

Fortgeschrittenenpraktikum Versuch 09: Diodenlaser

February 21, 2024

In diesem Versuch soll das Leistungs- und Frequenzverhalten eines Diodenlasers untersucht werden, indem bei Variation von Temperatur und Anregungsstroms jeweils Ausgangsleistung und Emissionsspektrum aufgenommen werden.

1 Wichtige Hinweise

Die verwendete Laserdiode fällt in die Sicherheitsklasse 3R. Folgende Sicherheitshinweise sind unbedingt bei der Durchführung des Versuchs zu beachten:

1. Nie direkt in den Laserstrahl schauen!
2. Uhren, Schmuck etc. an Fingern, Händen und Unterarmen vor Beginn des Versuchs ablegen, um unkontrollierte Reflexionen zu vermeiden!
3. Bei der Grundjutsage des Laserstrahls sind Schutzbrillen zu tragen.
4. Den eingestellten Maximalstrom (in diesem Fall 40mA) nicht erhöhen bzw. überschreiten. Dies könnte die Diode beschädigen/zerstören.

2 Einleitung

Seit ihrer Erfindung vor 30 Jahren sind Laser zum wichtigsten Instrument der optischen Spektroskopie geworden. Die wichtigsten Typen sind Gas-, Farbstoff-, Festkörper und Halbleiter-Laser. Halbleiter-Laser sind Laser, deren Verstärkung durch Übergänge zwischen Leitungs- und Valenzband im Halbleiter zustande kommt. Hierfür bietet sich insbesondere der p-n-Übergang in einer Halbleiterdiode an. Solche Diodenlaser besitzen mehrere Eigenschaften, die sie den anderen Lasertypen überlegen machen, nämlich ihre kompakte Bauweise, die bequeme Energiezufuhr durch elektrischen Strom und der extrem hohe Wirkungsgrad. Dadurch sind Diodenlaser auch kommerziell interessant geworden, was wiederum im letzten Jahrzehnt ihre Verfügbarkeit und ihren Preis sehr positiv beeinflusst hat. Diodenlaser besitzen allerdings auch Eigenschaften, die für die Spektroskopie ungünstig sind, nämlich eine geringe Maximalleistung (erst in den letzten Jahren wurden auch Diodenlaser hoher Ausgangsleistung entwickelt), geringe spektrale Reinheit, unsauberes Strahlprofil und keine kontinuierliche Verstimmbarkeit.

Dennoch werden heute Diodenlaser äußerst vielfältig in spektroskopischen Anwendungen eingesetzt, denn mit geeigneten optischen und elektrischen Kontrollmechanismen lassen sich die Frequenz-, Strahl- und Verstimmungseigenschaften erheblich verbessern. In diesem Versuch werden die grundlegenden, (fast) allen Diodenlasern gemeinsamen Eigenschaften untersucht. Es handelt sich dabei um eine für wenige zehn Euro erhältliche kommerzielle Laserdiode ohne zusätzliche Maßnahmen zu ihrer Frequenzstabilisierung.

3 Grundlagen

Ein Laser ist ein Gerät, das räumlich und zeitlich kohärentes Licht erzeugt. Die Kohärenz entsteht aus der optischen Verstärkung durch stimulierte Emission. Das Grundprinzip des Lasers besteht darin, genügend Verstärkung durch stimulierte Emission zu erzeugen, um die Verluste zu überwinden. Durch das Pumpen von Energie in das Verstärkungsmedium kann eine Besetzungsinversion zwischen zwei Energieniveaus erzeugt werden.

3.1 Halbleiter

Halbleiter sind Stoffe, deren elektr. Leitfähigkeit zwischen der von Leitern und Isolatoren liegt. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Fermi-Energie wie bei Isolatoren in der Bandlücke liegt, welche aber schmaler ist als die Bandlücke eines Isolators. Durch thermische oder elektrische Energie können Elektronen in das Leitungsband gehoben werden, was die elektrische Leitfähigkeit erhöht. Auch durch Dotierung kann die Leitfähigkeit nochmals stark erhöht werden. Unter Dotierung versteht man das Einbringen von Fremdatomen in das Halbleitermaterial. Man unterscheidet zwischen p-Dotierung (Fremdatome sind Elektronen-Akzeptoren) und n-Dotierung (Fremdatome sind Elektronen-Donatoren). Bringt man nun eine n-dotierte Schicht in Kontakt mit einer p-dotierten Schicht (eine Diode), entsteht durch Ladungsträgermigration (Elektronen füllen die Löcher auf) eine Raumladungszone an der Grenzfläche, siehe Figure 1. Werden weitere Ladungsträger zur Verfügung gestellt (d.h. Stromfluss in der richtigen Richtung, Einbringen von Elektronen auf der einen Seite, Absaugen von Elektronen (und somit Erzeugen von Löchern) auf der anderen Seite), findet ein ständiges Auffüllen d.h. eine fortlaufende Rekombination statt.

bination von Elektronen und Löchern statt, welche bei geeigneten Bedingungen Photonen mit der entsprechenden Energie erzeugt.

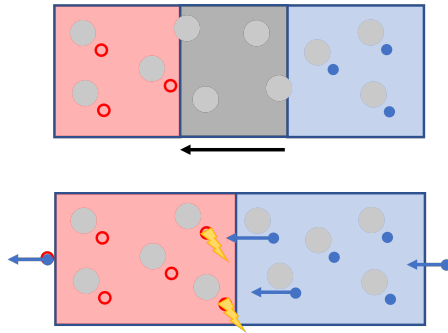


Figure 1: **Halbleiterdiode.** Oben: p-n Übergang ohne externe Beschaltung. Unten: Stromfluss durch und Ladungsträgerrekombination in der Diode.

3.2 Optischer Resonator

Ein optischer Resonator (Cavity, Fabri-Perot Interferometer, FPI) ist eine Anordnung von Spiegeln, die einen umlaufenden Lichtstrahl in sich selbst zurückreflektieren. Aufgrund der Bedingung, dass das elektrische Feld auf den Spiegeln einen Knoten besitzen muss, kann nur Licht mit bestimmten, diskreten Wellenlängen- bzw. Frequenzwerten dauerhaft zwischen den Spiegeln umlaufen: Der zurückgelegte Lichtweg zwischen den Spiegeln muss ein ganzzahliges Vielfaches der Lichtwellenlänge sein. Äquivalent dazu muss die Lichtfrequenz ein ganzzahliges Vielfaches einer Grundfrequenz sein, die Freier Spektralbereich (free spectral range, FSR) genannt wird. Daher gilt:

$$\nu = n \frac{c}{2\eta L} = n \cdot \text{FSR} \quad (1)$$

Hier ist η der Brechungsindex, L der Spiegelabstand, und c die Lichtgeschwindigkeit. Für von außen durch einen der Spiegel eingestrahlt Licht wirkt der Resonator als Filter, d.h. er selektiert und transmittiert nur die resonanten Wellenlängen bzw. Frequenzen.

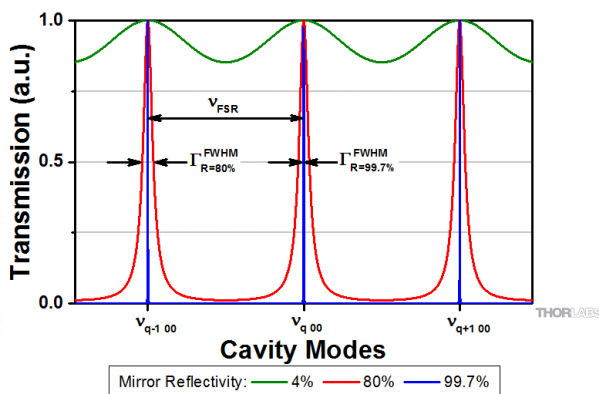


Figure 2: **Transmissionsspektrum eines FPI.** Transmittierte Intensität durch ein FPI bei unterschiedlicher Spiegelreflektivität. Grafik entnommen aus [1]

3.3 Laserprinzip

Setzt man nun ein verstärkendes Medium in einen optischen Resonator, das so viel Verstärkung bereitstellt, dass die Lichtverluste durch Spiegeltransmission und Absorption kompensiert werden, so tritt Lasertätigkeit auf. Im Resonator baut sich ein Lichtfeld auf, bis zu einer Stärke, bei der sich Verstärkung und Verluste gerade die Waage halten (siehe Figure 3). Durch den Resonator entstehen die longitudinalen Lasermoden.

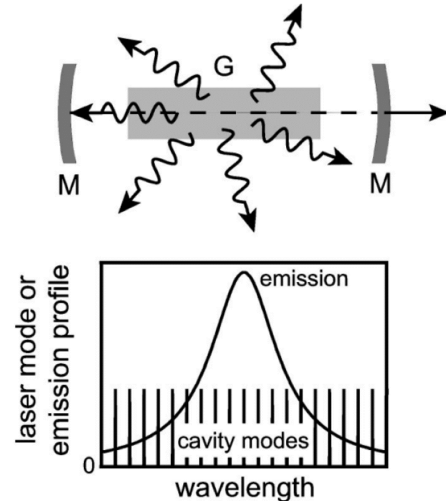


Figure 3: **Laserprinzip.** Oben: Schematischer Aufbau eines Lasers mit Gainmedium und umgebendem Resonator. Unten: Laseremissionsspektrum mit angedeutetem Verstärkungsprofil des Lasermediums und Resonatormoden. Grafik entnommen aus [2]

3.4 Diodenlaser

Ein Halbleiterlaser wird normalerweise durch Aufwachsen einer p-dotierten Schicht auf ein n-dotiertes Halbleitersubstrat (siehe Figure 3). Er wird in Vorwärtsrichtung betrieben. Das Laserlicht wird erzeugt, indem ein Strom (der "Injektionsstrom") durch die aktive Schicht der Diode zwischen der n und der p-Typ-Mantelschicht geschickt wird. Dabei entstehen Elektronen und Löcher, die wiederum rekombinieren und Photonen emittieren. Die Bandlücke zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband bestimmt die Mittenfrequenz des emittierten Lichts, das eine typische Linienbreite von einigen nm aufweist. Durch Hinzufügen einer dielektrischen Beschichtung zu den Diodenfacetten wirken diese als Spiegel, und es entsteht ein optischer Hohlraum. Nach Überschreiten eines Schwellstromes kann ein kontinuierlicher Laserbetrieb aufrecht erhalten werden.

3.5 Diodenlasercharakteristika

Aufgrund ihres Aufbaus und Funktionsweise weisen Diodenlaser spezielle charakteristische Eigenschaften auf, unter anderem

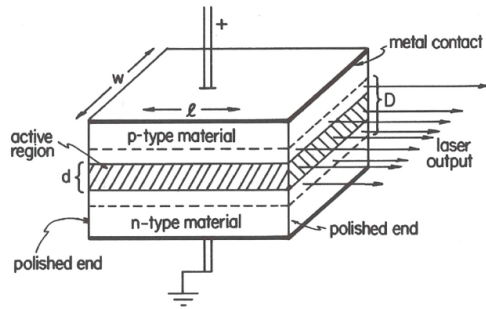


Figure 4: **Innerer Aufbau eines Diodenlasers.** Grafik entnommen aus [3]

- **Leistungscharakteristik** Eine der wichtigsten Eigenschaften gibt das Verhalten der erzeugten optischen Leistung als Funktion des Pumpstromes an. Dabei kann ein Treshold-Verhalten beobachtet werden d.h. ab einem bestimmten Schwellenstrom I_s steigt die optische Leistung P linear mit der Stromstärke I d.h. $\eta = \Delta P / \Delta I$.
- **Differentielle Quanteneffizienz η_d** Dieser beschreibt die Effizienz der Umwandlung von Elektronen zu Photonen (idealerweise 1 Photon mit Energie hc/λ pro Elektron) und kann aus der Steigung der Leistungskurve bestimmt werden

$$\eta_d = \eta \frac{e\lambda}{hc} \quad (2)$$

- **Verstärkungsprofil/Verstärkungsmoden** Das Verstärkungsprofil definiert den Wellenlängenbereich, in dem Laserbetrieb möglich ist. Innerhalb dieses Bereiches können alle Resonatormoden verstärkt werden, wobei diese miteinander "konkurrieren". Bei genügend großem Verstärkungsunterschied zwischen den Resonatormoden wird nur eine davon "anlaufen", der Laser läuft dann "single-frequency".
- **Frequenzverstimbarkeit** Das Verstärkungsprofil bzw. die Verstärkungsmoden können mithilfe des Pumpstromes und der Halbleitertemperatur verändert werden. Dabei hat sowohl die Temperatur als auch der Strom sowohl einen Effekt auf die Resonatorlänge als auch auf die Bandlücke bzw. das Verstärkungsprofil im Ganzen. Eine relative Verschiebung des Verstärkungsprofils im Vergleich zu den Resonatormoden führt zu sogenannten "Modensprüngen", an denen sich die Laserfrequenz sprunghaft von einer Resonatormode zu einer anderen verändert.

4 Experimentaufbau und durchzuführende Messungen

Der experimentelle Aufbau besteht aus einer Laserdiode bei einer Wellenlänge von $\lambda = 670\text{nm}$ (Thorlabs HL6756MG), die in einem temperaturstabilisierten Gehäuse (Thorlabs Thorlabs LDM9T) zusammen mit der

Kollimatorlinse montiert ist. Die Temperatur wird mit einem Temperatursensor gemessen und über einen Regelkreis auf einen Sollwert stabilisiert. Der Laser wird mit einem Stromtreiber betrieben. Ein Leistungsmesser ist für die direkte Leistungsmessung verfügbar. Das kollimierte Licht wird über zwei Ausrichtungsspiegel gelenkt und durchläuft dann ein FPI, bei dem ein Spiegel auf einem Piezo montiert ist. Dieser Piezo wird von einem Hochspannungsverstärker angesteuert, der wiederum von einem Frequenzgenerator eine Dreiecksspannung erhält. Eine Fotodiode misst die Intensität des vom FPI durchgelassenen Lichts. Das Signal der Fotodiode wird mit einem Oszilloskop aufgezeichnet, dessen Anzeige mit der Dreiecksspannung synchronisiert ist. Das Laserspektrum wird mehrmals auf dem Bildschirm wiederholt, einmal für jeden FSR des FPI, der während der Abtastung durchlaufen wird.

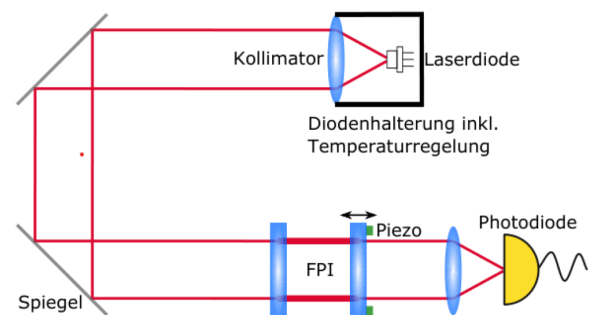


Figure 5: **Experimentaufbau.**

4.1 Messung der Leistungscharakteristik

In der ersten Messung soll die Leistungskurve der Laserdiode bei drei Temperaturen 20°C , 25°C sowie 30°C aufgezeichnet werden. Dafür wird mit dem Leistungsmessgerät die Ausgangsleistung der Laserdiode als Funktion des Laserstromes aufgezeichnet. Wählen sie eine geeignete Schrittweite! Bestimmen sie den Schwellenstrom I_s als auch die Effizienz η sowie die differentielle Quanteneffizienz η_d mittels geeigneter Fits für jede der drei Temperaturen und analysieren sie deren Temperaturverhalten.

4.2 Messung der Frequenzcharakteristik

In der zweiten Messung soll die Abhängigkeit des Emissionsspektrums der Laserdiode von Strom und Temperatur untersucht werden. Dafür wird das Transmissionssignal des FPI am Oszilloskop betrachtet und zur weiteren Analyse abgespeichert. Um eine Kalibrierung der Zeitachse in Frequenz zu erhalten, können sie den FSR des FPI als $\text{FSR} = 630\text{GHz}$ annehmen. Das Transmissionssignal wird nun für unterschiedliche Ströme bzw. Temperaturen aufgezeichnet. Erstellen sie jeweils eine Messserie für die Temperaturen 20°C , 25°C sowie 30°C , wählen sie dafür eine geeignete Schrittweite für den Strom, beginnend ab der Laserschwelle! Erstellen sie ebenfalls eine Messserie für einen fixierten Strom ungefähr im Zentrum des Lasingbereiches, wählen sie dafür eine geeignete Schrittweite für

die Temperatur im Messbereich 20°C - 30°C. Bestimmen sie den Modenabstand bzw. den FSR der Laserdiode. Ermitteln sie die Frequenzverstimmbarekeit in Einheiten von GHz/K bzw. GHz/mA mit und ohne Berücksichtigung von Modensprüngen.

5 Protokoll

Das Protokoll sollte folgende Elemente enthalten:

- Theorie zum Laser, optischen Resonatoren und Diodenlasern (Abbildung, wichtigste Zusammenhänge)
- Experimenteller Aufbau und verwendete Komponenten (kurz)
- Auswertung und Diskussion der Leistungscharakteristik. Stimmt das beobachtete Verhalten mit den Erwartungen überein?
- Auswertung und Diskussion der Frequenzcharakteristik. Welche physikalischen Prozesse können die Beobachtung erklären?

Die Theorie sollte die Grundlagen und Erklärungen beinhalten, sodass alle Graphen im Protokoll verstanden werden können d.h. es muss z.B. anschaulich erklärt werden warum Laserbetrieb nur ab einer bestimmten Pumpstärke möglich ist.

6 Vorbereitung

Zur Vorbereitung müssen abseits dieser kurzen Übungsanleitung weitere Quellen verwendet werden. Refs. [1], [4], [5] und [6] sind online verfügbar. Die Vorbereitung ist ausreichend, wenn folgende Fragen zufriedenstellend (d.h. inkl. der wichtigsten Formeln und mithilfe von Abbildungen) beantwortet werden können:

- Warum beginnt eine Laserdiode erst ab einem bestimmten Schwellenstrom mit dem Lasing?
- Welche Faktoren bestimmen die Wellenlänge des Lichtes dass ein Laser emittiert?
- Was ist mit Lasermode gemeint?
- Welches Verhalten wird als Modensprung bezeichnet? Warum entstehen diese?
- Warum wiederholt sich das Transmissionsspektrum des FPI während des Piezo-Scans?
- Welches Verhältnis der FSR zwischen dem FPI und der Laserdiode ist für dieses Experiment vorteilhaft?

References

- [1] Thorlabs Fabry Perot Interferometer Tutorial [Link](#)
- [2] Gijs van Soest and Ad Lagendijk. β factor in a random laser. Phys. Rev. E, 65:047601, Mar 2002.

- [3] Peter W. Milonni and Joseph H. Eberly. Lasers. Wiley, New York, first edition, 1988
- [4] Kamran S. Mobarhan. Test and Characterization of Laser Diode. [Link](#)
- [5] T.B.M. van Leent. Narrow-linewidth External Cavity Diode Lasers for Atomic Physics. Masters thesis, University of Amsterdam, 2017, [Link](#)
- [6] Carl E. Wieman and Leo Hollberg. Using diode lasers for atomic physics. Review of Scientific Instruments, 62(1):1–20, 1991, [Link](#)