

Nd:YAG - Laser

Golubkov Andrej
Meierhofer Georg

Betreuer: Dr. Carlo Calligari
Datum: 28.03.03

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	2
1.1 Allgemeines über Laserlicht	2
1.2 Laser Aufbau	2
1.3 Nd:YAG Laser	3
1.4 Vierniveausystem des Nd:YAG Lasers	3
1.4.1 Absorption	4
1.4.2 Relaxation1	4
1.4.3 Spontane Emission	4
1.4.4 Induzierte Emission	4
1.4.5 Relaxation 2	5
1.4.6 Ratengleichungen	5

1 Grundlagen

1.1 Allgemeines über Laserlicht

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) senden im Gegensatz zu den normalen Lichtquellen kohärentes Licht aus. Bei einem idealen Single- Mode Laser haben die abgestrahlten Photonen die gleiche Intensität, Richtung, Frequenz, Polarisation und Phase. Derzeit sind Laser für UV bis IR Licht, und Leistungen im mW Bereich bis zu MW verfügbar. Das Laserlicht kann also sehr intensiv sein, und lässt sich wegen seiner Kohärenz sehr gut kontrollieren.

1.2 Laser Aufbau

Abbildung 1: Aufbau des Nd:YAG Lasers: A - Leuchtdiodenlaser als Pumpquelle gleichzeitig auch linker Spiegel B/C - Linsen zum Bündeln des Pumplichts, D - Nd:YAG Kristall, H - Frequenzverdoppel- Kristall, E - Auskoppelspiegel F - Farbfilter, G - Detektor

Der Leuchtdiodenlaser liefert bei ca. 800nm die Energie, um die Nd Atome im Nd:YAG Kristall anzuregen. Durch spontane Emission entstehen dort vereinzelt Photonen bei ca. 1000nm. Sie werden im Resonator zwischen den zwei Spiegeln reflektiert. Trifft ein durch spontane Emission erzeugtes Photon dann wieder auf ein angeregtes Nd Atom, kann ein

zweites kohärentes Photon entstehen. Bei gut justierten Spiegeln können so die Photonen hin und herlaufen und sich im Kristall verstärken. Durch den rechten teildurchlässigen Spiegel kann ein Teil des Lichts im Resonator ausgekoppelt werden. Die Lichtintensität ist im Resonator um ein vielfaches stärker, als die des ausgekoppelten Lichts.

1.3 Nd:YAG Laser

Als aktives Medium wird Neodymium (Nd) dotierter YAG Kristall (Yttrium Aluminum Granat $Y_3Al_5O_{12}$) verwendet. Wie die meisten Festkörperlaser wird er optisch gepumpt. Dieser Laser strahlt am Stärksten im nahen Infrarotbereich bei 1064nm. Leistungen bis 4 kW sind in Serienlasern erreichbar. Es ist sowohl ein CW (Continuous Wave, d.h. kontinuierlicher), wie auch ein gepulster Betrieb möglich.

1.4 Vierniveausystem des Nd:YAG Lasers

Abbildung 2: Model der für Laserbetrieb wichtigen Energieniveaus

Es gibt 4 für den Laserbetrieb wichtige Nd- Energieniveaus:

- 1:Grundniveau
- 4:Oberes Niveau

- 2:Oberes Zwischenniveau
- 3:Unteres Zwischenniveau

Die wichtigsten Prozesse sind folgende:

1.4.1 Absorption

Durch optisches Pumpen werden die Nd Atome aus dem Grundniveau 1 in das Niveau 4 gehoben. Dabei absorbieren sie die einfallende Strahlung der Pumpquelle (in unserem Fall eine Laserdiode). Die Absorption erfolgt bei diskreten Frequenzen, die der Energiedifferenz des Übergangs entsprechen. $\nu\hbar = E_4 - E_1$

1.4.2 Relaxation1

Aus dem Niveau 4 Relaxieren die Nd Atome sehr schnell zum Niveau 3. Der Übergang erfolgt strahlungslos, durch Stöße oder Änderung der Schwingungsmoden. Das bedeutet, N_4 dass die Zahl der Nd Atome im Niveau 4 als 0 angenommen werden kann.

Pumprate (Absorption + Relaxation1):

$$\frac{dN_3}{dt} = \eta \cdot W_{14} \cdot N_1 = W_P \cdot N_1 \quad (1)$$

- N_3 ...Anzahl der Nd Atome im Niveau 3
 η ...Pumpwirkungsgrad
 W_{14} ...Energie, um von Niveau 1 nach 4 zu kommen
 W_P ...Pumpenergie

1.4.3 Spontane Emission

Durch Abstrahlung von Photonen können die Nd Atome vom Niveau 3 in das Niveau 2 kommen. Spontane Rate:

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma \cdot N_3 \quad (2)$$

mit

$$\Gamma = \frac{1}{\tau_s} \quad (3)$$

- τ_s ...Mittlere Lebensdauer des Nd Atoms im Niveau 3, bevor es spontan ein Photon emittiert

1.4.4 Induzierte Emission

Erst durch die induzierte Emission kann das für den Laser typische kohärente Licht entstehen. Dabei kollidiert ein Photon mit einem Nd Atom im Niveau 3. Das Atom emittiert dann ein zum ersten identisches Photon, das die gleiche Richtung, Polarität, Energie und Phase hat. Es gibt dann also 2 identische Photonen. Diese können weitere Nd Atome zur induzierten Emission anregen. Das Atom fällt nach der Energieabgabe auf Niveau 2. Es besteht auch die Möglichkeit für den umgekehrten Prozess; das Photon kann von einem Atom im Niveau 2 absorbiert werden. Es steigt dann zurück ins Niveau 3. Die induzierte Rate hängt also von der Photonendichte p , und den Besetzungszahlen N_2 und N_3 ab.

$$\frac{dN_3}{dt} = \sigma \cdot c \cdot p \cdot (N_2 - N_3) \quad (4)$$

σ ...Wirkungsquerschnitt

p ...Photonendichte

1.4.5 Relaxation 2

Der Übergang von 2 nach 3 erfolgt ähnlich, wie der Übergang von 4 nach 3 sehr schnell und strahlungslos. Es wird angenommen: $N_2 = 0$. Dadurch wird auch verhindert, dass Photonen durch Atome im Niveau 2 absorbiert werden.

1.4.6 Ratengleichungen

Mit sehr kleinen N_2 und N_4 sowie mit konstanter N_0

$$N_0 = N_1 + N_3 \quad (5)$$

ergibt sich

$$\frac{dn}{dt} = -\sigma c p n - \Gamma n + W_p \cdot (N_0 - n) \quad (6)$$

N_0 ...Gesamtanzahl der beteiligten Nd Atome

n ... Besetzungsinversion $N_3 - N_2$

Die Photonendichte p ist nicht konstant, wegen der Emissions und Absorptionsprozessen in 2 - 3 Niveaus:

$$\frac{dp}{dt} = -\sigma c p (N_2 - N_3) = \sigma c p n \quad (7)$$

Durch Verluste im Resonator:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{\tau_{ph}} \quad (8)$$

insgesamt:

$$\frac{dp}{dt} = p \left(\sigma c n - \frac{1}{\tau_{ph}} \right) \quad (9)$$

Für stationären cw Betrieb sind die Besetzungszahlen zeitlich konstant. Für die Ratengleichungen (6) und (9) gibt es dann eine einfache Lösung:

$$n = \frac{N_0 W_p}{c \sigma p + W_p + \Gamma} \quad (10)$$

$$p = W_p \left(\tau_{ph} N_0 - \frac{N_0}{c \sigma} \right) - \frac{\Gamma}{c \sigma} \quad (11)$$

Man sieht, dass die Inversion n auch ohne einen Photonenfeld p vorhanden ist, also auch wenn der Laser noch keine kohärente Strahlung liefert. Aus (11) sieht man, dass die ausgekoppelte Strahlung (proportional zu p) erst ab einer Mindestpumpleistung P_{th} grösser 0

ist. Die Größen p und W_p sind der direkten Messung nicht zugänglich, deshalb verwendet man die Gleichungen:

$$P_a = \alpha_S(P_P - P_{th}) \quad (12)$$

mit dem sogenannten differentiellen Wirkungsgrad

$$\alpha_S = \nu \frac{E_{32}}{E_{41}} \cdot \frac{T}{T + L} \quad (13)$$

P_a	...Leistung des ausgekoppelten Lichts
P_P	... Pumpleistung
P_{th}	... Schwellpumpleistung
T	... Transmission des Auskoppelspiegels
L	... Verluste des Resonators

1.5 Betriebsarten

1.5.1 Dauerstrich (Continuous Wave, cw)

Die Inversion n und die Ausgangsleistung P_a sind in dieser Betriebsart zeitlich konstant. In unserem Experiment wurde in dieser Betriebsart durchgeführt.

1.5.2 Gepulst (Q-switch)

Gepulste Laser werden mit Blitzlampen optisch gepumpt. Durch Einschwingvorgänge der Inversion n und der Photonendichte p nach dem Einschalten des Pumplichts entstehen sehr hohe Leistungsspitzen. Beim Q-switching wird eine kontinuierlich eingeschaltete Lichtquelle zum Pumpen verwendet. Es wird aber der Resonatorkreis blockiert, bis sich die Inversion voll aufgebaut hat. Das kann z.B. durch eine Pockelszelle im Resonatorkreis erreicht werden. Dann wird er freigegeben, und die Inversion wird mit einem kurzem starkem Lichtimpuls abgebaut. Der ganze Vorgang kann dann sofort wiederholt werden. Mit Blitzlampen kann man die höchsten Leistungsspitzen erreichen, der Wirkungsgrad ist aber sehr gering.

1.5.3 Quasi-CW

Quasi-CW Laser sind gepulste Laser mit einer sehr hohen Pulsrate pro Sekunde. Das können durchaus 10kHz - 100kHz sein. Während die Spitzenleistung pro Puls den cw Betrieb um Größenordnungen übersteigen kann, ist die zeitlich gemittelte Leistung geringer, als die von cw.

1.6 Resonator

Der Laserresonator besteht aus zwei Spiegeln, zwieschen denen das Laserlicht hin und her reflektiert wird. Es kommt dabei darauf an, dass möglichst viel Kristallvolumen durch das kohärente Licht ausgeleuchtet wird. Übliche Resonatortypen:

- **Planparalleler Resonator:** Beide Spiegel sind eben und Planparallel. Dieser Typ wäre ideal, ist aber sehr schwierig zu justieren.
- **Hemisphärischer Resonator:** Ein Spiegel ist eben, der andere sphärisch. Dieser Typ wird am häufigsten verwendet. Er ist unkritisch in der Justage.
- **Sphärischer Resonator:** Beide Spiegel sind sphärisch geschliefen. Er ist am einfachsten einstellbar, es können sich aber leicht mehrere Moden ausbilden.

1.7 Resonatormoden

Das kohärente Licht im Resonator kann nur als stehende Welle mit einem Minimum an den Spiegelwänden existieren. Da der Spiegelabstand L fix ist, hängt das nur von der Wellenlänge λ des Lichts ab. Im Resonator könnten theoretisch mehrere Moden mit verschiedenen λ existieren, solange $L = n \cdot \lambda/2$ erfüllt ist. Es können aber nur jene $\nu = c/\lambda$ verstärkt werden, die dem Nd Übergang von Niveau 3 auf 2 entsprechen. Bei $\lambda = 1064nm$ bzw. $\nu = 2.85 \cdot 10^5 GHz$ ist dieser Bereich 90 GHz breit. Aus den Ratengleichungen geht aber hervor, dass auch von diesen Moden nur jene mit der grössten emmissionswahrscheinlichkeit anschwingt.