

Aufbau und Charakterisierung eines Titan:Saphir-Lasersystems zum Nachweis von Wasserdampf

Setup and Characterization of a Titanium:Sapphir Laser System
to Detect Water Vapour

Diplomarbeit



Institut für Optik und Atomare Physik
an der Technischen Universität Berlin

Betreut durch Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Eichler,
Zweitgutachter Prof. Dr. Adalbert Ding,
angefertigt unter der Aufsicht von Dipl. Phys. Frank Kallmeyer

Name: Daniel Schmidt
Matrikelnummer: 19 27 29
Datum der Abgabe: 7. November 2006

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Introduction	2
3. Wasserdampf, Dial und Laser	3
3.1. Wasserdampf und Absorptionslinien	3
3.2. Lidar und Dial	5
3.3. Lasertransmitter für Wasserdampfdial	7
4. Grundlagen zum Laser	9
4.1. Signalverstärkung und Laser	9
4.2. Zeitliches Verhalten der Laserverstärkung	12
4.3. Güteschaltung und Gewinnschaltung	13
4.4. Energie, Leistung und Dynamik eines gewinngeschalteten Pulses	14
4.5. Injektionssaat	18
4.6. Spektrale Bandbreite	20
4.7. Strahlpropagation	23
4.8. Titan:Saphir-Laser	27
4.9. Mischgranatlasers	30
5. Experiment	36
5.1. Methoden zur Charakterisierung des Lasers	36
5.2. Eigenschaften der Titan:Saphir-Kristalle	40
5.3. Freilaufender Titan:Saphir-Laser	42
5.4. Abstimmbarer Titan:Saphir-Laser	50
5.5. Wellenlängenselektion durch Injektionssaat	53
5.6. Vergleich der charakterisierten Ti:Sa-Laser	60
5.7. Kleinsignalverstärkung von Nd:GSAG	61
5.8. Nd:GSAG-Laser bei 942 nm	64
6. Zusammenfassung und Ausblick	67
6.1. Ergebnisse	67
6.2. Ausblick - Auswahl des Lasertransmitters	68
6.3. Weitere Planungen zum Experiment	69
7. Conclusion and Results	71
8. Literaturverzeichnis	72
9. Sachregister	76
A. Anhang	78

1. Einleitung

Wasserdampf ist einer der entscheidenden Faktoren, wodurch das globale Klima bestimmt wird. Um die zukünftige Klimaentwicklung genauer voraussagen zu können, ist mehr Wissen über die Verteilung des Wasserdampfs in den höheren Atmosphärenschichten gefordert. Es wurde in den vergangenen Jahren ein Konzept zur globalen Erfassung des Wasserdampfgehalts mit Hilfe eines Rasterverfahrens aus dem erdnahen Orbit entwickelt. Es handelt sich um die von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) geplante *Wales-Mission* mit dem Verfahren des Differentiellen Absorptionslidar (Dial). Bei dieser Mission soll von einem Satelliten Laserstrahlung auf die Atmosphäre gesendet werden. Unter Ausnutzung der Absorptionseigenschaften des Wasserdampfs und der Rückstreuung kann die dreidimensionale Konzentration des atmosphärischen Wasserdampfs in kurzer Zeit und in einer Höhe bis 12 km gemessen werden.

Derzeit stehen vier unterschiedliche Lasersysteme als Emittierer für das Wasserdampfdial zu Disposition, die im Bereich der Wasserdampfabsorptionslinien bei 935, 942 bzw. 945 nm gepulste Strahlung genügend hoher Energie und geringer spektraler Bandbreite erzeugen können. Es handelt sich um einen optischen parametrischen Oszillator, einen Raman-Laser, einen Titan:Saphir-Laser und einen Mischgranatlasers.

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines gepulsten einmodigen Titan:Saphir-Lasers, der bei 935 nm mit hoher Pulsenergie und geringer spektraler Bandbreite liefert. Im Rahmen der Charakterisierung eines linearen Resonators wird die Ausgangsenergie, die Pulsdauer, die Strahleigenschaften und die spektrale Bandbreite ermittelt. Dabei wird versucht, die Pulsenergie zu erhöhen. Der Aufbau wurde durch Injektionssaat mit einem Diodenlaser erweitert, um einen Laserbetrieb mit sehr geringer spektraler Bandbreite zu erreichen. Zum störungsfreien Laserbetrieb wurde eine abgeschlossene Kammer konstruiert, um Wasserdampfabsorption und Luftwirbel im Laserresonator zu verringern.

Im Laufe der Arbeit hat sich herausgestellt, dass Mischgranate sehr effizient im Bereich der genannten Wasserdampfabsorptionslinien arbeiten. Es wurde daher ein Kristall aus Neodym:Gadoliniumscandiumaluminiumgranat (Nd:GSAG) die Kleinsignalverstärkung um 942 nm untersucht, wobei als Pumpquelle ein abstimmbarer Ti:Sa-Laser bei 808 nm verwendet wurde. Bei einem Nd:GSAG-Laser mit linearem Resonator, der mit einem Ti:Sa-Laser gewinngeschaltet wurde, sind die Pulsenergie und die spektralen Eigenschaften untersucht worden. Zielsetzung ist ebenfalls ein Nd:GSAG-Laser mit hoher Effizienz, der für Wasserdampf-Dial bei 942 nm verwendet werden kann.

2. Introduction

Water vapour is one of the decisive factors to influence the global climate. For a more exact prognostication of the future climate development there is an additional knowledge of the distribution of water vapour in the upper atmospheric layers is required. In the last years a new concept for global gathering of water vapour is developed. The system uses a raster scan from the near earth orbit. This project is the planned Water mission by European Space Agency (ESA) with method of differential absorption lidar (DIAL). At this mission a laser is transmitted from a satellite to the atmosphere. Using the properties of absorption of water vapour and backscattering a three dimensional concentration of atmospheric water vapour can be measured in a short time and up-to a height of 12 km.

Actually four different laser systems for an emitter in a water vapour dial are placed at disposal, which can produce pulses in the spectral range of the water vapour lines at 935, 942 and 945 nm with high energy and narrow spectral bandwidth. These systems are an optic parametric oscillator, a raman converter, a titanium:sapphire laser and mixed garnet laser.

This diploma thesis is about the setup of a pulsed single mode titan:sapphire laser which provide pulses at 935 nm of a high pulse energy and a narrow spectral bandwidth. In the frame of a characterization of a linear cavity the output energy, the pulse duration, the beam properties and the spectral bandwidth will be measured. Thereby an increase of the pulse energy is attempted. The set up is extended by an injection seed by a semiconductor DFB laser (Galliumarsenid) to achieve a more narrow spectral bandwidth. For undisturbed laser activity a closed chamber is constructed reducing water vapour absorption and air whirls in the laser cavity.

In process of thesis mixed garnet lasers have turned out for an efficient laser activity in the mentioned range of the water vapor lines. Therefore the small-signal amplification at 942 nm on a Neodymium: Gadolinium Scandium Aluminium Garnet crystal is examined. Using a system of a Nd:GSAG laser with linear cavity and a gain switched titan:sapphire laser the pulse energy and the spectral properties have been examined. The common final objective is a Nd:GSAG laser with high efficiency which can be used for water vapour dial at 942 nm.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1. Ergebnisse

In dieser Arbeit wird der Aufbau und die Charakterisierung eines Titan:Saphir-Lasersystems beschrieben, welcher u.a. als Transmitter für Dial-Systeme bei den starken Wasserdampfabsorptionslinien 935, 942 bzw. 944 nm geeignet ist.

Bei einem Titan:Saphir-Laser mit linearem Resonator wurden im freilaufenden Betrieb bei den mittleren Wellenlängen 800 nm (beim Emissionsmaximum) und 930 nm (im Bereich der Wasserdampfabsorptionslinien) die charakteristischen Größen Pulsaufbauzeit, Pulsdauer und Pulsenergie gemessen. Dabei wurde eine gute Übereinstimmung mit den aus den Ratengleichungen hergeleiteten theoretischen Werte für die Gewinnschaltung gezeigt. Es wurde ebenfalls festgestellt, dass der Wirkungsquerschnitt bei 935 nm 30 % des Werts beim Emissionsmaximum beträgt.

Mit einem Resonatoraufbau mit zwei Spiegeln und einem bzw. zwei Glasprismen konnte die spektrale Bandbreite auf $\Delta\lambda = 2,1$ nm verringert werden. Die mittlere Emissionswellenlänge wurde mit diesem System von 790 bis 870 nm abgestimmt.

Zum Erreichen einer Pulsenergie $E > 30$ mJ wurde ein spezieller Aufbau mit drei Resonatorspiegeln hergestellt, bei dem zweiseitig mit einem Nd:YAG-Laser bei 532 nm mit einer Pumpimpulsenergie von $E = 220$ mJ gepumpt wird. Einer der Resonatorspiegel fungiert als Wellenlängenhochpaß, wodurch die grobe Selektion der Wellenlänge erfolgt. Bei einer mittleren Wellenlänge von 930 nm und einer Pulswiederholrate von $\nu_R = 20$ Hz wurde eine maximale Pulsenergie von $E = 46$ mJ bzw. eine mittlere Pulsleistung von 920 mW erreicht. Dabei betrug die optischen Effizienz $\eta = 35$ % und die Beugungsmaßzahl $M^2 = 1,5$. Bei diesem Aufbau wurde mit einem Diodenlaser aus Galliumarsenid eine Injektionssaat bei 935 nm hergestellt. Die spektrale Bandbreite konnte mit einem Fabry-Pérot-Interferometer mit festen Spiegeln zu $\Delta\nu < 104$ MHz bestimmt werden.

Da nicht nur der Titan:Saphir-Laser, sondern auch Mischgranatlasers für den Betrieb den starken Wasserdampfabsorptionslinien geeignet sind, wurde bei der Wellenlänge 942 nm die Kleinsignalverstärkung eines Nd:GSAG-Kristalls gemessen, wobei zur Erhöhung der Genauigkeit der Signalintensität eine Anordnung mit Doppelpaß und ein Raumfilter verwendet wurde. Es wurde gezeigt, dass sich der Wirkungsquerschnitt als Funktion der Wellenlänge nach dem spektralen Lorentzprofil der spontanen Emission verhält. Der maximale Wirkungsquerschnitt mit $\sigma = 3,38 \cdot 10^{-20}$ cm² liegt bei 942,8 nm, wobei die volle Halbwertsbreite $\Delta\lambda = 1,5$ nm beträgt. Desweiteren konnte gezeigt werden, dass der Einfluß der Polarisation auf den Wirkungsquerschnitt zu vernachlässigen ist. Mit diesem Nd:GSAG-Kristall wurde im Anschluß ein Laser mit einem linearen Resonator und drei Spiegel bei 942,6 nm aufgebaut und charakterisiert. Mit dem zuvor beschriebenen abstimmbaren Titan:Saphir-Laser bei der mittleren Wellenlänge von 808 nm und mit einer Pulsenergie von 25 mJ wurde

dieser Laser gewinngeschaltet. Hierbei wurde eine Pulsenergie von $E \approx 6$ mJ, eine Pulsdauer von $t_p = 190$ ns sowie eine spektrale Bandbreite von $\Delta\lambda = 1,4$ nm gemessen.

6.2. Ausblick - Auswahl des Lasertransmitters

Ausschlaggebend für das Wasserdampfdial ist die Effizienz des gesamten des Lasersystems, die sich aus dem Produkt der Effizienzen aller Teilprozesse, also des Pumpvorgangs, der Frequenzumwandlung und der Resonatorverluste ergibt. Als effiziente Pumpquelle werden bei der geplanten Dialanwendung keine Blitzlampen sondern leistungsstarke Diodenlaser verwendet. Es stehen vier Lasertypen zur Disposition, deren Eignungsmöglichkeiten im folgenden gegeneinander abgewogen werden. Die relevanten Parameter sind in der Tabelle 6.1 zusammengefaßt.

1. Der **Optisch Parametrische Oszillator** mit Kaliumtriphosphat hat eine relativ geringe optisch zu optische Effizienz, die mit 12 % im Bereich der von Titan:Saphir liegt. Ein wesentlicher Nachteil ist das Ausbilden vieler transversalen Moden höherer Ordnung, wodurch das Fernfeld eine Beugungsmaßzahl von $M^2 > 2$ hat, also für die geforderte Dialanwendungen ungeeignet ist.
2. Für **Ramanlaser** stehen mehrere geeignete ramanaktive kommerziell Kristalle zur Verfügung. Da die optisch zu optische Effizienz für die Antistokes-Linie viel geringer als bei der Stokes-Linie ist, ist die Anwendungen des Raman-Lasers bei CO₂-Dial besser geeignet.
3. Vorteil des **Ti:Sa-Lasers** sind gute und umfangreiche Kenntnis zum Kristall und zum Lasersystem, insbesondere bei hohen Energie und kleinen Pulsdauern. Messungen im Injektionssaatbetrieb zur Bestimmung der spektralen Reinheit und spektralen Bandbreite wurden bereits durchgeführt. Der Nachteil des Titan:Saphir-Lasers ist seine sehr geringe Effizienz im Betrieb bei 935 nm. Grund dafür ist, dass der Wirkungsquerschnitt bei 935 nm mit $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-19}$ cm² nur ein Drittel des maximalen Werts bei 780 nm ist und dass das System aus einem zweistufigen Pumpvorgang besteht (Diodenlaser und gütegeschalteter Nd:YAG-Laser). Eine Verwendung bei Dial gemäß den geforderten Parameter ist nach heutigen Erkenntnissen möglich.
4. Der entscheidende Vorteil des **Mischgranatlasers** ist die höhere optisch zu optische Effizienz, da die Kristallstruktur auf die Emissionswellenlänge speziell angepaßt werden kann. Es gibt nur einen Pumpvorgang bei der Wellenlänge 808 nm. Ausgewählte Kristallen sind für jede der vier Dialwellenlängen herstellbar. Nachteilig ist, dass für das relativ neue Material noch viele Untersuchungen der Eigenschaften ausstehen. Der maximale Wirkungsquerschnitt von Nd:GSAG liegt mit $3,38 \cdot 10^{-20}$ cm² sehr nahe dem Wirkungsquerschnitt von Nd:YAG $4 \cdot 10^{-20}$ cm² [MWa03], bei dem als gütegeschalteten Laser eine Pulsenergie von 75 mJ erreicht wurde [Koe02]. Durch die Entwicklung von Hochleistungsdiodelasern $P > 10$ W mit hoher Effizienz [Diode06b], [Diode06a] ist daher eine Verwendung für die Walesmission möglich. Durch die Anwendung der Mischgranatlasers mit Frequenzverdreifung von 946 zu 315 nm ist eine Dialanwendung von Ozon vorstellbar.

Laserart	OPO	Raman	Ti:Sa	Mischgranate
	KTP	Ba(NO ₃) ₂		Nd:GSAG
Wellenlänge λ /nm	935	935	935	942
Pulsenergie E /mJ	12	12	100	75
Effizienz	5	8	4	20
spektrale Reinheit gemessen	×		×	

Tab. 6.1.: Wesentliche Eigenschaften der für Wasserdampfdial geeigneten Laserstransmitter

Zum Stand Ende 2005 galt der Ti:Sa-Laser als Favorit der Wales-Mission der ESA. Die genaue Kenntnis von Ti:Sa-Kristall wurden den geringeren Effizienzen vorgezogen. Durch weitergehende Untersuchungen der Mischgranatlasers zu Beginn des Jahres 2006 ist eine Verwendung als Laseremitter möglich. Durch den späteren Zeitpunkt der Satelliteninstallation stehen die Chancen gut, dass die Mischgranatlasers bei der globalen Messung des Wasserdampfgehalts in der Atmosphäre zum Einsatz kommen. Durch diese Wissen ist eine Prognose des zukünftigen globalen Klimas möglich, aus der sich aller Voraussicht tiefgreifende Konsequenzen und Entscheidungen für den menschlichen Energiehaushalt ergeben.

6.3. Weitere Planungen zum Experiment

Titan:Saphir

Zur Fortsetzung der Untersuchung des Titan:Saphir-Lasers mit linearem Resonator und zweiseitigen Pumpen nach Reparatur des Pumplasers ist einen Aufbau nach Abbildung 6.1 geplant.

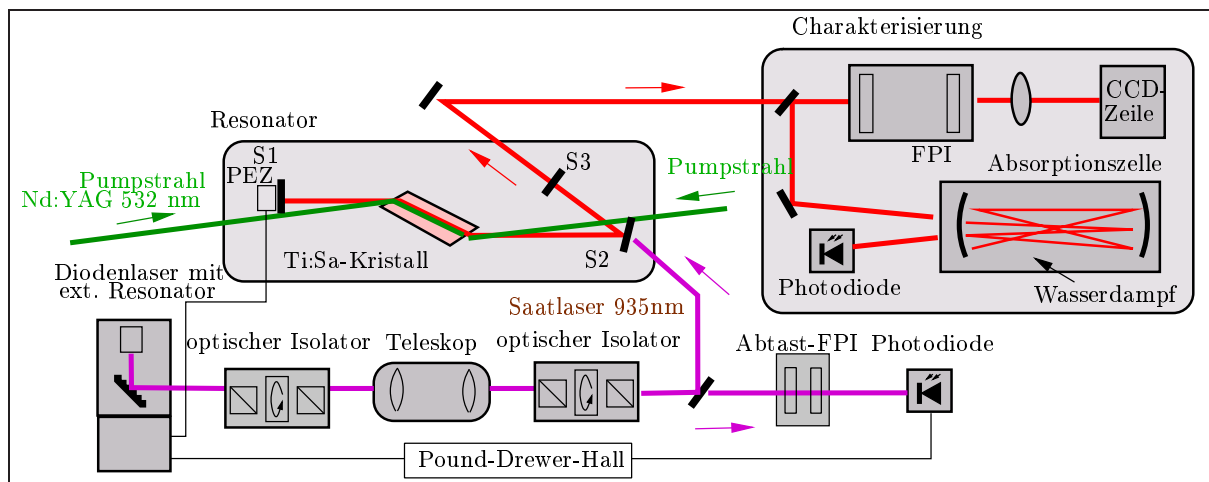


Abb. 6.1.: Geplanter Aufbau des Ti:Sa-Lasers mit Injektionssaat und aktiver Resonatorlängen-anpassung

Der Resonator soll in eine nahezu wasserdampffreie Kammer eingebracht werden, die mit trockenem Stickstoff gespült wird. Im Betrieb wird der Resonator aktiv mit einem unter dem Spiegel S1 angebrachten Piezoelement stabilisiert, was durch eine Pound-Drever-Hall-Steuerungseinheit erreicht werden soll. Die Injektionssaat wird durch einen Diodenlaser

7. Conclusion and Results

In this thesis the set up and the characterization of a titanium:sapphire laser system are described, which is suitable for a transmitter of a dial system at the strong water vapour absorption lines at 935, 942 bzw. 944 nm.

For a titanium:sapphire laser with linear cavity at free running mode and at the center wavelength of 800 nm (near maximum of emission) and 930 nm (in the range of water vapour absorption lines) the characteristic values pulse build up time, pulse duration and pulse energy have been measured. Thereby a good agreement according to the theoretic derived values by the rate equation for a gain switch is verified. The cross section at 935 nm is about 30 % of the value at maximal emission.

Using a linear cavity with two mirrors and one resp. two prisms the spectral band width could be decreased to $\Delta\lambda = 2,1$ nm. The center emission wavelength for this system is tuneable from 790 toward 870 nm.

To achieve a pulse energy $E > 30$ mJ a special set up with three cavity mirrors is chosen using double side laser pumping by a Nd:YAG-Laser at 532 nm with a output pulse energy of $E = 220$ mJ. One cavity mirror is a wavelength high pass for the raw spectral selection. At the center wavelength of 930 nm and a repetition rate of $\nu_R = 20$ Hz a maximal pulse energy of $E = 46$ mJ resp. a middle pulse power of 920 mW is measured. The optical efficiency is $\eta = 35\%$ and the diffraction number is $M^2 = 1,5$. At this set the injection seed is made by a semiconductor DFB laser (Galliumarsenid) at 935 nm. The spectral band width has been measured by a Fabry P erot interferometer ($\Delta\nu < 104$ MHz).

Not only titanium:sapphire laser but also mixed garnet laser are suitable for laser activity in the range of strong water vapour absorption lines. Therefore the small-signal amplification of a Nd:GSAG crystal is measured whereat the accuracy for signal is increased by a set up with double pass and spatial filter. It was verified, that the cross section as a function of wavelength is according to spectral lorentzian profil of spontaneous emission. The maximum cross section with $\sigma = 3,38 \cdot 10^{-20}$ cm² is at 942,8 nm whereat the full half value width is $\Delta\lambda = 1,5$ nm. Furthermore it was verified that the influence of polarisation to the cross section is negligible.

Using this Nd:GSAG crystal subsequent to this a laser with linear cavity and three mirrors at 942,6 nm was set up and characterized. This laser is gain switched by the tuneable titanium:sapphire laser at the center wavelength of 808 nm and a pulse energy of 25 mJ. At this system a pulse energy of $E \approx 6$ mJ, a pulse duration of $t_P = 190$ ns as well as a spectral band width of $\Delta\lambda = 1,4$ nm is measured.