

- INF18 -
Photolumineszenz von Halbleiter-Quantenpunkten

Paul Callsen

Mathilde Graff

Darek Petersen

03.09.2024

Zusammenfassung

In diesem Versuch wurden mithilfe von Photolumineszenz-Spektrometern Quantenpunkte in AlGaAs und GaAs Proben hinsichtlich ihrer Energien und Ausdehnung untersucht. Hierbei wurde zur Näherung das Modell des quantenmechanischen harmonischen Oszillators herangezogen und verifiziert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Halbleiter	4
2.2	GaAs/AlGaAs-Heterostrukturen	4
2.3	GaAs Quantenpunkte (QD) und harmonische Oszillator (HO) Näherung	5
2.4	Photolumineszenz-Spektroskopie (PLS)	6
2.5	Formeln für Auswertung	6
2.6	Exzitonen und Biexzitonen	7
3	Experimenteller Aufbau	8
4	Durchführung und Messdaten	9
5	Auswertung	14
5.1	Einflüsse von Temperatur und Laserleistung	14
5.2	Elektron-Loch-Bindungsenergie	14
5.3	Oszillatorlänge	15
5.4	Bestimmung von Temperatur und Aluminiumanteil	15
5.5	Modell: Harmonischer Oszillator	16
5.6	Aufspaltung Exziton-Biexziton	17
6	Diskussion	18
7	Zusammenfassung	19
	Literatur	20

1 Einleitung

Zuerst wurde sich mit dem Labor, den Messinstrumenten, dem Aufbau und der Software zur Durchführung und Auswertung des Versuchs vertraut gemacht. Ein intuitives Verständnis für die zu beobachtenden Prozesse und zu benutzende Software wurde entwickelt, um den Versuch gut und sorgfältig durchzuführen. Untersuchungsgegenstand waren Halbleitermaterialproben bestehend aus AlGaAs bzw. GaAs, in denen Quantenpunkte eingebettet waren. Die Versuchsaufbauten mit den Proben QD3272, QD222 und QD2803 waren bereits vollständig aufgebaut und der zu verwendende Laser und die Kamera justiert.

Ziel war es, neben dem Kennenlernen und Vertrautmachen mit den Methoden des Versuchs, die in die Proben eingebetteten Quantenpunkte (QD) zu identifizieren und spektral zu untersuchen. Dazu wurden die in den aufgenommenen Spektren gut erkennbaren Peaks hinsichtlich ihrer Relevanz und Aussagekraft gedeutet.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Halbleiter

Halbleiter werden durch ihre spezifische elektrische Leitfähigkeit charakterisiert, welche zwischen der von Metall und der von Isolatoren liegt.

$$\sigma_{s,Isolator} = 10^{-10} \frac{\Omega}{m} < \sigma_{s,HL} < 10^6 \frac{\Omega}{m} = \sigma_{s,Metall} \quad (1)$$

Halbleiter zeichnen sich durch ihre Bandlücke aus. Elektronen in Bindungszuständen befinden sich im Valenzband und tragen somit nicht zum Ladungstransport bei. Freigesetzte Elektronen befinden sich im Leitungsband. Energien zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband befänden sich in der Bandlücke und sind deshalb nicht möglich.

Man unterscheidet zwischen elementaren Halbleitern und Verbindungshalbleitern. Während elementare Halbleiter aus Elementen aus der vierten Hauptgruppe bestehen, bestehen Verbindungshalbleiter aus Elementen der zweiten und sechsten oder der dritten und fünften. Zu letzterem gehört auch GaAs.

2.2 GaAs/AlGaAs-Heterostrukturen

Bei Heterostrukturen werden verschiedene Halbleiter mit unterschiedlicher Bandlücke aufeinander abgeschieden. Da GaAs und AlGaAs ähnliche Gitterkonstanten haben, eignet sich diese Kombination gut für Versuche.

Es wurde mit einer direkten Bandlücke gearbeitet, das bedeutet, die minimale Bandlücke befindet sich am Γ -Punkt. Die Bandlücke am Γ -Punkt wird durch Gleichung 2 beschrieben.

$$E_g(T) = E_g(T = 0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2)$$

Die Varshni-Parameter am Γ -Punkt sind dabei:

$$GaAs : E_g(T = 0) = 1,519eV, \alpha = 5,405e - 4eV/K, \beta = 204K$$

Die Bandlücke für ternäre Halbleiter wird hier angenähert durch:

$$E_{AB} = E_B + (E_A - E_B - C)x + C \cdot x^2 \quad (3)$$

$$AlGaAs: C = -0,127 + 1,310x \text{ (Bowling-Parameter)}$$

2.3 GaAs Quantenpunkte (QD) und harmonische Oszillator (HO) Näherung

Quantenpunkte sind 0-dimensionale Fehlstellencluster, in denen Elektronen wegen des entstehenden Potenzials eingeschlossen werden können. Aufgrund der Quantenmechanik können nur diskrete Energieniveaus ähnlich eines harmonischen Oszillators angenommen werden.

Eine Näherung durch einen HO mit dem parabolischen Potenzial

$$V = \frac{1}{2} \cdot m^* \omega_x^2 r^2 \quad (4)$$

ist daher möglich.

Die vom harmonischen Oszillator bekannten Eigenenergien ergeben bei 3-dimensionaler Schwingungsfreiheit unter Annahme von Isotropie die Formel:

$$E_{n,HO} = \hbar\omega \left(n_x + n_y + n_z + \frac{3}{2} \right) \quad (5)$$

Hier ist n_i jeweils das Energieniveau fürs das jeweilige Freiheitsgrad und $\hbar = 6,626 \cdot 10^{-31} Js = 4,136 \cdot 10^{-15} eVs$ Neben der Spinentartung folgt die einzige andere Entartung aus den Parametern $n_{x,y,z}$ (Tab. 1).

$E_{n,HO}$	Entartung
E_0	1×2
E_1	3×2
E_2	6×2

Tabelle 1: Entartungen bei verschiedenen E_n

Durch Gleichsetzen von $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$ und Gleichung 4 folgt die Gleichung 6 für die Oszillatorlänge.

$$\lambda^2 = \frac{4\hbar^2}{m^*\hbar\omega} \quad (6)$$

λ entspricht in der Näherung der isotropen Quantenpunkte ungefähr der Größe der Quantenpunkte oder auch $2 \cdot r$, auch Oszillatorlänge genannt.

An den Übergängen von $Al_xGa_{1-x}As$ zu GaAs in unserer Probe entsteht bei $T \approx 300K$, am X-Punkt ein Sprung zwischen deren Valenzbändern von näherungsweise:

$$\Delta E_\nu = -0,46x \text{ eV} \quad (7)$$

2.4 Photolumineszenz-Spektroskopie (PLS)

Durch das Beleuchten mit Laserlicht unter nicht-resonanter Anregung (Laserenergie oberhalb der Bandlücke vom Barrierematerial) werden Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben. Im Valenzband entstehen durch die fehlenden Ladungsträger "Löcher".

Das Paar aus Elektronen und Löchern bleibt bei tiefen Temperaturen elektrostatisch gebunden und bildet ein Quasiteilchen, das Exziton. Ein angeregtes Elektron gibt Energie in Form von Phonon-Emissionen ab und gelangt dadurch in niedrigere Energiezustände innerhalb der Bandlücke. Wenn das Elektron die Bandlücke überspringt, wird ein Photon emittiert. Die durch diese Photonen entstehende Kennlinie von Volumenhalbleitern gibt typischerweise Auskunft über die Energie der Bandlücke des Materials.

Wenn diese Linie sich für hohe Energien verbreitet, ist das ein Hinweis auf Energieübergänge zwischen Elektronen, die energetisch über dem Leitungsband liegen, und Löchern, die unterhalb des Valenzbandes liegen. Dieser Effekt wird durch die Fermi-Verteilung erklärt.

Wir betrachten Quantenpunktensembles, da einzelne QDs zu wenig Licht emittieren.

Die Energie des dadurch emittierten Photons lässt sich aus den anderen Energien bestimmen durch:

$$E_n = E_{GaAs} + E_e + E_h - E_C \quad (8)$$

E_n : Energie des emittierten Photons, E_{GaAs} : Energie der Bandlücke,

E_e : Elektronen-Quantisierungsenergie, E_h : Loch-Quantisierungsenergie,

E_C : elektrostatische Bindungsenergie

Je höher die Leistung des Lasers ist, desto höhere Energieniveaus können durch die angeregten Elektronen besetzt werden. Die Auswahlregeln dieser optischen Übergänge erlauben Übergänge näherungsweise nur zwischen Zuständen mit gleichem Index.

Gemessen wird die Energie der Photonen, die aus den Übergängen von $E_{n,e}$ zu $E_{n,h}$ entstehen. Bei dem gemessenen Wert handelt es sich schlussendlich um die möglichen Werte von Gleichung 8.

2.5 Formeln für Auswertung

Durch Subtrahieren von E_0 von E_1 (Glg.8) folgt:

$$E_1 - E_0 = E_{1e} - E_{0e} + E_{1h} - E_{0h} = \hbar\omega_e + \hbar\omega_h \quad (9)$$

Unter Annahme einer gleichen Oszillatorlänge für beiden Ladungstypen (Glg. 6) und folgendem Gleichsetzen der beiden Oszillatorlängen kommt man auf den Ausdruck $\hbar\omega_h = \hbar\omega_e \cdot \frac{m_e^*}{m_h^*}$. Mit diesem Ausdruck und Gleichung 9 folgen dann:

$$\hbar\omega_e = \frac{E_1 - E_0}{1 + \frac{m_e^*}{m_h^*}} \quad (10)$$

$$\hbar\omega_h = \frac{E_1 - E_0}{1 + \frac{m_e^*}{m_e^*}} \quad (11)$$

Für das hier untersuchte GaAs ist $m_e^* = 0,066m_0$ und $m_h^* = 0,05m_0$, wobei $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}kg$ die Normalmasse eines freien Elektrons ist.

Durch Verwendung von Gleichung 5 und 8 kann die Formel zur Berechnung der Elektron-Loch-Bindungsenergie hergeleitet werden:

$$E_C = \frac{3}{2}(E_1 - E_0) - (E_0 - E_{GaAs}) \quad (12)$$

2.6 Exzitonen und Biexzitonen

Wie bereits geschildert sind Exzitonen elektrostatisch gebundene Paare aus Elektronen und Löchern. Durch die Spin-Entartung können neben den Exzitonen auch Biexzitonen auftreten, in denen dann zwei Elektronen-Loch-Paare gebunden sind. Die Energien dieser Zustände (E_X , E_{XX}) setzen sich durch die abstoßenden und anziehenden Coulombkräfte zusammen:

$$\begin{aligned} E_X &= E_e + E_h - C_{eh} \\ E_{XX} &= 2E_e + 2E_h - 4C_{eh} + C_{ee} + C_{hh} \end{aligned} \quad (13)$$

Die Biexziton-Bindungsenergie ist die Aufspaltung zwischen den einzelnen Linien der PLS.

$$E_X - E_{XX} = 2C_{eh} - C_{ee} - C_{hh} \quad (14)$$

3 Experimenteller Aufbau

Der Aufbau des Experiments war im Vorfeld bereits fertiggestellt worden, sodass an der Hardware nichts mehr verändert oder eingestellt werden musste.

Das Spektrometer selbst besteht aus vielen Bauteilen. Als Lichtquellen stehen ein Laser zum Anregen der QDs oder alternativ eine LED zum besseren Fokussieren der Kamera auf die Proben zur Verfügung. Das Laserlicht wird durch einen Strahlteiler mit Reflexionsanteil von 10% und Transmissionsanteil von 90% aufgeteilt und auf die Probe gelenkt. Bei den temperaturabhängigen Messungen kann die Probe durch ein Kryostat heruntergekühlt werden. Anschließend sorgt ein beweglicher Spiegel dafür, dass das emittierte Licht entweder in die Mikroskopkamera oder durch einen Filter auf den Bildsensor des Monochromators fällt. Letzteres bewirkt, dass das Licht in seine spektralen Anteile aufgeteilt von dem Bildsensor aufgenommen wird.

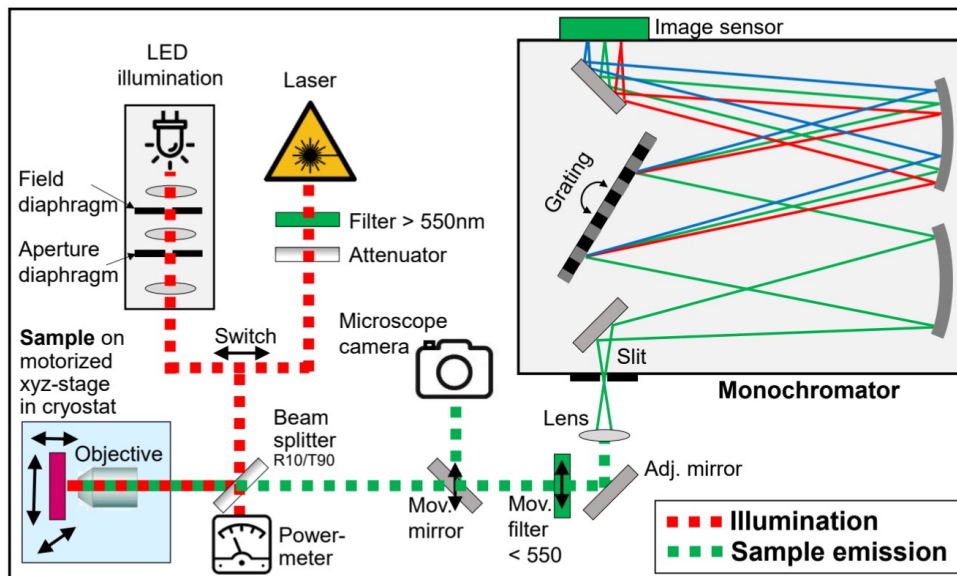


Abbildung 1: Schematische Darstellung des PLS [1]

Für den ersten Teil des Versuchs wurde der Aufbau PL2 verwendet. Für den zweiten Teil des Versuchs ändert sich bei PL1 im Vergleich zu PL2 an dem schematischen Aufbau sehr wenig. Lediglich das Kryostat von PL1 ist deutlich leistungstärker und der Monochromator hat eine bessere spektrale Auflösung.

Aufgrund technischer Probleme ist dieser in der Durchführung leider nicht zum Einsatz gekommen.

Die Steuerung der Bauteile und die Aufnahme der Daten ist durch dafür zur Verfügung gestellte Programme direkt an den Computern im Labor erfolgt.

Sie zeigen aber Daten, die mit PL1 gemessen wurden

, vibriert vernachlässigbar

Reihenfolge sollte aufsteigend

4 Durchführung und Messdaten

Als Erstes wurde sich mit allen Komponenten des Versuchsaufbaus vertraut gemacht und die Software getestet. Damit wurde sich ein generelles Verständnis zu den Möglichkeiten und Grenzen des experimentellen Aufbaus erarbeitet, wodurch das anschließende Vermessen der QDs ermöglicht wurde.

Um die QDs richtig und gut vermessen zu können, wurde zunächst mithilfe der Kamera und der LED die Probe QD3272 fokussiert. Dafür wurde die Probe mittels einer Probenbühne in der XY-Ebene senkrecht zum Objektiv in μm -Schritten verschoben, bis keine Verunreinigungen mehr sichtbar waren. Anschließend wurde die LED und die Kamera ausgeschaltet und der Laser aktiviert. Mithilfe des Lasers auf schwacher Leistung wurde das Objektiv auf die richtige z-Höhe der zu untersuchenden QDs innerhalb der Probe fokussiert. Der ganze Prozess der Fokussierung unterlag vielen Unsicherheiten und Fehlerquellen wie Vibration oder schlechter Sichtbarkeit.

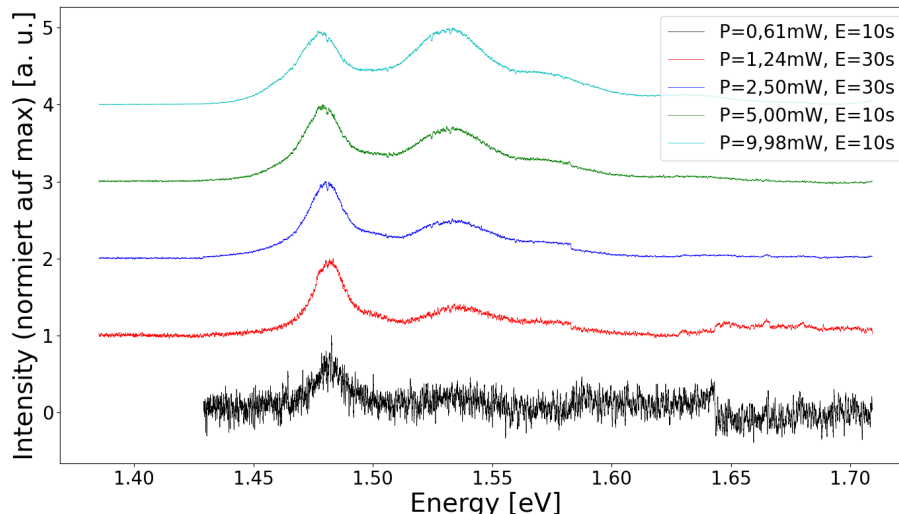
Sobald die Fokussierung abgeschlossen war, wurde mit dem Messen begonnen.

Diese Messung lieferte einen Referenzwert für GaAs (Probe QD3272) bei Raumtemperatur (Abb. 6, roter Graph).

Da sich die zweite Probe auf demselben Kupferblock direkt neben der ersten befindet, musste lediglich die x-Position der Probenbühne um etwa $1mm$ verändert werden, um die zweite Probe QD222 zu vermessen. Trotzdem wurde der Fokussierungsprozess erneut durchlaufen, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen.

Der Laser wurde bei einer Leistung von $0.7\mu W$ und $z = -6\mu m$ justiert. Um das Spektrum der Probe aufzunehmen, wurde der Monochromator auf eine Breite von $650nm - 900nm$ und eine Belichtungszeit von $1s$ eingestellt. Die Laserleistung wurde für die Messung auf $5mW$ erhöht. Abb.?

Zur Bestimmung des genauen Wellenlängenbereichs wurde die Γ -Linie des Probenmateri-



Barrieren...

Abbildung 2: Spektren der Leistungsserie der Probe QD222 bei einer Temperatur von $T \approx 296K$

wo im Text?

als unter Berücksichtigung des Aluminiumanteils betrachtet. Bei Raumtemperatur ($296K$) sollte theoretisch ein Peak bei $1,744eV$ also $710nm$ auftauchen. Somit wird der Monochromator explizit auf den Wellenlängenbereich um $710nm$ eingestellt, um ein schnelles und gutes Messergebnis zu erzielen. Zusätzliche Funktionen der Software wie "auto line" und "remove dark" sorgen für die automatische Fokussierung der richtigen Linie und filtern das Rauschen aus den Messwerten heraus. Damit wird das Einstellen der Parameter und direkte Visualisieren der Messergebnisse deutlich übersichtlicher. ← **Abb.?**

Für die darauf folgende Messreihe an Spektren in Abhängigkeit der Laserleistung (Abb. 4) wurden die eingestellten Parameter nicht weiter verändert.

Neben der Laserleistung hat auch die Temperatur der Probe einen Einfluss auf das spektrale Verhalten. Um das zu messen, wurde die Probe auf ca. $38K$ heruntergekühlt.

Während die Probe abgekühlt wurde, wurden weitere Messreihen aufgenommen. Hierzu musste stetig nachfokussiert werden. Da sich allerdings die Position der Probe durch starke Vibration des Kryostats während der Messung immer wieder verändert, sind die Messungen dennoch relativ ungenau. Eine gewisse Tendenz lässt sich aus den Messdaten trotzdem gut ablesen.

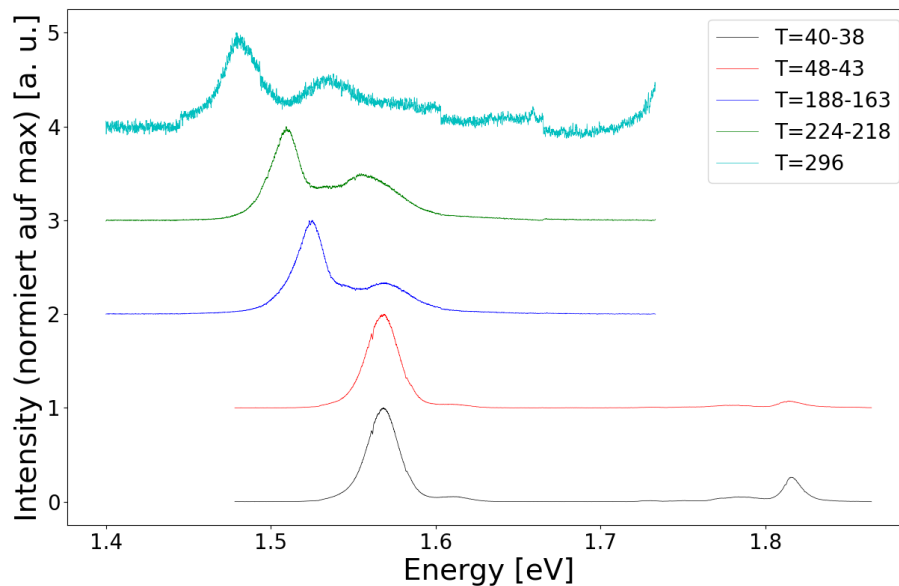


Abbildung 3: Spektren der Temperaturserie der Probe QD222 bei einer Laserleistung von $P = 1,57mW$, Temperatur in K

wo im Text?

Nachdem der Kühlvorgang abgeschlossen war, wurde die Probe bei konstanter Temperatur von ungefähr $38K$ in Form einer Leistungsserie vermessen. Hierfür wurde erneut intensiv fokussiert, um die Genauigkeit der Messung hochzuhalten. ← **Abb.?**

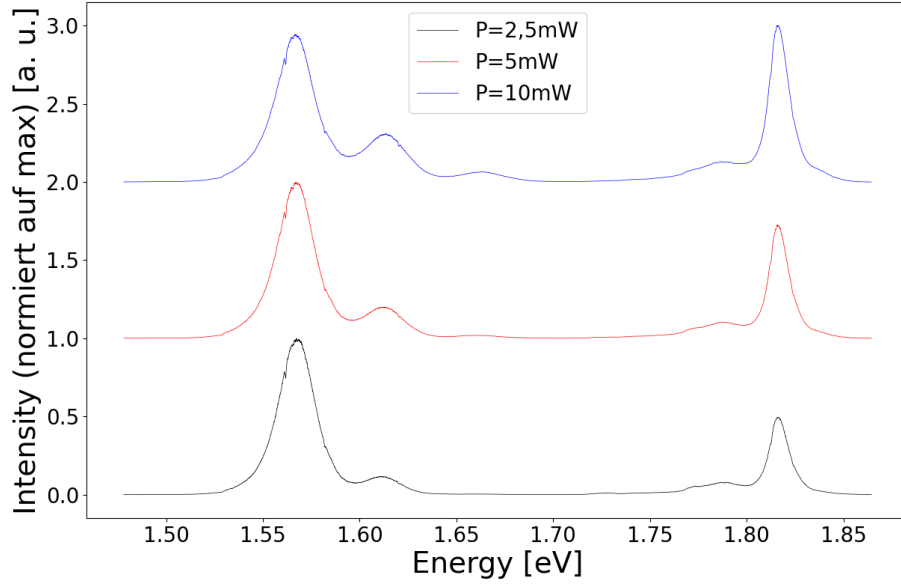


Abbildung 4: Weitere Leistungsserie der Probe QD222, aber bei einer Temperatur von $T \approx 38K$.

Aufwärmen / abgeschaltetem Kühler?

Schließlich sollten noch Messungen beim Abkühlen gemacht werden. Hierfür wurde wieder auf Probe QD3272 fokussiert und das Kryostat und damit auch die Vibrationen wieder abgeschaltet.

Während sich die Probe langsam erwärmt, wurde eine neue Messreihe mit konstanter Laserleistung von $0,5mW$ aufgenommen. Dieses Mal allerdings bei niedrigen Temperaturen.

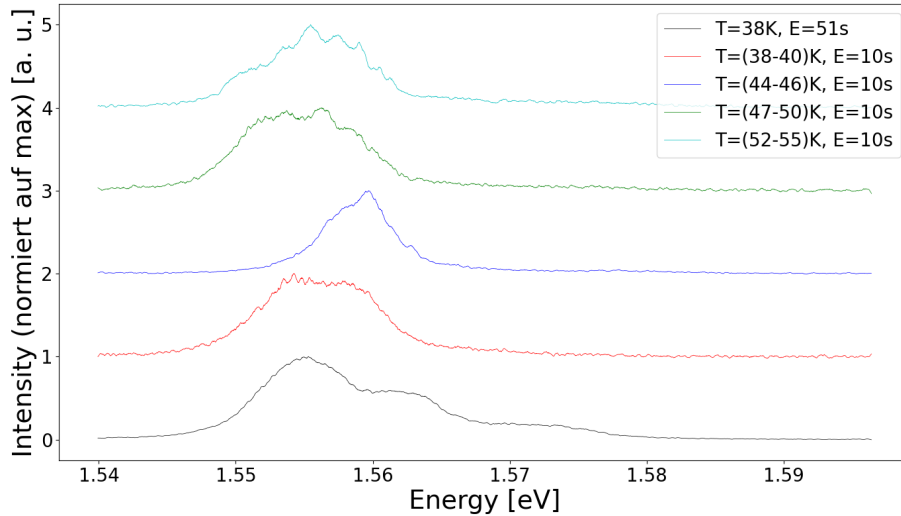


Abbildung 5: Temperaturserie der Probe QD3272. 38K mit Kühlung, restliche Werte bei ausgeschalteter Kühlung. Laserleistung von $P = 0,5mW$. Jeweils normiert auf maximalen Wert und der Übersichtlichkeit halber übereinander geplottet.

Abschließend wurden alle Messgeräte wieder abgestellt.

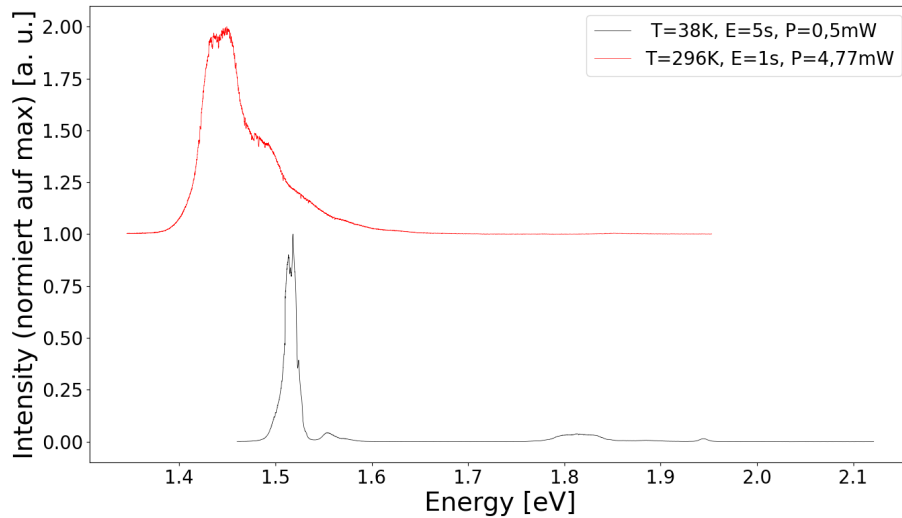


Abbildung 6: Vergleich der Spektren von Probe QD3272 bei Raumtemperatur und 38K. Laserleistung von $P = 0,5mW$. Jeweils normiert auf maximalen Wert und der Übersichtlichkeit halber übereinander geplottet.

Im zweiten Teil des Versuchs wird vom Photolumineszenz-Spektrometer PL2 auf PL1 gewechselt. Dieses konnte auch per Fernsteuerung von Zuhause aus bedient werden.

Aufgrund der bereits erwähnten technischen Probleme vor Ort wurde aber nicht der ursprünglich vorgesehene Monochromator verwendet, sondern ein anderer mit größerer Brennweite. Durch Anpassen der Belichtungszeit und "stitchen", also mehrmaligem Messen hintereinander in veränderten Wellenlängenbereichen und anschließendes Zusammenfügen der Messdaten, konnten gute Messreihen aufgenommen werden. Zuerst wurde der Monochromator auf eine Wellenlänge von $750nm$ eingestellt und damit eine Leistungsserie bei Raumtemperatur von der Probe QD2803 gemessen. Dazu wurde die Laserleistung von $0,45\mu W$ schrittweise auf $42\mu W$ erhöht. Wie in Tabelle 2 zu erkennen, wurde die Belichtungszeit

In Abb. 7 liegt bei den unteren Messung die zentrale Energie bei etwa 1.547 eV, das entspricht 801 nm

$P/(\mu W)$	Belichtungszeit/(s)
0,45	200
0,92	176
2,08	176
4,22	100
8,04	50
19	30
42	15

Tabelle 2: Messwerte der Leistungsserie von Probe QD3272 mit PL1

mit steigender Laserleistung immer weiter verkürzt. Ab einer Leistung von $19\mu W$ wurde der Monochromator von $750nm$ auf das stichen für den Bereich von $750nm - 800nm$ eingestellt. Dies hatte den Grund, dass ab dieser Leistung der Peak der d-Schale ~~etwas~~ zu erkennen war.

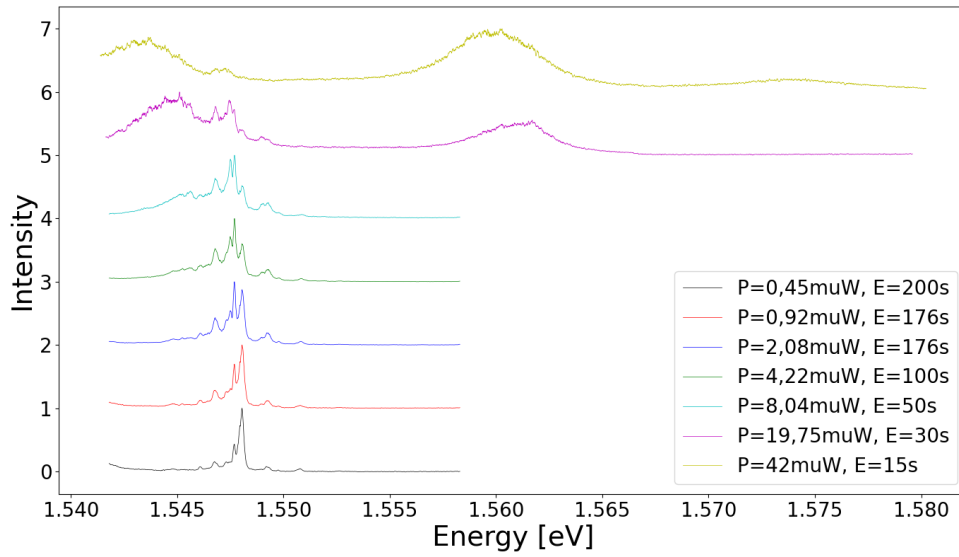


Abbildung 7: Leistungsserie von Probe QD2803 bei Raumtemperatur. Jeweils normiert auf maximalen Wert und der Übersichtlichkeit halber übereinander geplottet.

5 Auswertung

Das Plotten und Fitten der Messreihen fand mit vom Versuchsbetreuer bereitgestellter Software [2], [3] statt. Bei allen Plots wurden einige Schritte vor der Darstellung durchgeführt. Bei gestitchten Aufnahmen wurden die y-Werte in der Höhe zusammengeschnitten. Die Werte wurden geglättet, in dem die Messreihen über je 35 Werte gemittelt wurden. Abschließend wurde von Wellenlänge [nm] zu Energie [eV] umgerechnet. Zum Teil wurde zusätzlich noch auf den höchsten Wert normiert.

5.1 Einflüsse von Temperatur und Laserleistung

Änderungen der Temperatur oder Leistung des Lasers beeinflussen das Spektrum der Probe. Mit steigender Laserleistung werden schlicht deutlich mehr Teilchen in höhere Niveaus angeregt, was zu einer signifikanten Erhöhung der Abstrahlung durch die Probe führt. Die Temperatur beeinflusst anschaulich gesagt, wie schnell sich die Teilchen wieder verflüchtigen, bevor sie zur Anregung bzw. zur Abstrahlung der Probe beitragen können. Je höher die Temperatur ist, umso schneller löschen sich die Elektronen-Loch-Paare aus. Bei niedrigen Temperaturen werden die Peaks in energetisch höhere Bereiche verschoben.

5.2 Elektron-Loch-Bindungsenergie

$P/(mW)$	5	2,5	1,24	0,61
E_0/eV	1,48	1,48	1,48	1,48
E_1/eV	1,54	1,54	1,54	1,54

Tabelle 3: Energien der E_0 und E_1 Peaks bei Leistungsserie der Probe QD222.

Belichtungszeiten sind Abbildung 2 zu entnehmen.

← Temperatur?

Mit Gleichung 10 und 11 können anhand dieser Werte $\hbar\omega_e$ und $\hbar\omega_h$ bestimmt werden zu:

$$\hbar\omega_e = 25,9meV$$

$$\hbar\omega_h = 34,1meV$$

Dadurch, dass E_0 und E_1 nun bekannt sind, kann die Elektron-Loch-Bindungsenergie (Glg. 12) für Raumtemperatur bestimmt werden:

$$E_C = 32meV$$

Da E_{GaAs} , also die GaAs-Bandlückenenergie, nur für Raumtemperatur bekannt ist, kann dies nicht temperaturabhängig bestimmt werden.

das ist ungewöhnlich, normalerweise ist die Loch-Quantisierungsenergie aufgrund der effektiven Masse kleiner

5.3 Oszillatorlänge

Die Oszillatorlängen der Probe QD222 bei verschiedenen Temperaturen können aus den Spektren der Temperaturserie von QD222 - dargestellt in Abbildung 3 - und Gleichung 6 berechnet werden. Das führt zu Werten für E_0 , E_1 und λ abhängig von der Temperatur (Tab. 4). Die Raumtemperatur war dabei circa $296K$.

$T/(K)$	296	221	176	46	38
E_0/eV	1,48	1,51	1,52	1,57	1,57
E_1/eV	1,53	1,55	1,57	1,61	1,61
$\hbar\omega_e/meV$	38,8	17,2	21,6	17,2	17,2
λ/nm	13,35	16,36	14,62	16,36	16,36

Tabelle 4: Mittels Gauss-Fit bestimmte Energien E_0 und E_1 der Peaks bei Temperaturserie (Abb. 3) der Probe QD222 mit konstanter Laserleistung $P = 1,57mW$ und die daraus berechneten Oszillatorlängen. Die Belichtungszeit ist jeweils $10s$. Da die Werte während des Abkühlens gemessen wurden, handelt es sich bei Temperaturangaben um die Mittelwerte aus Temperaturen bei Start und bei Ende der Messung.

kleiner

Die Werte für die Oszillatorlängen (Tab. 4) entsprechen nicht den Erwartungen. Obwohl in Abbildung 3 eine deutliche Energieverschiebung der Peaks zu höheren Energien zu erkennen ist, verhalten sich die Peaks zueinander nicht wie erwartet. Die Oszillatorlänge sollte mit sinkender Temperatur größer werden. Die Länge bei der $T \approx 221K$ fällt bei dieser Messung allerdings aus der Reihe. Dies könnte auf ungenaue Fokussierung zurückzuführen sein.

5.4 Bestimmung von Temperatur und Aluminiumanteil

Wenn aus einem gemessenen Spektrum die Energie des GaAs-Bandlückenpeaks abgelesen wird, kann mit Gleichung 2 die Temperatur des GaAs bestimmt werden.

Ebenso ist es möglich, mit dem Energiewert des AlGaAs-Bandlückenpeaks und Gleichung 2 den Aluminiumanteil der Probe zu bestimmen, da dieser Peak vom Aluminiumanteil abhängig ist (Abb. 8).

In der Leistungsserie 4 wurde der AlGaAs-Peak mitgemessen, es kann also die Temperatur oder der Aluminiumanteil bestimmt werden.

Wird die Temperatur mit $T = 50K$ als bekannt angenommen, kann der Aluminiumanteil bestimmt werden. Für den AlGaAs-Peak bei $E \approx 1,82eV$ folgt ein Aluminiumanteil von $x \approx 21\%$. Dies liegt sehr nahe an dem erwarteten Wert von $x = 22\%$.

Wird der Aluminiumanteil mit dem Wert $x = 22\%$ als bekannt vorausgesetzt, folgt aus dem AlGaAs-Peak bei $E \approx 1,82eV$ für die Temperatur nach Gleichung 2 und Abbildung 8, dass $T \approx 106K$ beträgt. Dies liegt weit über der erwarteten Temperatur von weniger als $50K$. Da es sich bei dem Energiewert des Peaks jedoch sowohl um einen Mess- oder Kalibrierungsfehler, als auch um einen Ablese- und Rundungsfehler handeln kann, befinden wir uns dennoch im zu erwartenden Bereich. Bei einem GaAs-Bandlückenpeak von $1,832eV$ -

$1,835\text{eV}$ würde die abgelesene Temperatur beispielsweise 40K - 60K betragen.

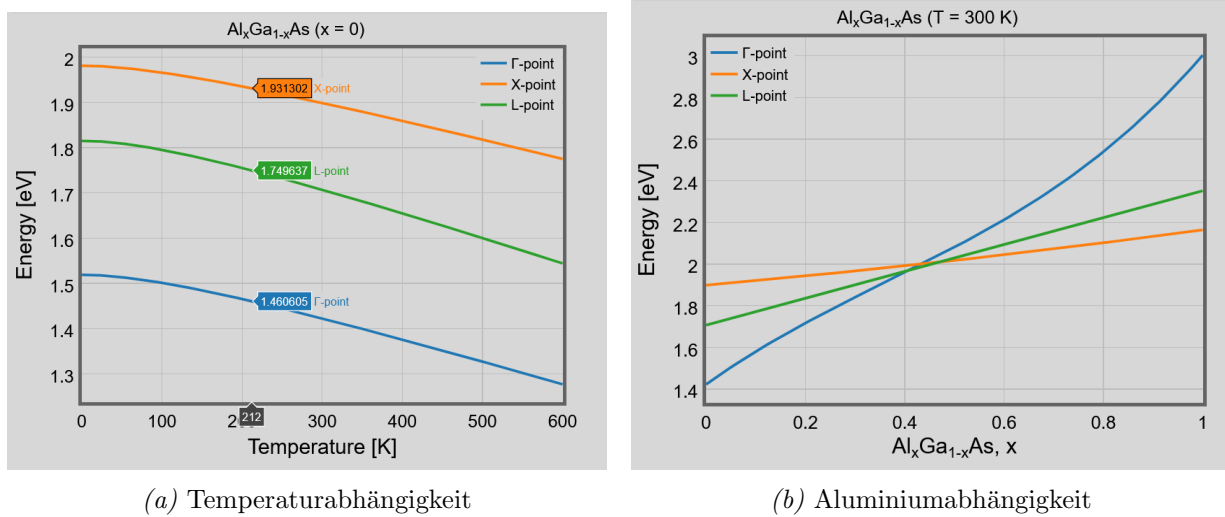


Abbildung 8: Bandlücke von $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ abhängig von Temperatur, Aluminiumanteil und Punkt im Gitter. (Fotos von [4])

5.5 Modell: Harmonischer Oszillator

Als Näherung wurde in der Betrachtung und Auswertung der Messwerte das Modell des harmonischen Oszillators gewählt. Begründet ist das unter anderem mit den näherungsweise äquidistanten Energieniveaus, die unter Anregung in den QDs besetzt werden können. Auch die Verwendung der Formeln für beispielsweise die Oszillatorlänge liefern in Näherung sinnvolle Ergebnisse. Durch zusätzliche Störquellen wie Rauschen, vor allem bei niedrigen Intensitäten, wird das Modell zunehmend schlechter. Aufgrund fehlender alternativen und einigermaßen zufriedenstellender Ergebnisse wurde sich trotzdem entschieden, das Modell anzunehmen und anzuwenden.

Was wurde mit dem Modell ausgewertet?

5.6 Aufspaltung Exziton-Biexziton

In Abbildung 7 ist die Exziton- und Biexzitonaufspaltung erkennbar. Diese bewegt sich in einer Größenordnung von $1,5\text{meV}$ - 3meV . Abgelesen aus Abbildung 9 folgen die Werte:

$$E_X \simeq 1,547\text{eV}$$

$$E_{XX} \simeq 1,545\text{eV}$$

und damit:

$$\Delta E_{X,XX} \simeq 2\text{meV}$$

Dieser Wert liegt also in dem erwarteten Bereich.

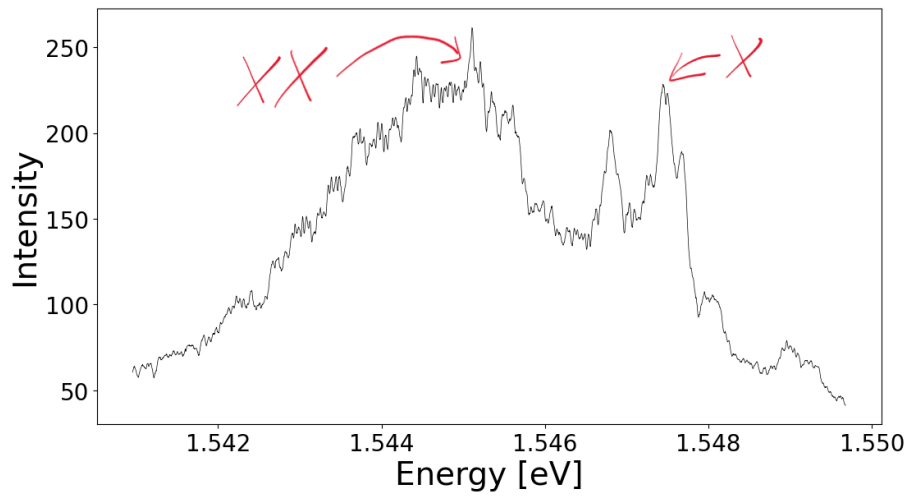


Abbildung 9: Kommentiertes Lumineszenzspektrum der Probe QD2803. $T = 296\text{K}$, $P = 19,75\mu\text{W}$, $E = 30\text{s}$. Zuordnung der Peaks mit [5]. Spektrum auch in Abbildung 7 dargestellt.

6 Diskussion

In diesem Experiment gab es eine Vielzahl an systematischen Fehlerquellen.

Die offensichtlichsten Fehler sind durch Einflüsse wie das Wackeln des Tisches durch sich bewegende Personen im Raum oder durch die Vibrationen von Kryostat und Pumpe bei eingeschalteter Kühlung entstanden. Auch bestand ein gewisser Abstand zwischen dem Kryostat und der Probe, wodurch die Temperatur des Kryostats nicht unbedingt exakt der Temperatur der Probe entspricht.

Verunreinigungen im Halbleitermaterial oder einfach Staub auf der Probenoberfläche könnte zu schwächer ausgeprägten Peaks oder fälschlich detektierten Peaks führen. Ferner und in Kombination mit den erwähnten Fehlern wurden die Proben mehrmals an unterschiedlichen Stellen betrachtet, was die Vergleichbarkeit der Messdaten einschränken könnte. Menschliche Fehler, wie der Fokussierungsprozess nach Augenmaß oder das Ablesen der Messwerte an den Graphen mit bloßem Auge, sind ebenfalls durchaus relevant.

Trotz Abdeckung des Versuchsaufbaus könnte ein Rest an Streulicht zu den Photosensoren gelangen und die Messung leicht verfälschen ($\approx 0,1 \mu W$ Lichtleistung). Weiterhin trat auch hier das bekannte thermische Leuchten in den Aufnahmen der Kamera bei langer Belichtungszeit auf. Hervorgerufen wurde dies durch die Infrarotstrahlung der eingebauten Elektronik der Kamera selbst.

Ferner entstanden auch durch das Stitchen bei Aufnahme der Messdaten eventuell Fehler, da hier der letzte Messwert eines Teils des Messbereichs mit dem ersten des nächsten gleichgesetzt wurde, um ein durchgängiges Spektrum zu erzeugen.

Die statistischen Fehler sind in diesem Versuch durch die extrem hohe Anzahl an Photonen bei jeder Messung weniger signifikant und vernachlässigbar.

7 Zusammenfassung

In dem Versuch konnte bestätigt werden, was versucht wurde zu messen. Ferner wurden auch Kenntnisse und Erfahrungen zur Datensammlung und Verarbeitung im wissenschaftlichen Kontext (vor allem der Festkörperphysik) erlangt.

Durch Anregung der Proben mittels Laser kam es zu Photolumineszenz der Halbleiter-Quantenpunkte. Diese ist Kernelement und namensgebend für den Versuch. Es wurden mittels Spektroskopie die QDs in den Proben lokalisiert und hinsichtlich Ausdehnung und Energieniveaus der Anregung untersucht.

Darüber wurden die Ausdehnung der QDs und ihre Energien bestimmt. Das Modell des harmonischen Oszillators wurde gleichzeitig kritisch überprüft und in angemessener Näherung für diesen Zweck auch verifiziert.

Ferner sollte eine Methode zur Temperaturbestimmung mithilfe der Spektroskopie gefunden werden. Dafür muss der genaue Anteil der Elemente in dem Halbleiter bekannt sein, da für jede Konfiguration eine eigene Kennlinie existiert. Diese Kennlinie sagt aus, bei welcher Temperatur das Material mit welcher Wellenlänge (bzw. Energie) nach der Anregung abstrahlt. So lassen sich durch Abgleich der gemessenen Wellenlängen/Energien der Kennlinien einer Probe die Temperatur dieser Probe bestimmen.

Da alle Ergebnisse wie erwartet ausgefallen sind, ist die Versuchsdurchführung als erfolgreich einzuordnen.

Literatur

- [1] Ch. Heyn. *Anleitung zum Praktikumsversuch. Photolumineszenz von Halbleiter Quantenpunkten*. Versuchsmappe zum Fortgeschrittenpraktikum des Physikbachelorstudiums der Universität Hamburg. Feb. 2023.
- [2] Ch. Heyn. *ImageSpeacReader: Viewer for spectrometer images*. sent by author. Version unkown.
- [3] Ch. Heyn. *SpeacReader: Software for viewing data files*. sent by author. Version unkown.
- [4] iap.physnet.uni-hamburg.de. *Bandgap plots of some III/V-Semiconductor Materials*. http://iap.physnet.uni-hamburg.de/group_w/members/cheyn/Bandgap/IIIV-Materials.html. Accessed: (05.09.2024). 2024.
- [5] L. Ranasinghe u. a. „Luminescence from Droplet-Etched GaAs Quantum Dots at and Close to Room Temperature“. In: *Nanomaterials* (2021).