersuchungen. Die theoretischen Modelle sollten den Einfluß der thermischen Effekte und der Reabsorption auf die Lasereigenschaften beschreiben. Um die optimalen Laserstabparameter zu ermitteln, war die theoretische Evaluierung der Schwellpumpleistung und des differentiellen Wirkungsgrades notwendig. Erstmals beinhalten die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen auch die spektroskopischen und temperaturabhängigen Eigenschaften der aktiven Materialien. Die Modellierung der Temperaturverteilung diente zur Bestimmung der geeigneten Lasergeometrie und der optimalen Dotierung, um in der Konsequenz die thermischen Belastungen des Lasermediums zu minimieren und zu homogenisieren.

Auf der Basis der theoretischen Studien wurden erste Lasersysteme mittlerer Ausgangsleistung konzipiert. Experimentelle Analysen an den Lasersystemen sollten die Modelle verifizieren. Zu diesem Zweck wurden Messungen an Laserstäben mit unterschiedlicher Geometrie und Dotierung durchgeführt und die für den Laserbetrieb optimalen Parameter evaluiert. Die Arbeiten sollten in einem Hochleistungslasersystem mit Ausgangsleistungen über  $50\text{W}$  resultieren.

Das durch die theoretischen und experimentellen Arbeiten optimierte Lasersystem sollte auf seine Eignung des Lasersystems für einen abstimmbaren oder gütegeschalteten Laserbetrieb überprüft werden. Die Grundlagen hierzu wurden erarbeitet und verschiedene Methoden qualifiziert.

Abschließend wurde erstmalig in grundlegenden Forschungsarbeiten an biologischen Geweben die Laser-Gewebewechselwirkung unter hohen Leistungsdichten im kontinuierlichen Laserbetrieb bei  $2\mu\text{m}$  studiert, um neue Anwendungsbereiche aufzuzeigen.

Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse resultieren in der Bereitstellung eines Prototypen mit hohen Ausgangsleistungen und Effizienzen im kontinuierlichen Betrieb bei einer Emissionswellenlänge von  $2\mu\text{m}$ . Die theoretischen Modellierungen und das experimentelle Verifizieren ermöglichen ergänzend das Verständnis der auftretenden thermooptischen Belastungen und die systematische Laserkonfiguration. Die Perspektiven des realisierten Lasersystems im Hinblick auf weiterführende Forschungsarbeiten werden diskutiert.