Versuch 4.6: Laserdioden-gepumpter Nd:YAG-Laser und Frequenzverdopplung

Nicole Martin und Cathrin Wälzlein

February 18, 2008

Praktikumsbetreuer: Dominik Blömer Durchführungsdatum: 17.12.2007

1 Einleitung

Im Versuch haben wir die Absorption eines Nd:YAG-Lasers gemessen sowie dessen Kennlinie aufgenommen. Hierzu mussten wir den Laseraufbau selbst justieren. Weiterhin bestimmten wir die Arbeitsgerade und Kennlinie einer Laserdiode. Dieser Halbleiterlaser diente uns zum optischen Pumpen des Nd:YAG-Lasers. Abschließend betrachteten wir den nichtlinearen Effekt der Frequenzverdopplung, den wir mittels eines KTP-Kristalls erreichen konnten.

1.1 Grundlagen der Laseremission

Eine wesentlich Eigenschaft, des vom Laser erzeugtem Licht, ist dessen hohe spektrale Reinheit. Laser-Licht ist kohärent, parallel, monochromatisch und in gleicher Phase. Des weiteren besitzt Laser-Licht eine hohe Intensität und erbringt somit hohe Leistungen. Ein Laser besteht aus einem optischen Resonator mit einem Lasermedium darin. Die Vorraussetzung, damit ein Laser überhaupt funktionieren kann, ist eine Besetzungsinversion zwischen zwei Energieniveaus. In einem höheren Energieniveau müssen mehr Elektronen sitzen als in einem tieferen, um ausreichend stimulierte Emission zu erreichen. Sonst ist eine Verstärkung des Lichts nicht möglich. Durch Pumpen (Gasentladungen, Blitzlampen, elektrischem Strom am pn-Übergang), können die Elektronen des Lasermediums in ein höheres Energieniveau gehoben werden und somit die Besetzungsinversion erzeugen.



Abbildung 1: Laser-Niveau-Schemata

Besitzt ein Laser nur zwei verschiedene Niveaus, ist es nicht möglich, die Besetzungsinversion zu erzielen, da sich ein Gleichgewicht zwischen Absorption und stimulierter Emission einstellen würde. Zusätzlich kommt noch der Effekt der spontanen Emission hinzu, wodurch immer mehr Elektronen im unteren als im oberen Niveau vorhanden wären. Bringt man ein drittes Niveau E2 hinzu, fallen angeregte Elektronen aus dem obersten Niveau sofort strahlungsfrei ins mittlere metastabile Niveau E1. Damit bleibt das obere Niveau E3 nahezu leer und es können permanent Elektronen angeregt werden. Im E1-Niveau können sich somit viele Elektronen ansammeln und die Laserbedingung N1>N0 erfüllen. Wesentlich effizienter ist ein Lasermedium mit vier Energieniveaus. Angeregte Elektronen aus dem E3-Niveau fallen sofort strahlungsfrei in den Zustand des E2-Niveaus. Aus diesem metastabilen Zustand fallen die Elektronen zunächst in einen weiteren Zwischenzustand E1 bevor sie nach kurzer Zeit strahlungsfrei in den Grundzustand E0 zurückfallen. Somit ist die Besetzungsinversion N2>N1 sehr leicht zu erreichen.

1.2 Halbleiterlaser

Bei einem Halbleiterlaser besteht das aktive Lasermedium aus einem Halbleitermaterial. Diese Art von Laser haben als wesentlichen Vorteil einen sehr geringen Platzbedarf und liefern sehr hohe Effizienzen Ein Nachteil ist, dass so ein Halbleiterlaser erst ab einem bestimmtem Schwellenstrom arbeitet. Außerdem muss der Laser gut gekühlt werden, da er sehr viel Wärme erzeugt. Bei höherer Temperatur sinkt die emittierte Leistung des Halbleiterlasers. Ein weiterer Nachteil ist der schlecht kollimierte Laserstrahl, weshalb spezielle Linsen benötigt werden. Legt man in Durchlassrichtung des Halbleiters eine Spannung an, wird am pn-Übergang in der Raumladungszone eine Besetzungsinversion erzeugt. Der angelegte Strom dient also zum Pumpen der Laserdiode. Kristallendflächen dienen als Resonatorspiegel. Die vom Halbleiterlaser emittierte Wellenlänge ist von Temperatur und Injektionsstrom abhängig. In diesem Versuch wurde ein GaAs/AlGaAs-Laser zum Pumpen benutzt.

1.3 Nd:YAG-Laser

Dieser Laser besteht aus einem Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall, welcher eine sehr hohe optische Qualität besitzt. Dieser Wirtskristall wird mit Nd^{3+} - Ionen dotiert, dessen Energieniveaus durch den Einfluss des Kristallfeldes zu breiten Bändern aufspalten, welche als Anregungsniveaus fungieren. Der Nd:YAG ist ein 4-Niveau Laser, der durch optisches Pumpen mittels eines Halbleiterlasers eine Anregung erfährt. Die nötigen Photonen zum Pumpen müssen eine Wellenlänge zwischen 500nm und 900nm besitzen. Vom E3-Zustand fallen die Elektronen unter Aussendung von Wärme schnell in den E2-Zustand. Der E2-Zustand hat eine lange Lebensdauer von 240 Mikrosekunden. Durch stimulierte Emission können die Elektronen von dort in den E1-Zustand fallen und senden dabei zu 60% Licht mit einer Wellenlänge von 1064 nm aus. Von dort gelangen die Elektronen sehr schnell strahlungsfrei zurück in den Grundzustand E0. Der Nd:YAG benötigt keine großen Pumpraten, weil die Besetzunginversion leicht erzielbar ist. Außerdem besitzt der Wirtskristall Y₃Al₅O₁₂ eine gute Wärmeleitfähigkeit.

1.4 Nichtlineare Optik und Frequenzverdopplung

Bei Auftreffen von Licht mit hoher spektraler Leistungsdichte auf Materie, treten neben linearen Effekten auch nichtlineare Polarisationsmechanismen auf. Für die Polarisation in Abhängigkeit des elektrischen Feldes gilt:

$$P(E) = \epsilon_0 \cdot \left[\chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} \cdot E^2 + \chi^{(3)} \cdot E^3 + \dots \right]$$

Setzt man $E=E_0\cdot\cos{(\omega\cdot t)}$, so sieht man beim quadratischen Term, dass ein Term mit $\cos^2(\omega\cdot t)$ auftaucht, welcher für den Effekt der Frequenzverdopplung verantwortlich ist. Ein Teil des einfallenden optischen Feldes, wird also in ein Feld mit verdoppelter Frequenz umgewandelt. Um diesen Effekt zu erzielen, werden doppelbrechende Kristalle wie KTP (Kalium-Titanyl-Phosphat) verwendet. Um destruktive Interferenzen zu vermeiden, muss der Brechungsindex der Materialien für fundamentales Lichts und dem für verdoppelte Frequenzen gleich sein. Sonst könnten sich zu unterschiedlichen Zeiten entstandene 2 ω -Strahlen gegenseitig auslöschen. Hierzu muss der Kristall richtig orientiert werden.

2 Auswertung

2.1 Halbleiterlaser

2.1.1 Arbeitsgerade

Wir haben folgenden Aufbau verwendet:



Abbildung 2: Aufbau

Entlang der Arbeitsgerade ist die Wellenlänge des Halbleiterlasers konstant. Der Injektionsstrom wurde in 50 mA Schritten variiert und dabei durch Verändern der Temperatur das Transmissionsminimum bei diesem Injektionsstrom gesucht. Somit erhält man die Abhängigkeit des Stroms von der Temperatur bei gleicher Wellenlänge.

I in mA	T in ^{o}C
200	32,2
250	26,1
300	21,2
350	21,1
400	20,8
450	22,5
500	19,5
550	20,1
600	25
650	20,1
700	20,3

Tabelle 1: Arbeitsgerade Laserdiode



Abbildung 3: Arbeitsgerade Laserdiode

Wie man erkennen kann, ergibt sich bei unseren Messwerten keine Gerade. Die könnte daran liegen, dass wir eine neue Laserdiode benutzt haben. Den Messpunkt bei 32,2 °C haben wir in den nachfolgenden Aufgaben allerdings nicht verwendet. Die starke Abweichung vom erwarteten Wert könnte daran liegen, dass dieser Messpunkt nah an der Laserschwelle liegt. Stattdessen wählten wir bei 200 mA eine Temperatur von 21 °C.

2.1.2 Kennlinie

Um die Kennlinie des Halbleiterlasers zu bestimmen, haben wir den Photodiodenstrom am Detektor in Abhängigkeit vom angelegten Injektionsstrom abgelesen. Um die Lichtleistung zubestimmen verwenden wir folgende Formel:

$$P = \frac{I_{Photodiode}}{0,57\frac{A}{W} \cdot 0,025}$$

Darin sind die 0.57 $\frac{A}{W}$ die spektrale Empfindlichkeit der Photodiode bei 810nm und die 0,025 der Transmissionskoeffizient des abschwächenden Filters (2.5%).

Injektionsstrom in mA	T in ^{o}C	$I_{Photodiode}$ in mA	Lichtleistung in mW
0	21	0,0027	0,19
50	21	0,0032	0,22
100	21	0,004	0,28
150	21	0,0061	0,43
200	21	0,017	1,19
250	26,1	0,257	18,04
300	21,2	0,57	40,00
350	21,1	0,9	$63,\!16$
400	20,8	1,24	87,02
450	22,5	1,6	112,28
500	19,5	1,98	138,95
550	20,1	2,32	162,81
600	25	2,6	182,46
650	20,1	2,9	203,51
700	20,3	3,18	223,16

Tabelle 2: Messwerte zur Bestimmung der Kennlinie

Wir haben eine Gerade an die Messpunkte ab 200 mA angefittet, dies ergab P = 0,46 $\frac{W}{A}$ · I - 94,98 W, und den Schnittpunkt dieser Geraden mit der x-Achse bestimmt. Daraus ergab sich ein Schwellenstrom von I_{th}= 206 mA.

2.1.3 differentielle Quanteneffizienz

r

Die differentielle Quanteneffizienz gibt an, wieviel Prozent der zugeführten Elektronen oberhalb des Schwellenstroms tatsächlich ein Photon auslösen. Die differentielle Quanteneffizienz lässt sich mit der Formel $\eta_{ext}=\frac{e}{h\nu}\cdot\frac{P_{out}}{I-I_{th}}$ bestimmen. $\frac{P_{out}}{I-I_{th}}$ entspricht gerade der Steigung der Geraden die unter Punkt 2.1.2 angefitteten wurde, also $\frac{P_{out}}{I-I_{th}}=0,46$. Daraus folgt:

$$\eta_{ext} = \frac{e}{h\nu} \cdot 0,46\frac{W}{A} = 0,3005$$



Abbildung 4: Kennlinie der Diode

2.2 Nd:YAG-Laser

2.2.1 Absorption

Wir verwendeten wieder folgenden Aufbau: Laserdiode-Kollimatorlinse-Fokussierlinse-Nd:YAG Kristall-Abschwächer mit T = 2,5 %-Photodiode. (Vergleiche Abbildung 2)

Als Injektionsstrom für den Halbleiterlaser benutzten wir 301 mA. Anschließend wurde die Temperatur der Diode in Intervallen von je einem Grad von 9 auf 40 ^oC erhöht. Der detektierte Photodiodenstrom wurden in Abhängigkeit von der Temperatur abgelesen. Diese Messung führten wir einmal mit und einmal ohne den Nd:YAG-Kristall durch. Daraus lässt sich der Absorptionskoeffizient wie folgt berechnen:

$$A_{relativ} = 1 - \frac{I_{mit\ Kristall}}{I_{ohne\ Kristall}}$$

Der Peak bei etwa 13°C lässt sich der Wellenlänge von 804,4 nm zuordnen. Bei 21°C erkennt man einen Peak für die Wellenlänge 808.4 nm und bei etwa 39,1 °C lässt sich der Peak für $\lambda = 812,9nm$ erkennen, da wir nur einen Wert danach aufgenommen haben könnte es sich dabei auch um einen Ausreißer handeln. Wir wissen aber, dass der Peak für $\lambda = 812,9nm$ dort liegen sollte.

T in ^{o}C	I _{mit Kristall} in mA	I _{ohne Kristall} in mA	$A_{relativ}$
8,9	0,33	0,6	0,45
10,1	0,26	0,6	0,57
11,0	0,17	0,6	0,72
11,9	$0,\!125$	0,6	0,79
13,0	0,11	0,59	0,81
14,0	0,15	0,59	0,75
15,0	0,15	0,58	0,74
16,0	0,15	0,58	0,74
17,0	$0,\!115$	0,57	0,80
18,1	0,13	0,57	0,77
19,0	0,08	0,563	0,86
20,0	0,075	0,555	0,86
21,0	0,07	$0,\!545$	0,87
22,0	0,08	0,54	0,85
23,0	0,11	0,53	0,79
24,0	0,12	0,53	0,77
25,0	0,07	0,518	0,86
26,1	0,22	0,517	0,57
27,0	0,235	0,505	0,53
28,0	0,25	0,5	0,50
29,1	0,26	0,49	$0,\!47$
30,0	0,2	0,485	0,59
31,0	0,24	0,478	$0,\!50$
32,0	0,26	0,472	$0,\!45$
33,0	0,27	0,462	$0,\!42$
34,0	0,25	0,46	0,46
35,0	0,22	0,45	0,51
35,9	0,225	0,447	0,50
37,1	0,15	0,43	0,65
38,1	0,14	0,43	0,67
39,1	0,12	0,418	0,71
40,1	0,19	0,412	0,54

 Tabelle 3:
 Messwerte zur Bestimmung der Absorption



Abbildung 5: Absorption

2.2.2 Kennlinie

Hierbei wurde folgender verändertet Aufbau verwendet: Laserdiode-Kollimatorlinse-Fokussierlinse-Nd:YAG Kristall-sphärischer Resonatorspiegel-Farbfilter RG1000-Photodiode.

Der Nd: YAG-Laser wurde nun mit dem Halbleiterlaser gepumpt. Dabei bildete der sphärische Resonatorspiegel zusammen mit der Eingangsseite des Kristalls den für die Laseremission nötigen Resonator. Der Photostrom wurde in Abhängigkeit vom Injektionsstorm gemessen und daraus die Lichtleistung bestimmt.

$$P = \frac{I_{Photodiode}}{0,22\frac{A}{W} \cdot 0,648}$$

Die Pumpleistung entspricht den Lichtleistungswerten des Halbleiterlasers aus Tabelle 2 in Kap. 2.1.2. Der Transmissionskoeffizient des RG1000-Filters beträgt bei 1064nm 64,8%. Die Empfindlichkeit der Photodiode entnahmen wir dem Aufgabenblatt, sie beträgt $0.22 \frac{A}{W}$.

Injektionsstrom in mA	T in ^{o}C	$I_{Photodiode}$ in ^{o}C	Pumpleistung in mW	Lichtleistung in mW
0	21	0	0,19	0
50	21	0	0,22	0
100	21	0	0,28	0
150	21	0,0003	$0,\!43$	0,0021
200	21	0,0005	1,19	0,0035
250	26,1	0,05	18,04	0,3507
300	21,2	0,225	40,00	1,5783
350	21,1	0,395	$63,\!16$	2,7708
400	20,8	0,58	87,02	4,0685
450	22,5	0,78	112,28	5,4714
500	19,5	1,03	138,95	7,2250
550	20,1	1,18	162,81	8,2772
600	25	0,72	182,46	5,0505
650	20,1	1,58	203,51	11,0831
700	20,3	1,79	$223,\!16$	$12,\!5561$

Tabelle 4: Daten zur Bestimmung der Kennlinie



Abbildung 6: Nd:YAG-Leistung/Pumpleistungskennlinie

Wie in 2.1.2 wurde an die Werte ab 18 mW eine Gerade angefittet, allerdings unter Ausschluss des Wertes bei 182 mW. Daraus ergab sich die Gerade P $_L$ =

 $0.06 \cdot \mathrm{P}_{P}$ - 0.91 W. Dies ergibt eine Schwelleistung von $\mathrm{P}_{th,2}{=}$ 15,55 W.

2.2.3 Quantenwirkungsgrad

Der Quantenwirkungsgrad berechnet sich mit folgender Formel:

$$\epsilon = \frac{h \cdot \nu_L}{h \cdot \nu_P} = \frac{\lambda_P}{\lambda_L} = \frac{808, 4}{1064} = 0,76$$

2.2.4 totale Leistungseffizienz

Die totale Leistungseffizienz berechnet sich nach

$$\eta_P = \frac{P_L}{P_P}$$

Pumpleistung in mW	totale Lichtleistungseffizienz
18,04	0,019
40,00	0,039
63,16	0,044
87,02	0,047
112,28	0,049
138,95	0,052
162,81	0,051
182,46	0,028
203,51	0,054
223,16	0,056

Tabelle 5: totale Leistungseffizienz



Abbildung 7: totale Leistungseffizienz

Nur die Werte oberhalb der Laserschwelle sind sinnvoll und deshalb sind nur diese aufgetragen. Die maximal erreichte Effizienz liegt bei 5.6%. Dieser Wert liegt deutlich unter dem des Quantenwirkungsgrades. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass der Nd:YAG-Laser nicht nur diese eine Wellenlänge emittiert, sondern vier verschiedene. Die Elektronen nehmen also andere Übergänge, als den der von uns betrachtet wird. Hinzu kommen Verluste durch ungenaue Justage und das der Apsorptionskoeffizient kleiner als eins ist.

2.3 Frequenzverdopplung

Um die Frequenzverdopplung zu untersuchen benutzten wir zwei verschiedene Filter: RG 1000 und BG 39. Den KTP-Kristall haben wir zwischen Nd:YAG und Resonatorspiegel platziert. Es wurde jeweils der Photostrom abgelesen. Mit dem BG 39 Filter misst man den Photostrom des frequenzverdoppelten Lichts mit einer Wellenlänge von 532nm und mit dem RG 1000 den des ursprünglichen Lichts mit $\lambda = 1064 nm$. Hierbei hat der Filter BG 39 eine Transmission von 80,18% und der Filter RG 1000 eine Transmission von 64,8%. Die Konversionseffizienz wird wie folgt berechnet:

$$\gamma_{SGH} = \frac{P_{532}}{P_{1064}}$$

Diesen trägt man über der Fundamentalleistung doppeltlogarithmisch auf, da die beiden Felder einen quadratischen und die Konversionseffizienz einen linearen Zusammenhang haben. Die Steigung der gefitteten Geraden sollte daher idealerweise 1 betragen. Die Steigung ergibt sich in unserem Fit aber zu 0.85. Dies liegt zum Einen daran, dass wir nicht direkt im Resonator messen können und zum Anderen daran das wir bei der Rechung lediglich eine Näherung verwenden. Die maximal erreichte Konversionseffizienz beträgt 8.2%, welche man durch eine sorgfältigere Justage oder mehr Pumpleistung noch weiter erhöhen könnte.

		Farbfilter BG 39		Farbfilter RG 1000		
Injektionsstrom	T in	I _{Photodiode}	Lichtleistung	I _{Photodiode}	Lichtleistung	Konversions-
in mA	°C	in mA	in mW	in mA	in mW	effizienz
225	26,1	0	0	0	0	0
250	26,1	0,0005	0	0,025	0,17	0
275	21,2	0,001	0	0,065	0,45	0
300	21,2	0,0015	0,01	0,11	0,77	0,013
325	21,1	0,0035	0,02	0,16	1,12	0,018
350	21,1	0,0055	0,02	0,205	1,43	0,014
375	20,8	0,009	0,04	0,25	1,75	0,023
400	20,8	0,017	0,08	0,305	2,13	0,038
425	22,5	0,0177	0,08	0,37	2,59	0,031
450	22,5	0,022	0,1	0,445	3,11	0,032
475	19,5	0,027	0,12	0,5	3,5	0,034
500	19,5	0,043	0,19	0,58	4,06	0,047
525	20,1	0,039	0,17	0,65	4,55	0,037
550	20,1	0,051	0,23	0,65	4,55	0,051
575	25,0	0,019	0,08	0,39	2,73	0,029
600	25,0	0,022	0,1	0,425	2,97	0,034
625	20,1	0,127	0,57	1	6,99	0,082
650	20,1	0,14	0,62	1,1	7,69	0,081
675	20,3	0,105	0,47	1,1	7,69	0,061
700	20,3	0,14	0,62	1,08	7,55	0,082

 Tabelle 6:
 Konversionseffizienz



Abbildung 8: Konversionseffizienz