

VERSUCH NUMMER

TITEL

Marius Hötting
Marius.Hoetting@udo.edu

Hubertus Kaiser
Hubertus.Kaiser@udo.edu

Durchführung: DATUM

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	3
1.1 Laser	3
1.1.1 Bestandteile	3
1.2 Diode	4
1.3 Dioden Laser	5
2 TeachSpin Diodenlaser (Sanyo DL-2140-201S)	5
2.1 Die Wellenlänge	5
3 Fehlerrechnung	7
4 Versuchsaufbau	8
5 Durchführung	9
6 Auswertung	10
7 Diskussion	11

1 Grundlagen

Seit der ersten theoretischen Beschreibung der stimulierten Emission von Albert Einstein 1916 und dem experimentelle Beweis 1928 von Rudolf Ladenburg wurde er stets weiterentwickelt. Die Anwendungsmöglichkeiten beschränken sich nicht nur auf die verschiedensten Zweige der Wissenschaft sondern findet ebenfalls Verwendung im Alltag. Der letzte große Erfolg wurde 2018 mit einem Nobelpreis ausgezeichnet, da es gelungen war mit Hilfe eines Lasers eine optische Pinzette zu realisieren. In den folgenden Kapitel wird zunächst auf die Grundlagen und die essenziellen Bestandteile einen Lasers eingegangen, gefolgt von der Beschreibung des Diodenlasers, welcher in diesem Experiment verwendeten wurde.

1.1 Laser

Wird ein System angeregt kehrt es nach einer gewissen Zeit in seinen Grundzustand zurück. Der Energieunterschied zwischen den beiden Zuständen wird bei der Rückkehr in den Grundzustand in Form eines Photons oder eines Phonons umgewandelt, welches emittiert wird. Die Emission eines Photons kann dabei spontan oder stimuliert entstehen. Der spontane Übergang in ein niedrigeres Niveau ist ein zufälliger, ungetriebener Prozess. Die stimulierte Emission wird Gegensatz dazu, durch ein externes Photon ausgelöst. Weißt dieses Photon genau die Energie der Energiedifferenz zwischen zwei Niveaus aus, geht das System in das niedrigere Niveau über und emittiert dabei ein Photon gleicher Wellenlänge und Phase. Den Zustand, das sowohl die Wellenlänge als auch die Phase überstimmen, wird als Kohärenz bezeichnet und ist die Grundlage jedes Lasers.

1.1.1 Bestandteile

Jeder Laser benötigt eine Pumpen, ein aktives Medium, einen Resonator und eine Kühlung.

Die Pumpe ist dafür die Elektronen des aktiven Mediums, die sich im Grundzustand befinden, anzuregen, sodass die in einen Zustand höherer Energie übergehen. In Abbildung XXX ist dieser Vorgang an einem Drei-Niveau-System dargestellt. Die Elektronenverteilung wird dabei über die Fermifunktion

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{k_B T}} + 1} \quad (1)$$

beschrieben. Diese ist Abhängig von der Energie der Elektronen E , dem chemischen Potential μ , der Boltzmannkonstante und der Temperatur des Systems T . Bei fallender Temperatur gehen somit immer mehr Elektronen in der Grundzustand über, bis der Grenzfall erreicht ist und ausschließlich ein Niveau besetzt ist. Im gegenteiligen Grenzfall konvergiert die Funktion gegen $1/2$, wodurch das angeregte Zustand als auch der Grundzustand gleich besetzt sind.

Für die zuvor angesprochene stimulierte Emission muss eine Besetzungsinversion realisiert werden. Dieses ist mit einem System mit drei oder mehr Energieniveaus möglich. Dabei, wie in Abbildung XXX angedeutet, erfolgt die Relaxation in das zweite Energieniveau wesentlich schneller als die Relaxation vom zweiten Niveau in das erste. Somit befindet sich ein Großteil der Elektronen im zweiten Niveau. Der Abstand der einzelnen Energieniveaus ist über das verwendete aktive Medium definiert. Aus diesem Abstand ergibt sich die Wellenlänge des emittierten Photons. Die

Spiegel, die das aktive Medium einschließen, reflektieren die entstanden Photonen und erzeugen stehende Wellen. Hierfür müssen die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

$$\lambda = \frac{2Ln}{m} \quad \text{und} \quad \nu = \frac{cm}{2Ln}, \quad \text{mit} \quad m \in \mathbb{N} \quad (2)$$

Zwischen den verstärkten Frequenzen besteht ein äquidistanter Abstand von

$$\Delta\nu = \frac{c}{2Ln}. \quad (3)$$

Für den Grenzfall $\nu \gg \Delta\nu$ besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Wellendifferenz

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = c \left(\frac{1}{\nu_2} - \frac{1}{\nu_1} \right) \approx \frac{c}{\nu^2} \Delta\nu. \quad (4)$$

und der Frequenzunterschied. Einer der verwendeten Spiegel reflektiert nur etwa 95 %, wodurch der entstandene Laserstrahl das aktive Medium verlassen kann. Die verwendete Kühlung sorgt für eine konstante Temperatur des aktiven Mediums und somit für eine stabile Emission.

1.2 Diode

Eine Diode ist ein sogenannter Halbleiter. Das bedeutet, dass durch thermische Anregungen Valenzelektronen vom Valenzband in das Leitungsband übergehen können. Die Ursache dafür liegt in der Größe der Bandlücke, die sich im Bereich von 0,4 eV und 4 eV. Außerhalb dieses Bereichs wird das Material als metallischer Leiter oder als Isolator bezeichnet. Im Falle eines elektrischen Leiters überlappen sich die zuvor angesprochenen Bänder, wodurch keine externe Anregung für einen Übergang nötig ist. Im Gegensatz dazu ist die Bandlücke eines Isolators so groß, dass keine externe Anregung ausreicht, um ein Valenzelektron in das Leitungsband zu befördern.

Für einen p-n-Übergang ist es nötig ein Halbleiter-Material, meist Silizium, zusätzlich zu dotieren. Bei diesem werden dem Halbleiter Fremdatome einer höheren oder einer niedrigeren Hauptgruppe hinzugefügt. Somit besitzt n-dotiertes Material einen Überschuss an Elektronen und p-dotiertes Material einen Mangel an Elektronen, also effektiv einen Überschuss an Löchern, die als Quasiteilchen behandelt werden.

Bei Kontakt entsteht der sogenannte p-n-Übergang. Dabei driften Elektronen in das p-dotierte und Löcher in das n-dotierte Halbleitermaterial. Durch die Rekombinationen in der Grenzschicht verbleiben ionisierte Atome, die nach und nach ein elektrisches Feld aufbauen und somit dem Drift weiterer freier Ladungsträger entgegenwirkt, bis schlussendlich ein Gleichgewicht entsteht. Die Ausdehnung der Depletionszone kann durch das Anlegen einer externen Spannung sowohl verkleinert als auch vergrößert werden. Bei Anlegen einer positiven Spannung ($V > 0$) an die n-dotierte Seite des Halbleiters werden weitere freie Ladungsträger aus dem Material gezogen, wodurch sich die Depletionszone ausdehnt. Im Gegensatz dazu verkleinert sich die Depletionszone, wenn eine negative Spannung ($V < 0$) angelegt wird. Die Depletionstiefe

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot (U_D - U)(N_D + N_A)}{q \cdot N_D \cdot N_A}} \quad (5)$$

ist dabei sowohl von der Akzeptor- und Donorkonzentration $N_{A/D}$, welche die Anzahl an eingebrachten Atomen zur n- und p-Dotierung pro Volumen beschreibt, als auch von der Dielektrizitätskonstante ϵ und der Elementarladung q abhängig. Der Strahlungsrekombinationsstrom

der für die Emission von Photonen verantwortlich ist, steigt proportional zur Spannung, weshalb die Diode für diesen Versuch in Vorwärts-Richtung ($V > 0$) betrieben wird.

1.3 Dioden Laser

Die in Kapitel XXX angesprochenen essentiellen Komponenten eines Lasers, sind auch bei einem Diodenlaser zu finden. Der Halbleiter mit seinem p-n-Übergang wird als aktives Medium verwendet. Die entstehenden Bandlücke definiert die Wellenlänge der emittierten Photonen. Der angelegte Strom sorgt für den Pump-Prozess, da dieser Elektronen und Löcher einbringt und damit eine Art Besetzungsinversion zwischen dem Leitungsband und dem Valenzband hervorruft. Wie in Abbildung XXX dargestellt, dient der Halbleiter selbst als Resonator und bildet einen optischen Wellenleiter aufgrund seines Reflektionskoeffizienten.

Der entstandene Laser verlässt auf zwei entgegengesetzten Oberflächen die Diode mit einem elliptisch geformten Strahl, der sehr stark divergiert. Um die Sensitivität für andere Wellenlängen zu mindern, wird zusätzlich noch ein externer Resonator verwendet, auf den in späteren Kapiteln genauer eingegangen wird.

Für niedrige Ströme sind die Verluste im Medium so hoch, dass keine kohärente Strahlung stattfinden kann. Damit dominiert in diesem Bereich die spontane Emission mit einem breiten Spektrum, vergleichbar mit der Emission einer handelsüblichen LED. Wird der Grenzstrom I , der sogenannte Threshold, überschritten dominiert die kohärente Strahlung, wodurch der gewünschte Laserstrahl zustande kommt.

2 TeachSpin Diodenlaser (Sanyo DL-2140-201S)

In den folgenden Kapiteln werden die Eigenschaften des verwendeten Lasers und der Aufbau des Experiments erläutert.

2.1 Die Wellenlänge

Die endgültige Wellenlänge des Lasers hängt stark von den verwendeten Komponenten und deren Konfigurationen ab. In der Abbildung XXX ist die Laserausbeute, der sogenannte Net Gain gegen die Wellenlänge aufgetragen.

Das Spektrum des aktiven Mediums ist sehr breit und weist eine hohe Ausbeute über einige Wellenlänge auf, ist jedoch stark Temperatur und Stromabhängig. Wie in Abbildung XXX dargestellt kann ein Wellenlängenshift durch einen Temperaturanstieg verursacht werden. Dieses wird durch eine Verkleinerung der Depletionszone bei hohen Temperaturen verursacht. Die Wellenlänge λ_0 kann ebenfalls verschoben werden durch eine Änderung des Diodenstroms. Die eingezeichneten Linien haben dabei eine Steigung von 200 MHz mV^{-1} und spiegeln die umsetzbaren Wellenlängen wieder, da sich im Resonator nur eine diskrete Anzahl von stehenden Wellen ausbilden kann. Somit existieren zwei Varianten die Wellenlänge der ursprünglichen Mode des Lasers zu verändern. In der späteren Durchführung wird hierfür der Strom der Diode verwendet, da dieses eine instantane Verschiebung verursacht im Gegensatz einer Temperaturänderung.

Der Resonator hat eine Länge von $L = 700 \mu\text{m}$ und einen Reflexionskoeffizienten von $n = 3.6$. Der Abstand zwischen den vom Resonator unterstützten Frequenzen wird auch als *freespectralrange* bezeichnet und ist für den verwendeten Laser mit $\Delta\nu_{FSR} = 60 \text{ GHz}$ angegeben. Mit Hilfe

von Gleichung von XXX ergibt sich somit der Abstand zwischen den Wellenlängen $\Delta\lambda_{FSR} = 0,122 \text{ nm}$.

Das zuvor in Kapitel XXX erwähnte Gitter wird wie in Abbildung XXX dargestellt angeordnet. Dabei wird etwas 15 % des Lasers zurück in den Resonator reflektiert, welches zu einer Stabilisierung des Strahls führt. Analog wie zu einem Prisma wird nur unter einem bestimmten Winkel eine bestimmte Wellenlänge reflektiert, weshalb in Abbildung XXX nur ein einzelnes Maximum dargestellt. Der Winkel des Gitters wird so gewählt, dass das Maximum erster Ordnung des Interferenzmusters reflektiert wird. Die Breite dieses Maximums

$$\Delta\nu = \nu/N \tag{6}$$

ist abhängig von der reflektierten Frequenz und der Anzahl der Gitterlinie die vom Laserspot überdeckt werden. Mit den spezifischen Parametern ergibt sich hier eine Frequenzbreite von $\Delta\nu = 70 \text{ GHz}$

Die Länge des externe Resonators kann durch einen Piezokristall modifiziert werden. Da der externe Resonator ($L=15 \text{ mm}$) wesentlich größer als der interne Resonator ($L=700 \mu\text{m}$) ist, sind im Vergleich mehr Frequenzen zu realisieren. Aus diesem Grund ist das Signal in Abbildung XXX hochfrequenter dargestellt.

3 Fehlerrechnung

Dieses Kapitel listet kurz und bündig die benötigten und aus den Methoden der Statistik bekannten Formeln für die Fehlerrechnung auf. Die Schätzung der Standardabweichung ist

$$\Delta X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} . \quad (7)$$

Der Mittelwert ist

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (8)$$

Der Fehler des Mittelwertes ist

$$\Delta \bar{X} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} . \quad (9)$$

Für fehlerbehaftete Größen, die auch in folgenden Formeln verwendet werden, muss die Fehlerfortpflanzung nach Gauß berücksichtigt werden.

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot (\Delta X_i)^2} \quad (10)$$

Bei der linearen Regressionsrechnung sind die Parameter m und b der Ausgleichsgerade $y = mx + b$ wie folgt gegeben:

$$m = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad b = \bar{y} - m\bar{x} . \quad (11)$$

Dabei sind x_i und y_i linear abhängige Messgrößen. Der Fehler dieser Parameter wiederum errechnet sich aus

$$\sigma_m^2 = \frac{\sigma^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad \sigma_b^2 = \frac{\sigma^2 \bar{x}^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} . \quad (12)$$

Relative Abweichungen einer Messgröße x gegenüber Literaturwerten x_{Lit} werden nach der Vorschrift

$$R_x = \frac{x - x_{\text{Lit}}}{x_{\text{Lit}}} \quad (13)$$

berechnet.

4 Versuchsaufbau

5 Durchführung

6 Auswertung

7 Diskussion