

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	2
2.1 Materialsysteme	2
2.1.1 Galliumarsenid	2
2.1.2 Oberflächenzustände der Galliumarsenid-Nanodrähte	3
2.1.3 Aluminiumgalliumarsenid	4
2.1.4 Funktionsweise der AlGaAs-Ummantelung	5
2.2 Technologie	7
2.2.1 Nanodrahtwachstum	7
2.2.2 Ätzen der Nanodrähte	8
2.2.3 Nanodrahttransfer	9
2.2.4 Nanodraht-Kontaktierung	9
2.2.4.1 Lösungsmittelreinigung	10
2.2.4.2 Fotolack und Fotolackbeschichtung	10
2.2.4.3 Maskenjustier- und Belichtungsanlage	11
2.2.4.4 Ätztechnik	12
2.3 Photolumineszenz	13
2.4 Laser	15
2.4.1 Absorption	15
2.4.2 Spontane Emission	18
2.4.3 Stimulierte Emission	18
2.4.4 Bedingung für die Erzeugung von Laser	19
2.4.5 Fabry-Perot-Resonator	21
2.4.6 Whispering-Gallery-Moden	24
3. Durchführung	25
3.1 Technologie	25
3.1.1 Prozesstechnologie der Probe M4581_1	25
3.1.2 Prozesstechnologie der Probe M4581_2	28
3.2 Aufbau des DC-Messplatzes	31
3.3 Rasterelektronenmikroskop	32
3.4 Aufbau des Photolumineszenzspektroskopie Messplatzes	34
3.4.1 Ablauf der Messung	35

4. Auswertung	38
4.1 Messergebnisse der elektrischen Charakterisierung	38
4.1.1 Messergebnisse der Probe M4581_1	38
4.1.2 Messergebnisse der Probe M4581_2	40
4.2 Messergebnisse der Photolumineszenzspektroskopie	41
4.2.1 Messergebnisse der Probe M4581_1	41
4.2.2 Messergebnisse der Probe M4581_2	46
5. Zusammenfassung und Fazit	49
6. Literaturverzeichnis	51

1 Vorwort

Die Fortschritte der letzten Jahrzehnte im Bereich der Elektronik verifizierten das von Gordon Moore im Jahre 1965 verfasste „Moore’s law“, welches besagt, dass sich die Integrationsdichte von Schaltkreisen in einem Zeitintervall von 12 bis 24 Monaten verdoppelt. Um auch in Zukunft eine zunehmende Miniaturisierung von elektronischen Bauelementen gewährleisten zu können, ist die Forschung im Bereich der Nanotechnologie demnach unumgänglich. Ein wesentlicher Bestandteil der heutigen Forschung ist beispielsweise die Entwicklung eines möglichst effizienten, nanoskaligen Lasers.

Der Begriff Laser ist ein Akronym und steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“. Laserstrahlung zeichnet sich durch Monochromasie, hohe Strahlungsdichten, und durch hohe zeitliche und räumliche Kohärenz aus. Die geringe Strahldivergenz erlaubt eine präzise Fokussierung der Strahlung. Zudem können kurze Laserpulse im Femtosekundenbereich erzeugt werden. Laser finden heutzutage in sehr vielen Bereichen, wie z. B. der Unterhaltungsindustrie, Medizintechnik, Elektronik und Nachrichtenübertragung, Anwendung. Insbesondere Halbleiterlaser weisen im Vergleich zu anderen Varianten eine überdurchschnittliche Effizienz, kompakte Bauweisen und geringe Produktionskosten auf.

Die vorliegende Projektarbeit thematisiert die Untersuchung von Nanodrähten in Hinblick auf eine potenzielle Anwendung als elektrisch gepumpter Halbleiterlaser. Nanodrähte sind Strukturen, bei denen sich zwei Dimensionen im Nanometer-Bereich befinden, wohingegen die dritte Dimension der Länge entspricht und einige Mikrometer umfasst. Die Herstellung der Nanodrähte erfolgt in metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) mittels Vapour-Liquid-Solid-Prozess (VLS). Die in dieser Arbeit zu untersuchenden Nanodrähte bestehen aus dem Halbleiter Galliumarsenid (GaAs), das als aktives Medium und Resonator zugleich fungieren kann und aufgrund der Emissionswellenlänge im Infrarotbereich für die optische Nachrichtenübertragung besonders interessant ist. Jedoch besitzen Halbleitermaterialien den Nachteil, dass sich an der Grenzstruktur des Mediums Oberflächenzustände bilden. Diese ungewollte Eigenschaft wird bei geringen Strukturgrößen verstärkt. Bei Nanodrähten ist das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen deutlich größer als bei normalen Halbleiterbauelementen und die Oberflächenzustände bewirken deshalb hohe Ladungsträgerverluste. Eine Ummantelung aus Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) soll den Verlust an Ladungsträgern an der Oberfläche minimieren und den Gebrauch von GaAs-Nanodrähten als elektrisch gepumpte Laseremitter ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit ist die optische und elektrische Charakterisierung der AlGaAs/GaAs core/shell-Nanodrähte und die Erforschung des Einflusses der AlGaAs-Mantelstruktur auf die Lasing-

Eigenschaften des GaAs-Nanodrahtes. Die optische Charakterisierung geschieht per Photolumineszenzspektroskopie und Die elektrische Analyse des Halbleiter-Nanodrahtes erfolgt über die Aufnahme einer Strom-Spannungs-Kennlinie an einem DC-Messplatz.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Materialsysteme

2.1.1 Galliumarsenid

Der Verbindungshalbleiter Galliumarsenid (GaAs) besteht einerseits aus Gallium (Ga) mit der Oxidationsstufe +III und Arsen (As) mit der Oxidationsstufe +V. Anhand der Oxidationsstufe lässt sich die Anzahl der Valenzelektronen der einzelnen Atome ablesen. Bei der Verbindung teilen sich die beiden Atome ihre Elektronen und die p- und s-Orbitale der einzelnen Partner, aus welchen die Elektronen kommen, hybridisiern bei der Bindung zu gemeinsamen Orbitalen. Aufgrund der unterschiedlichen Elektronegativitäten der Atome (für Gallium 1,82 eV und für Arsen 2,2 eV) bildet sich eine polar kovalente Atombindung aus ^{1,2}. Das Galliumarsenid hat eine Gitterkonstante von 565,33 pm und kristallisiert in der Zinkblendestruktur, bei der ein Galliumatom tetraedrisch von vier Arsenatomen und ein Arsenatom wiederum von vier Galliumatomen umgeben ist. Bei der Zinkblende-Struktur sind zwei ineinander geschachtelte kubisch-flächenzentrierte Gitter um ein Viertel der Raumdiagonalen der kubischen Elementarzelle gegeneinander verschoben (Abb. 1) ³.

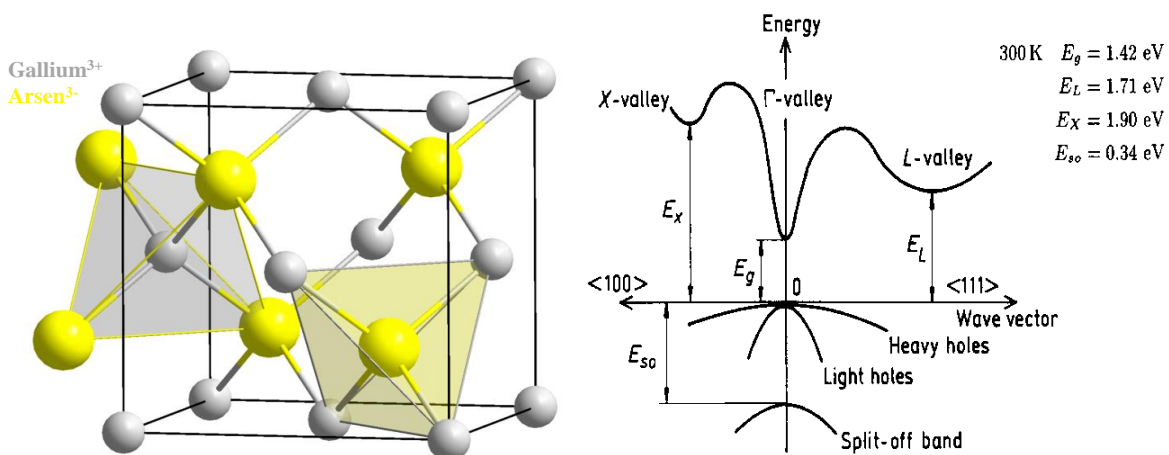


Abb.1: Bild links: Zinkblendestruktur des GaAs ⁴. Bild rechts: Bändermodell des GaAs ⁵

Das GaAs wird als direkter Halbleiter bezeichnet, da sich das Minimum des Leitungsbandes direkt über dem Maximum des Valenzbandes befindet. Daher ist der III/V-Verbindungshalbleiter ideal für die elektrische und optische Charakterisierung geeignet, weil Elektronen bei Anregung jeglicher Art

(Strom/Licht) keine Impulsänderung erfahren muss. Der Bandabstand von Halbleitern ist die benötigte Energie (E_g), die ein Elektron benötigt, um vom Valenzband ins Leitungsband am Nullpunkt des Impulsraums (wave vector) angehoben zu werden und beträgt bei GaAs bei 300 K 1,42 eV (Abb. 1). Dieser Nullpunkt im Impulsraum wird als Γ -Punkt der Brillouin-Zone bezeichnet. Am Γ -Punkt sind die zwei Valenzbänder, welche als Schwerlochband (heavy holes) und als Leichtlochband (light holes) bekannt sind, und das dritte Splitt-off-Band, das wegen der Spin-Bahn-Kopplung um E_{so} abgesenkt ist, entartet ⁶.

Bei der optischen Charakterisierung wird das Halbleitersystem bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Weil die Bandlückenenergie temperaturabhängig ist, kann mit der folgenden Formel die Bandlückenenergie bei verschiedenen Temperaturen bestimmt werden ⁷:

$$E_g = 1,519 - 5,405 \times \frac{10^{-4}T^2}{T + 204} \text{ eV}$$

Bei dieser Energie beträgt der Brechungsindex des Materials $n_{\text{GaAs}} = 3,63$ ⁸.

2.1.1 Oberflächenzustände Galliumarsenid-Nanodrähte

An der Grenzfläche Halbleitermaterial-Luft ist die Kristallstruktur unterbrochen und besitzt daher ungesättigte Elektronenpaare, die mit anderen Molekülen (z. B. Luftsauerstoff) reagieren. Dadurch verändern sich die Bindungsverhältnisse und die periodische Fernordnung des Kristalls wird nicht weiter fortgeführt. Überbegriffend werden alle Arten von Bindungen an der Oberfläche, die sich von den Bindungen im Volumenmaterial unterscheiden, als Oberflächenzustände benannt. Bei immer kleiner werdenden Strukturen vergrößert sich das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, d. h. aufgrund der speziellen Ausmaße der Nanodrähte haben die Oberflächenzustände einen viel größeren Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der GaAs-Nanodrähte als bei herkömmlichen größeren Halbleiterbauelementen.

Die Elektronen in der Grenzschicht können daher andere Energiezustände annehmen. Da die freien Plätze an der Oberfläche des Halbleitermaterials überwiegend energetisch niedriger liegen, sammeln sich die Elektronen dort und verlieren ihre Beweglichkeit. Die Oberfläche wird zunehmend negativ geladen und es entsteht ein elektrisches Feld. Mit zunehmender Anzahl der Elektronen an der Oberfläche steigt das elektrische Potential bis es für die Elektronen energetisch ungünstig wird die freien Plätze zu besetzen. Die Raumladung der Oberflächenpotentiale ist daraufhin im Gleichgewicht mit dem Potential im Volumeninneren. Die Fermi-Energie befindet sich in die Mitte der Oberflächenzustände, d. h. sie befindet in die Mitte der Bandlücke ⁹. Dieses Phänomen wird als Fermi-Energie-Pinning bezeichnet. In Abbildung 2 ist ersichtlich, dass das

Leitungs- (E_L) und das Valenzband (E_V) im Bänderdiagramm um die Größe des elektrischen Potentials verschoben sind ¹⁰.

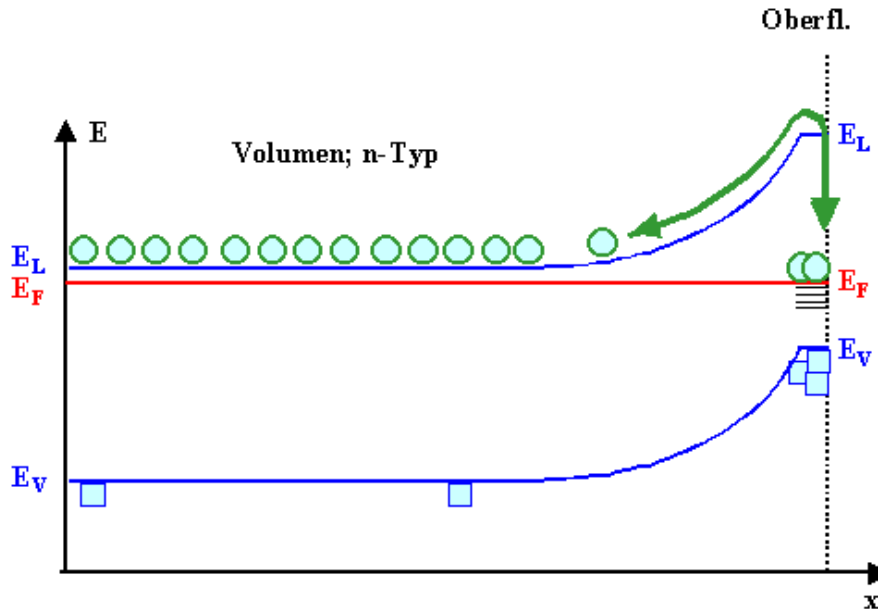


Abb.2: Bänderdiagramm eines Halbleiters lokal an der Oberfläche zur vereinfachten Erklärung der Einwirkung von Oberflächenzuständen ¹⁰.

Bei elektrischer Anregung der Nanodrähte wandern die Elektronen demnach an die freien Stellen an der Oberfläche und verbleiben dort, da sie dort einen energetisch günstigen Zustand einnehmen. Der Verlust der Ladungsträger kann mit einer AlGaAs-Mantelstruktur umgangen werden.

2.1.3 Aluminiumgalliumarsenid

Damit dem Verlust freier Ladungsträger infolge von Oberflächenzuständen vorgebeugt werden kann, weisen die mittels MOVPE hergestellten Nanodrähte eine Aluminiumgalliumarsenid-Ummantelung auf. Die Summenformel lautet $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, wobei x der stöchiometrische Faktor ist, welcher den Aluminiumanteil des ternären III/V-Halbleiters beschreibt. Ein wesentlicher Vorteil dieses Materialsystems ist, dass es ebenfalls als Zinkblende-Gitter kristallisiert und sogar für einen beliebigen Aluminiumgehalt x annähernd die gleiche Gitterkonstante wie GaAs hat, wodurch leistungsmindernde Gitterverspannungen vermieden werden. Die konzentrationsabhängige Gitterkonstante a des $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ wird wie folgt berechnet ¹¹:

$$a(x) = 565,330 + 0,809x \text{ pm}$$

Ein weiterer Grund für die Verwendung des AlGaAs ist die Tatsache, dass es eine größere Bandlücke aufweist und folglich zusammen mit dem GaAs eine besondere Bandstruktur ausbildet, worauf im nächsten Kapitel näher eingegangen wird. Die im späteren Verlauf dieser Projektarbeit ermittelten Aluminiumkonzentrationen liegen alle unterhalb von 45%, sodass die unten angegebene Formel zur Berechnung der Bandlücke des AlGaAs verwendet werden kann ^{11,12}:

In diesem Konzentrationsbereich weist das Halbleitersystem eine indirekte Bandlücke auf ¹¹.

$$E_G = 1,424 + 1,247x \text{ eV}$$

2.1.4 Funktionsweise der AlGaAs-Ummantelung

Wie bereits in Kapitel beschrieben wird, besitzt das AlGaAs eine ähnliche Gitterkonstante wie das GaAs und kann demnach dazu verwendet werden die Oberflächenzustände des GaAs mithilfe einer Mantelstruktur abzusättigen. Dies soll den Ladungsträgerverlust verhindern und die optischen und elektronischen Eigenschaften verbessern. Zusätzlich bleiben Oberflächendefekte aus, die sich als unerwünschte Lumineszenz bemerkbar machen. Die Funktionsweise wird im Folgenden anhand des Bändermodells veranschaulicht.

An der Grenzfläche zwischen dem intrinsichen GaAs und AlGaAs entsteht durch Rekombinationsprozesse der Elektronen und Löcher eine Raumladungszone der Breite d_{RLZ} . Ihre Ausdehnung ist durch ein elektrisches Feld beschränkt, welches daraus resultiert, dass die beiden Halbleiter nach der Rekombination nicht mehr elektrisch neutral sind. Es entsteht der sogenannte Driftstrom. Es herrscht nun ein Gleichgewicht zwischen dem Diffusionsstrom, welcher aus einem Unterschied der Ladungsträgerkonzentrationen resultiert, und dem Driftstrom. Der sich hierbei ergebende Potentialunterschied wird als Diffusionsspannung bezeichnet.

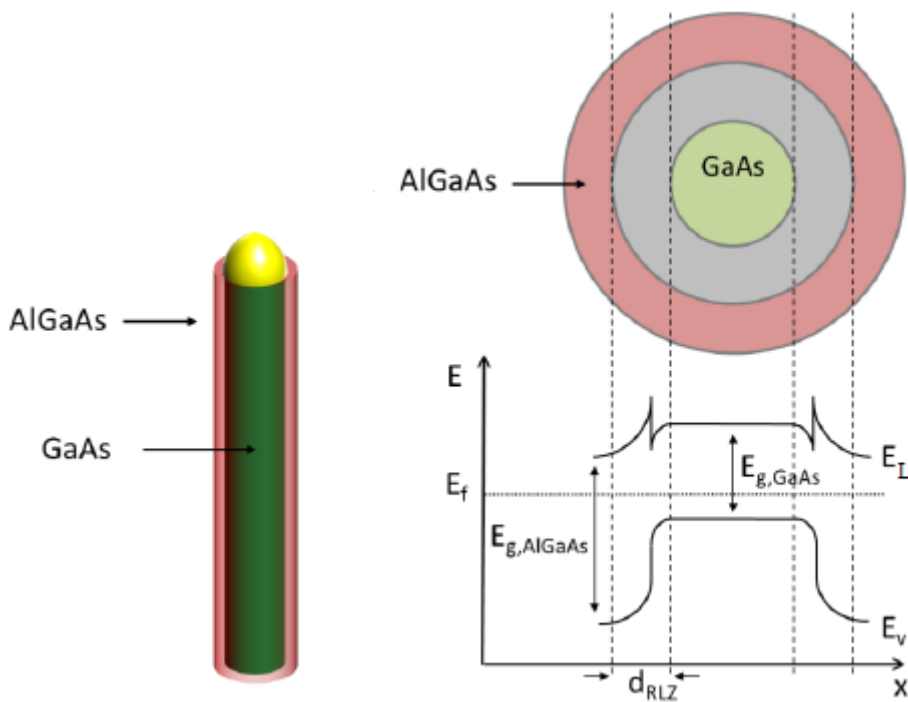


Abb.3: links: Schematische Darstellung des Nanodrahts mit Ummantelung, rechts: Querschnitt der Nanodrahtstruktur und dazu das ortsabhängige Bändermodell, im Bereich der Raumladungszone im Leitungsband ist die Diskontinuität erkennbar ¹³.

Die Diffusionsspannung sorgt im Bereich der Raumladungszone für die in Abbildung 1 dargestellte Bandverbiegung. Da das AlGaAs eine größere Bandlücke besitzt, aber eine kleinere Elektronenaffinität als GaAs aufweist, ist am Übergang zwischen den Leitungsbandern der Materialien eine Diskontinuität erkennbar ¹³. Diese Bänderdiskontinuität fungiert als Energiebarriere und verhindert, dass bei der Generierung eines Elektron-Loch-Paares die Elektronen zur Oberfläche des Drahtes diffundieren, wie es bei einer ummantelungsfreien Struktur der Fall wäre. Die Löcher streben energetische hohe Zustände an und bewegen sich folglich zum Maximum des Valenzbandes und damit in die Drahtmitte. Beide Ladungsträgerarten sind nun im GaAs Kern konzentriert und können zur Photolumineszenzenerzeugung beitragen.

2.2 Technologie

2.2.1 Nanodrahtwachstum

Die Herstellung der Galliumarsenid-Nanodrähte (GaAs) mit Aluminiumgalliumarsenid-Hülle (AlGaAs) erfolgt mithilfe des Vapour-Liquid-Solid und Vapour-Solid-Prozesses (VLS bzw. VS) in der metallorganischen Gasphasenepitaxie (MOVPE, **m**etal **o**rganic **v**apour **p**hase **e**pitaxy). Bei der MOVPE werden die Quellenmaterialien (Trimethylgallium TMGa, Tertiärbutylarsin TBAs, Trimethylaluminium TMAI) mittels eines inerten Trägergases (N_2 , H_2) in den Reaktor geleitet. Aufgrund der thermischen Zerlegung der Precusoren, scheiden sich auf der aufgeheizten Substratoberfläche die entsprechenden Verbindungshalbleiter (GaAs, AlGaAs) ab¹⁴.

Zur Herstellung der GaAs-Nanodrahtkerne wird der VLS-Prozess angewandt. Auf dem GaAs-Substrat mit der Kristallorientierung $(111)B$ werden mit einer kolloidalen Lösung Goldpartikel aufgebracht, welche als Wachstumskeime verwendet werden. Hierbei dient die Oberfläche des Goldpartikels als katalytisch aktives Medium für die beschleunigte Zersetzung von Trimethylgallium und einer daraus resultierenden Anreicherung von Gallium im flüssigen Goldpartikel (12). Die entstandene Au-Ga-Legierung hat einen geringeren Schmelzpunkt als die reinen Komponenten Gold bzw. Gallium und wird daher als Eutektikum bezeichnet. Das Tertiärbutylarsin kann nicht an der Oberfläche des Goldpartikels zersetzt werden, deswegen reichert sich das Arsen an der Grenze flüssig-fest zwischen dem Substrat und dem Legierungstropfen an.

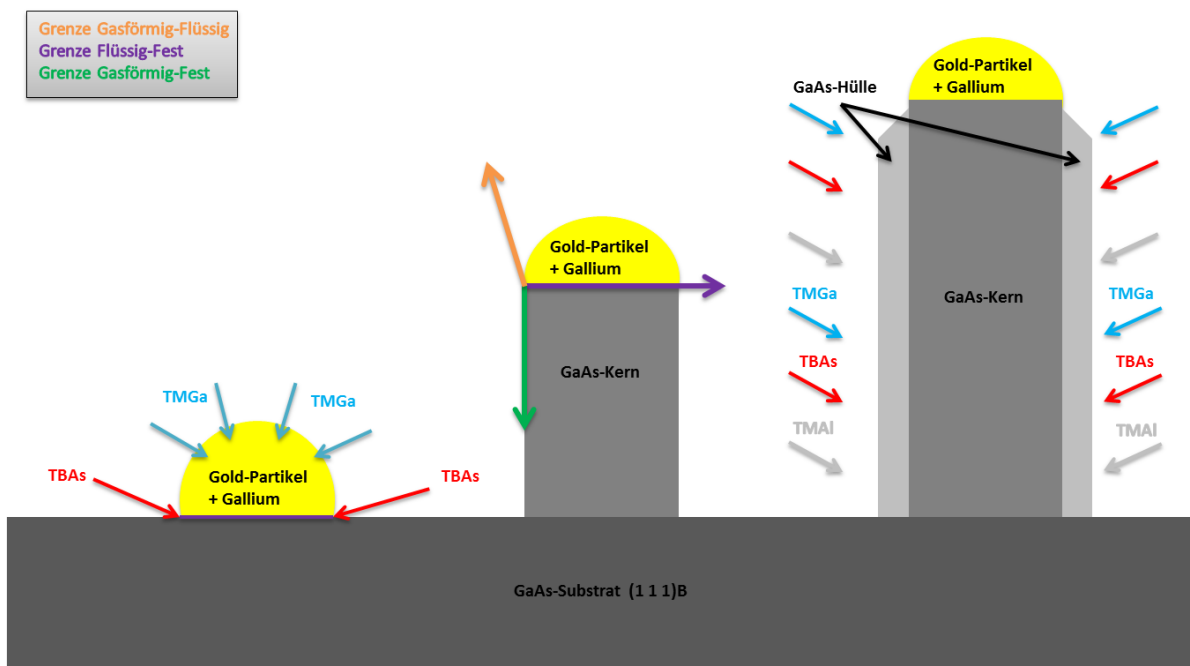


Abb. 4: Herstellung von GaAs-Nanodrähten/AlGaAs-Ummantelung auf GaAs-Substrat $(111)B$ durch Goldpartikel. Schritt links: Gold-Partikel reichert sich mit Gallium an und Arsen sammelt sich an der Grenze Flüssig-Fest. Schritt mitte: Wachstum des GaAs-Nanodrahtes mit Dreiphasendiagramm. Schritt rechts: Schichtwachstum des AlGaAs mittels MBE.

Die Querschnittsbreite eines Nanodrahtes ist darüber hinaus vom Durchmesser des kolloidalen Goldpartikels z. B. $100\text{ nm} \pm 8\%$ (Herstellerangabe) abhängig. Die Abmessungen eines Nanodrahtes werden durch epitaktische Wachstumsparameter kontrolliert. Bei diesen Wachstumsparametern handelt es sich um den Durchfluss von Quellenmaterial, die Wachstumszeit und die Prozesstemperatur. Die Länge des Nanodrahtes hängt sowohl von der Wachstumszeit als auch von dem Precursor-Durchfluss und dessen III/V-Verhältnis (Arsen dient dem Wachstum als auch der Gegenstabilisierung, die Zugabe der III-Halbleiterkomponente ermöglicht erst Wachstum und steuert die Wachstumsrate/geschwindigkeit) ab. Die Wachstumsgeschwindigkeit hängt grundlegend vom Radius des Goldpartikels ab, da das chemische Potential vom Durchmesser abhängig ist. Bei kleiner werdenden Tropfen vergrößert sich die Oberflächenkrümmung und dadurch der Dampfdruck. Mit steigendem Dampfdruck reduziert sich die Aufnahme des Galliums und demnach die Übersättigung (13)(14).

Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich das Wachstum des Nanodrahtkerns von einem VLS-Mechanismus zu einem Schichtwachstum nach Vapour-Solid-Mechanismus. Die AlGaAs-Hülle wird mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE, **m**olecular **b**eam **e**pitaxy) unter Ultrahochvakuum durch Zugabe von Trimethylaluminium (TMAI) und Anpassung des V/III-Verhältnisses realisiert sowie durch eine höhere Prozesstemperatur bewirkt. Die Quellenmaterialien befinden sich in Effusionszellen. Durch Erhitzung der Effusionszellen sublimieren die Halbleitermaterialien und der daraus entstehende Molekularstrahl wird auf die Probe gerichtet. Die Materialien kondensieren an der Grenze gasförmig-fest des GaAs-Kerns und es findet Schichtwachstum senkrecht zu dieser Grenze statt. Aufgrund der geringen Wachstumsrate in der MBE haben die Atome ausreichend Zeit durch Oberflächendiffusion glatte Schichten zu bilden.

2.2.2 Ätzen der Nanodrahthülle

Um im Rahmen dieser Arbeit die elektrischen und optischen Eigenschaften der Nanodrähte untersuchen zu können, muss einseitig der Kern freigelegt werden. Dabei werden die GaAs-Nanodrähte mit AlGaAs-Hülle in lichtempfindlichen Fotolack eingebettet. In einem anschließenden Ätzschritt wird die AlGaAs-Ummantelung gelöst, sodass nur noch der GaAs-Kern übrig bleibt. Der Fotolack wird beim Ätzen nicht angegriffen und somit kann die Höhe, bis zu welcher der Nanodraht geätzt wird, reguliert werden. Danach wird der Resist in einem Lösungsmittelschritt gelöst und die zum Teil geätzten Nanodrähte können weiter verarbeitet werden.

2.2.3 Nanodrahttransfer

Für die optische und elektrische Charakterisierung werden die Nanodrähte von den Galliumarsenid-Substraten auf ein mit Siliziumdioxid (SiO_2) beschichteten Silizium-Wafer (Si) transferiert. Dazu wird das Substrat in 2-Propanol gelegt und mit einem Skalpell werden die Nanodrähte von der Substratoberfläche abgeschabt. Die Nanodraht-Lösung wird mit einer Pipette in Eppendorf-Caps überführt und für 2 Minuten in ein Ultraschallbad gelegt, damit sich die Nanodrähte gleichmäßig in der Lösung verteilen. Das Trägermaterial wird auf einer Heizplatte auf 85°C erhitzt und die dispergierte Nanodraht-Lösung wird mithilfe einer Pipette auf das Trägersubstrat aufgetragen. Das 2-Propanol verdampft und die Nanodrähte verbleiben auf der Oberfläche des Trägersubstrates zurück. Je nach Menge der Nanodraht-Lösung auf dem Trägermaterial, lässt sich die Anzahl der Nanodrähte auf der Probe erhöhen, jedoch erhöht sich dadurch die Anzahl der Nanodrähte, die zu nah beieinander liegen oder sich agglomerieren und dadurch für die optische und elektrische Charakterisierung unbrauchbar werden. Die Probe kann daraufhin optisch analysiert werden. Für die elektrische Charakterisierung sind einige weitere prozesstechnologische Schritte erforderlich.

2.2.4 Nanodraht-Kontaktierung

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Prozessschritte zur Herstellung eines elektrischen Kontaktpads erläutert. Die verwendeten Nanodrähte besitzen eine durchschnittliche Länge von $15\text{ }\mu\text{m}$ und sind $250\text{--}350\text{ nm}$ breit. Zur elektrischen Charakterisierung am DC-Messplatz werden Ohm'sche Kontakte benutzt. Es ist wichtig, dass der Kontakt eine sehr hohe Leitfähigkeit und gute Hafteigenschaften besitzt. Zu diesem Zweck eignen sich Metalle als Kontaktschicht, weil diese im Gegensatz zu den Halbleitersystemen eine deutlich höhere Leitfähigkeit aufweisen. Edelmetalle weisen sehr hohe Leitfähigkeiten auf, haben aber den Nachteil, dass sie schlechte Haftungseigenschaften aufweisen.

Aufgrund dessen wird ein Mehrschichtsystem aus sehr leitfähigen und sehr haftstarken Metallen mit verschiedenen Schichtdicken verwendet, um den optimalen Kompromiss aus beiden Eigenschaften für jedes Halbleitersystem zu erzielen (15).

Üblicherweise bildet sich am Übergang zwischen dem Metall und dem Halbleiter eine Potentialbarriere, die zuerst überwunden werden muss, damit eine Leitung feststellbar ist. Infolge dessen ist die Auswahl der einzelnen Metallschichten entscheidend, um die Potentialbarriere zwischen dem zu untersuchenden Nanodraht und dem Metall soweit zu verringern, dass diese vernachlässigbar wird. Mithilfe eines Ohm'schen Kontaktes lässt sich die Kontaktierung mit metallischen Drähten realisieren. Im Idealfall nimmt der Ohm'sche Kontakt keinen Einfluss auf die

Messergebnisse, jedoch ist das in der Realität nur bedingt möglich und es wird versucht mit einer geeigneten Metallisierung die Potentialbarriere so zu reduzieren, dass der Einfluss auf die Probe vernachlässigbar klein wird (16).

Das hier verwendete Kontaktpad setzt sich aus zwei Schichten zusammen. Unter der Metallisierung wird eine Isolatorschicht mit hohem spezifischem Widerstand eingebaut.

2.2.4.1 Lösungsmittelreinigung

Die Probe wird vor jedem Prozessdurchlauf gründlich von organischen Verunreinigungen vorheriger Prozessschritte gereinigt. Der Reinigungsprozess wird mit zwei verschiedenen organischen Lösungsmitteln unterschiedlicher Polarität durchgeführt, um jegliche Verunreinigungen zu beseitigen. Dabei wird die Probenschale mit Aceton (unpolares Lösungsmittel) gefüllt, bis die Probe vollständig im Lösungsmittel liegt. Anschließend wird das Lösungsmittel bis kurz vorm Siedepunkt (56° C) (X) erhitzt und daraufhin mit 2-Propanol ausgespült. Im zweiten Lösungsmittelschritt wird das 2-Propanol (polares Lösungsmittel) ebenfalls wie zuvor das Aceton bis zum Siedepunkt (82° C) (X) erhitzt. Lösungsmittelreste auf der Probe und in der Probenschale werden durch das Erhitzen verdampft.

2.2.4.2 Fotolack und Fotolackbeschichtung

Zur Strukturierung von Schichten auf der Probe werden lichtempfindliche Fotolacke (Resist) benötigt. Durch UV-Strahlung definierter Wellenlänge (300 nm und 400 nm) werden diese je nach Art des Resists (Positiv- oder Negativ-Resist) chemisch so verändert, dass ihr Lösungsverhalten beeinflusst wird. Die belichteten Stellen beim Negativlack vernetzen sich und sind somit schwerer zu lösen, so dass diese nach dem Entwicklungsschritt erhalten bleiben. Beim Positivlack, der hier zur Herstellung der elektrischen Kontakte benutzt wird, werden die Polymerketten des Lacks durch die Belichtung soweit gespalten, dass der Resist dadurch leichter löslich ist.

Die homogene Verteilung des Fotolacks auf der Probe ist wichtig, da es bei Inhomogenität des Lacks zu unterschiedlichen Eindringtiefen des Lichtes kommt. Dadurch werden beim Entwickeln die einzelnen Bereiche nicht entfernt und es bleiben Reste auf der Oberfläche zurück. Mit der Fotolackschleuder (Spin-Coater) kann eine gleichmäßige Verteilung realisiert werden. Auf der Fotolackschleuder rotiert die Probe mit mehreren 1000 Umdrehungen pro Minute. Dabei wird ein Teil des auf Probe aufgetragenen Resist durch die Zentrifugalkraft abgetragen und es bleibt eine

homogene Schicht auf der Probe übrig. Die abgeschiedene Höhe der Lackschicht wird durch Prozessparameter wie Rotationsdauer, -geschwindigkeit, -beschleunigung und Viskosität des Lacks eingestellt.

2.2.4.3 Maskenjustier- und Belichtungsanlage

Die optische Lithografie mit der Maskenjustier- und Belichtungsanlage (MA6, Mask Aligner) ermöglicht die Herstellung von Strukturen mit Auflösungen im Mikrometer-Bereich. Bei der hier verwendeten Kontaktlithografie, befindet sich die Maske in direktem Kontakt mit der Probe und Strukturen werden im Maßstab 1:1 auf den Resist abgebildet. Da die Maske beim Belichtungsvorgang direkt auf der Probe liegt (vacuum contact) werden störende Beugungseffekte des Lichtes minimiert, welche die Tiefenschärfe und Auflösung verschlechtern. Ein Nachteil der Kontaktbelichtung ist die Abnutzung der Maske durch den direkten Kontakt ab (12).

Die Fotomaske besteht aus einem Chrom(Cr)-Muster (Dicke der Chromschicht ca. 100nm) auf einem Quarzglas-Substrat und besitzt den Vorteil, dass die zu belichtende Probe unter der Fotomaske sichtbar ist. Bei der Belichtung wird die komplette Struktur der Maske durch monochromatisches Licht auf die Probe übertragen. Eine Quecksilberdampfampe dient als Lichtquelle für den Belichtungsprozess und mittels eines entsprechenden UV-Filtern werden die unerwünschten Wellenlängen herausgefiltert, so dass nur noch monochromatisches Licht auf das Substrat trifft. Je kürzer die Wellenlänge λ , die zur Belichtung benutzt wird, desto besser wird das Auflösungsvermögen, d.h. die Breite, mit welcher zwei beieinander liegende Punkte noch getrennt voneinander abgebildet werden können. Je kleiner die Auflösung ist, desto kleinere Strukturen können realisiert werden.

$$A = k_1 \cdot \frac{\lambda}{N.A.}$$

A = Auflösung, k_1 = spezifischer Faktor abhängig vom Lack- und Abbildungssystem, N.A. = Numerische Apertur

Zur Herstellung der Kontaktflächen wird deswegen eine mit einem Loch präparierte Folie benutzt, die für das Licht undurchlässig ist. Da die Nanodrähte willkürlich auf dem Substrat verteilt sind, wird jeder Nanodraht einzeln angesteuert und belichtet. Die genaue Positionierung der Folie verhindert eine Belichtung ungewollter oder bereits belichteter Stellen.

2.2.4.4 Ätztechnik

Die leitende Kontaktmetallisierung wird durch einen thermischen Aufdampfprozess im Hochvakuum (PVD, **Physical Vapour Deposition**) realisiert, indem Quellenmaterialien thermisch verdampft werden und die Substratoberfläche homogen bedecken. Dabei wird die Probe oberhalb an dem Probenhalter im Reaktor befestigt und über der gewünschten Verdampfungsquelle positioniert. Die Quellenmaterialien befinden sich in Aufdampfschiffen, die aufgrund der hohen Schmelztemperatur (3422 °C) üblicherweise aus Wolfram bestehen, und werden durch hohe Stromflüsse erhitzt, so dass das Material verdampft. Bei Materialien mit niedrigem Dampfdruck ist das Erhitzen des Quellenmaterials mit einem Elektronenstrahl einfacher. Der Elektronenstrahl wird auf das im gekühlten Tiegel befindliche Metall gerichtet und verdampft. Der Beschichtungsprozess findet im Hochvakuum statt. Der niedrige Druck bewirkt einerseits die Reduktion der Schmelztemperatur der Aufdampfmaterialien und andererseits den stoßfreien Transport zur Substratoberfläche, da die mittlere freie Weglänge größer ist als die Ausmaße der Kammer. Die Schichtdicke lässt sich mithilfe des Schwingquarzes kontrollieren. Diese werden während des Aufdampfprozesses beschichtet und verändern mit steigender Höhe der Metallschicht ihre Eigenschwingfrequenz. Die Schichtdicke auf der Probe ist durch die Veränderung der Frequenz erchenbar (15). Anschließend erfolgt ein Lift-off-Prozess, wobei der restliche Fotolack wird gelöst und die auf dem Resist aufgedampfte Metallisierung mitgelöst wird. Auf den zuvor belichteten Stellen bleibt die Metallisierung erhalten.

2.3 Photolumineszenz

Als Lumineszenz wird im Allgemeinen die durch spontane Emission hervorgerufene Abstrahlung von Licht in einem Festkörper bezeichnet. Es existiert eine Vielzahl von Lumineszenzarten, wobei im Rahmen dieser Projektarbeit nur die Photolumineszenz betrachtet wird. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf direkte Halbleiter, wie z. B. GaAs, welches für die untersuchten Nanodrähte verwendet wird.

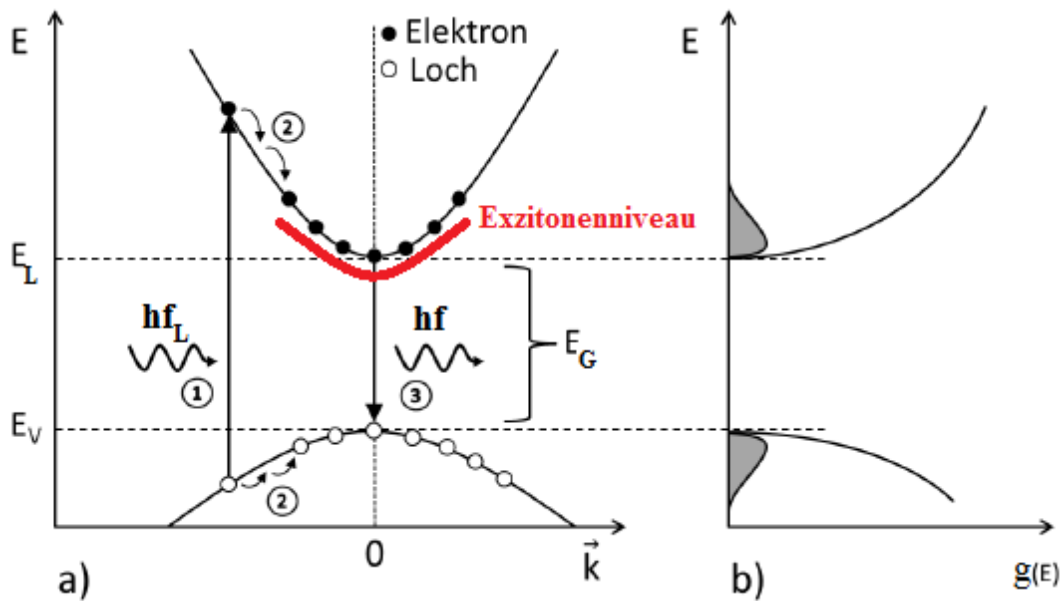


Abb. 5: a) Photolumineszenz im direkten Halbleiter 1) Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares 2) Relaxationsprozess durch Phononenerzeugung 3) Interbandlumineszenz b) zugehörige Zustandsdichte und Ladungsträgerverteilung (grau) im angeregten Zustand [11].

Abbildung 5a) zeigt wie in einem Halbleiter ein Elektron-Loch-Paar im Valenzband aufgrund der Absorption von Licht mit einer Anregungsenergie, die größer als die Bandlücke E_G ist, erzeugt wird. Das Elektron gelangt dadurch in das Leitungsband und relaxiert aus energetischen Gründen stufenweise innerhalb von einigen Femto- bis Pikosekunden bis zur Leitungsbandkante. Das sich im Valenzband befindende Loch vollzieht den gleichen Mechanismus und erreicht so die Valenzbandkante. Die dabei frei werdende Energie wird in Form von Phononen (Gitterschwingungen) abgegeben, was zu einer Temperaturerhöhung des Festkörpers führt. An den Bandkanten besitzen die optisch angeregten Ladungsträger eine deutlich größere Lebensdauer τ ($\sim \mu s$), wodurch sich eine thermische Verteilung ausbildet. Die Anzahldichte $N_{e/h}$ dieser Elektronen/Löcher kann mittels Fermi-Dirac-Statistik bestimmt werden [17]:

$$N_e = \int_{E_G}^{\infty} g_L(E) f_e(E) dE$$

Die Zustandsdichte im Leitungsband ist hierbei $g_L(E)$ und $f_e(E)$ gibt die Wahrscheinlichkeit an ein Elektron mit der Energie E vorzufinden. Die Berechnung der Anzahldichte N_h der Löcher erfolgt analog. In Abbildung 5b) sind die Zustandsdichte und die Ladungsträgerverteilung in Abhängigkeit von der Energie dargestellt.

Nach der soeben erwähnten Lebensdauer der Ladungsträger an den Bandkanten findet die sogenannte Interbandlumineszenz statt. Die angeregten Elektronen fallen zurück in das Valenzband

und rekombinieren dort mit den Löchern, woraufhin die überschüssige potentielle Energie, welche der Bandlücke entspricht, als Photon abgegeben wird. Solch ein Übergang kann auch nichtstrahlend erfolgen, indem die Energie durch Phononen oder an Defekte abgegeben wird.

Neben den zuvor beschriebenen freien Elektron-Loch-Paaren können sich unter bestimmten Bedingungen auch Exzitonen, also gebundene Elektron-Loch-Paare bilden. Es wird zwischen Wannier-Mott- und Frenkel-Exzitonen unterschieden, wobei letztere hauptsächlich in Isolatoren auftreten und deshalb in dieser Projektarbeit nicht betrachtet werden. Ein Wannier-Mott-Exziton ist ein nach außen hin neutraler, schwach gebundener und über einige Atomabstände reichender Elektron-Loch-Komplex, der sich durch den Halbleiterkristall bewegen kann. Voraussetzung für die Bildung eines solchen Komplexes ist zum einen die Übereinstimmung der Gruppengeschwindigkeiten von Elektronen und Löchern und zum anderen eine möglichst geringe Defektdichte, da durch Rekombination mit Defektzuständen das Exziton aufgelöst wird. Zusätzlich muss entweder die Bindungsenergie groß genug sein, um Stößen mit longitudinal optischen Phononen zu widerstehen, oder die Temperatur muss so gering sein, dass kaum Phononen beteiligt sind.

Exzitonen haben eine höhere Bindungsenergie als freie Elektron-Loch-Paare und bilden deshalb in der Bandstruktur des Halbleiters neue Zustände, die knapp unterhalb der Leitungsbandkante liegen (siehe Abb. 2a) rot dargestellt). Die Differenz aus der Bandlücke und dem Abstand der neu entstandenen Niveaus zur Valenzbandkante entspricht der Bindungsenergie, welche für GaAs ca. 4,2 meV beträgt und als Exzitonische Rydbergenergie bezeichnet wird.

Bei steigender Anregungsdichte werden mehr Exzitonen erzeugt. Ab einer bestimmten Anzahldichte ist der Abstand zwischen den Exzitonen so groß wie deren Durchmesser. Es kommt zu einer gegenseitigen Wechselwirkung infolge der Überlappung der Wellenfunktionen und schließlich zur Ausbildung eines Elektron-Loch-Plasmas. Die dazugehörige Dichte wird als Mott-Dichte bezeichnet und beträgt für GaAs $1,1 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ [17].

2.4 Laser

2.4.1 Absorption

Bereits im Zeitraum von 1911 bis 1914 gelang mithilfe des Frank-Hertz-Versuches der Nachweis, dass Atome nur einige bestimmte Energien aufnehmen können [18]. Niels Bohr postulierte daraufhin die Existenz von bestimmten geschlossenen Kreisbahnen auf denen sich Elektronen um den Atomkern bewegen ohne Energie zu verlieren, sogenannte diskrete Niveaus. Ein Übergang eines Elektrons auf ein weiter vom Kern entferntes Niveau erfordert beispielsweise einen Energiebeitrag gegen das Coulomb-Potential, der genau der Differenz der potenziellen Energien der beiden Niveaus entspricht. Im umgekehrten Fall wird die überschüssige Energie in Form eines Photons abgestrahlt. Dieses Modell widersprach jedoch der Heisenberg'sche Unschärferelation, da Energie und Impuls nicht gleichzeitig bestimmbar sind. Erwin Schrödinger formulierte daraufhin im Jahre 1926 die Schrödingergleichung [19], mit deren Hilfe ein Atommodell entwickelt wurde, bei dem Elektronen im Atom durch Wellengleichungen und Aufenthaltswahrscheinlichkeiten beschrieben wurden. Jede Wellenfunktion besitzt einen Energieeigenwert, der dem Energieniveau des Elektrons entspricht. Daraus resultieren die Orbitale mit hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit, die durch Quantenzahlen beschrieben werden.

Beim Übergang vom einzelnen Atom zum Festkörper, der periodisch angeordnete Atome aufweist, kommt das Pauli-Prinzip zum Tragen, welches besagt, dass Elektronen in einem Atom nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen können:

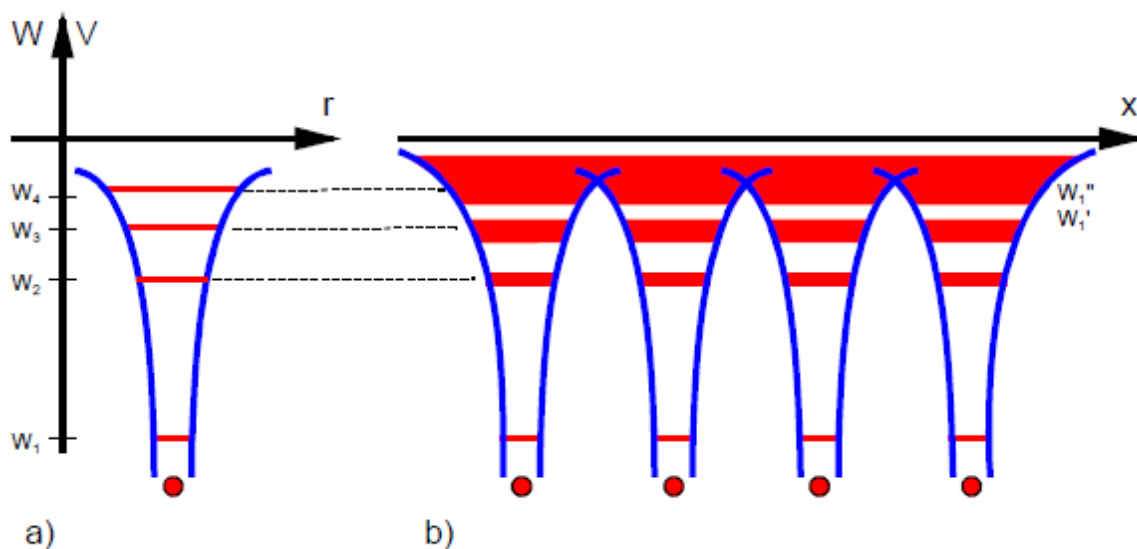


Abb.6: a) Potentialverlauf eines Elektrons in Abhängigkeit vom Abstand zum Kern b) Aufspaltung der zuvor diskreten Niveaus zu Energiebändern [20].

In Abbildung 6a) ist der Potentialverlauf eines Elektrons in Abhängigkeit vom Abstand zum Kern dargestellt. Es sind vier diskrete Energieniveaus zu erkennen. Bei mehreren Atomen im Festkörper liegen die energetisch gleichen Niveaus so nahe beieinander, dass sie sich infolge des Pauli-Prinzips

geringfügig aufspalten (Abb. 6b)). Es entstehen sogenannte Energiebänder mit quasikontinuierlichen Zuständen. Außerdem wird deutlich, dass energetisch weit vom Kern entfernte Elektronen dieses Potential überwinden können und sich annähernd frei durch den Festkörperverband bewegen. Sie tragen zur elektrischen Leitfähigkeit bei und befinden sich damit im Leitungsband. Die anderen Elektronen sind im Valenzband.

Leitungs- und Valenzband sind bei Halbleitern durch eine Bandlücke mit der Energie E_G voneinander getrennt. E_L kennzeichnet im Folgenden die Energie der Leitungsbandunterkante und E_V die Energie der Valenzbandoberkante. Ist die Temperatur annähernd null ($T = 0K$), so sind alle Zustände im Valenzband mit Elektronen gefüllt und im Leitungsband unbesetzt. Bei größeren Temperaturen ($T > 0K$) ist es statistisch möglich, dass Elektronen thermisch bedingt eine Energie $E_{th} \geq E_L - E_V = E_G$ besitzen und einen Zustand im Leitungsband einnehmen (Abb. 7a)).

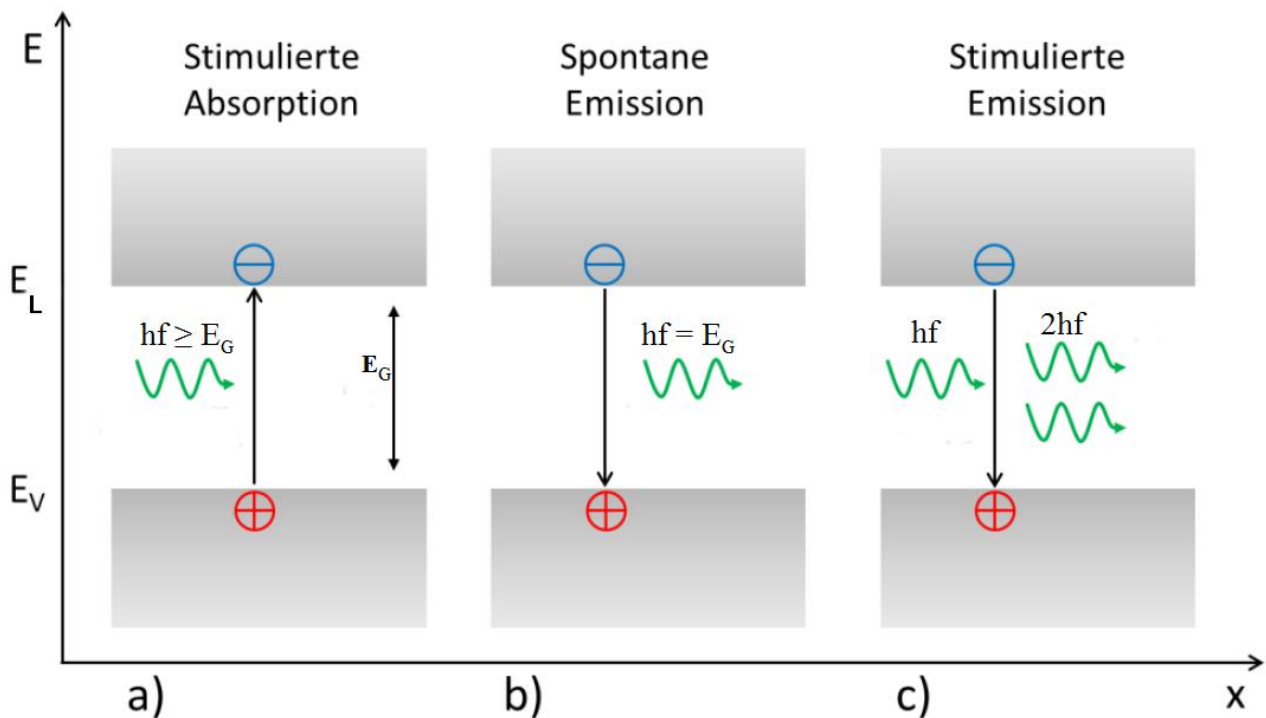


Abbildung 7: a) Absorption b) Spontane Emission c) Stimulierte Emission [11].

Dieser Prozess kann auch mithilfe von elektromagnetischer Strahlung hervorgerufen werden, wenn das eingestrahlte Photon eine Energie E_{PH} besitzt, die mindestens so groß wie die Bandlücke ist. Bedingt durch die E-Feld-Komponente der Strahlung wird hierbei das Elektron in eine erzwungene Schwingung mit der Frequenz $f = E_{PH} / h$ versetzt (h : Plank'sches Wirkungsquantum). Bei der daraus resultierenden Schwächung der elektromagnetischen Strahlung handelt es sich um Absorption, welche mittels des Lambert-Beer'schen Gesetzes beschrieben wird [21]:

$$I(d) = I(d = 0) \cdot e^{-\alpha d}$$

Diese Gleichung stellt die Intensität I der Strahlung in Abhängigkeit von der Eindringtiefe d im zu durchlaufenden Medium dar. Die Konstante α ist materialabhängig und wird als Absorptionskoeffizient bezeichnet.

Außerdem kann die Anzahl der Übergänge vom Valenz- ins Leitungsband pro Zeit und Volumeneinheit wie folgt ausgedrückt werden [21]:

$$\frac{dN_V}{dt} = -\sigma_{VL} N_V \phi$$

N_V ist hierbei die Dichte der Elektronen im Grundzustand und ϕ die Stromdichte der Photonen pro Zeit und Fläche. Die effektive Fläche bei der ein Atom ein Photon absorbiert wird mit σ_{VL} beschrieben. Dieser Zusammenhang macht deutlich, dass die Elektronenkonzentration im Grundzustand bei steigender Stromdichte der Photonen abnimmt, da Absorption stattfindet und Elektronen mithilfe von Photonen in das Leitungsband gelangen können.

2.4.2 Spontane Emission

Aus energetischen Gründen besitzen die sich nun im angeregten Zustand befindlichen Elektronen mit der Anzahldichte N_L eine endliche Lebensdauer τ_{sp} , was dazu führt, dass sie wieder in den Grundzustand gelangen und die überschüssige Energie in Form eines Photons abgeben. Geschieht dies ohne äußere Einwirkung, so findet spontane Emission statt (Abb. 7b)). Die Emissionsrichtung des Photons ist dabei willkürlich [21].

Die Abnahme der Anzahldichte N_L im Leitungsband infolge von spontaner Emission lässt sich mit der folgenden Differentialgleichung darstellen [21]:

$$\frac{dN_L}{dt} = -\frac{N_L}{\tau_{sp}}$$

Es muss allerdings nicht zwangsläufig ein strahlender Übergang stattfinden, da die angeregten Elektronen ihre Energie als Phonon oder durch einen Stoßvorgang abgeben können.

2.4.3 Stimulierte Emission

Im Gegensatz zur spontanen Emission findet die stimulierte Emission aufgrund der Wechselwirkung von einfallenden Photonen mit angeregten Elektronen statt. Die dabei emittierte elektromagnetische Strahlung ist kohärent zur einfallenden Strahlung. Das bedeutet, sie besitzt dieselbe Frequenz, Richtung und Phase, wodurch es zur Verstärkung kommt (Abb. 7c)). Aus der unten dargestellten Differentialgleichung geht hervor, dass die Leistungsdichte I der eingestrahnten Photonen entlang der Raumkoordinate x steigt [21]:

$$\frac{dI}{dx} = \sigma_{LV} N_L I$$

Es findet also eine Art Kettenreaktion statt, bei der entlang des Festkörpers die eingestrahnten Photonen zusammen mit den durch Stimulation neu erzeugten Photonen fortwährend zusätzliche Emission hervorrufen. Die Größe σ_{LV} ist der Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission und gleich dem Wirkungsquerschnitt der Absorption, sofern Leitungs- und Valenzband gleiches statistisches Gewicht aufweisen ($\sigma_{LV} = \sigma_{VL} = \sigma$) [21]. Der Prozess ist essentiell wichtig um die Funktionsweise eines Lasers zu verstehen.

2.4.4 Bedingungen für die Erzeugung von Laserstrahlung

Die Entstehung von Laserstrahlung basiert darauf, dass innerhalb eines Mediums die eingekoppelte Strahlung durch stimulierte Emission verstärkt wird. Im Normalfall befindet sich allerdings ein Großteil der Elektronen im Grundzustand, wodurch fast ausschließlich Absorption stattfindet und die einfallende Strahlung geschwächt wird.

Um eine Verstärkung zu erreichen, müssen also mehr Zustände im Leitungsband durch Elektronen besetzt sein als im Valenzband, d. h. dass die neu erzeugten Photonen die Verluste durch Absorptionsprozesse kompensieren und sogar übersteigen. Dieser Vorgang nennt sich Besetzungsinversion und steht deutlich im Widerspruch zur Boltzmann-Verteilung, da hierfür das thermodynamische Gleichgewicht des Systems erheblich gestört wird. Diese Bedingung ergibt sich auch mithilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes [22]:

$$G = \frac{I}{I(d=0)} = e^{\sigma(N_L - N_V)d}$$

Die Verstärkung G ist das Verhältnis der Intensitäten der sich im Medium befindlichen Strahlung zur einfallenden Strahlung. Der Absorptionskoeffizient ist in diesem Fall $\sigma(N_L - N_V)$, also die Differenz der Besetzungsdichten von Leitungs- und Valenzband multipliziert mit dem Wirkungsquerschnitt. Hieraus wird ersichtlich, dass eine Verstärkung der Intensität einen positiven Exponenten, also eine Besetzungsinversion voraussetzt.

In einem Zwei-Niveau-System lässt sich mithilfe der Boltzmann-Verteilung folgende Aussage über die Realisierbarkeit der Inversion machen [22]:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(\frac{E_1 - E_2}{k_B T}\right)$$

Im Falle der Besetzungsinversion ist, im Vergleich zu dem Niveau N_1 , die Besetzungsdichte des energetisch höher liegenden Niveaus N_2 größer. Sie ist formal nur durch eine negative absolute Temperatur erreichbar. g_2 und g_1 beschreiben die Zahl der Unterniveaus. Für ein System mit zwei diskreten Energieniveaus E_1 und E_2 ist folglich die Erzeugung von Laserstrahlung nicht möglich.

Halbleiter stellen jedoch mit ihren Energiebändern in gewisser Hinsicht ein sogenanntes Vier-Niveau-System dar. Aus Abbildung 8 geht hervor, dass bei Anregungsenergien, die größer als die Bandlücke sind, Elektronen aus Zuständen unterhalb der Valenzbandkante (Niveau 1) in Zustände im Leitungsband gelangen (Niveau 4) und innerhalb der nichtstrahlenden Lebensdauer τ_{43} zur Leitungsbandunterkante (Niveau 3) relaxieren. Dort weisen sie eine vergleichsweise lange radiative Lebensdauer von τ_{32} auf, bis Rekombination mit dem dazugehörigen Loch, welches von Niveau 1 nach Niveau 2 relaxiert, unter der Aussendung eines Photons mit der Energie E_G erfolgt.

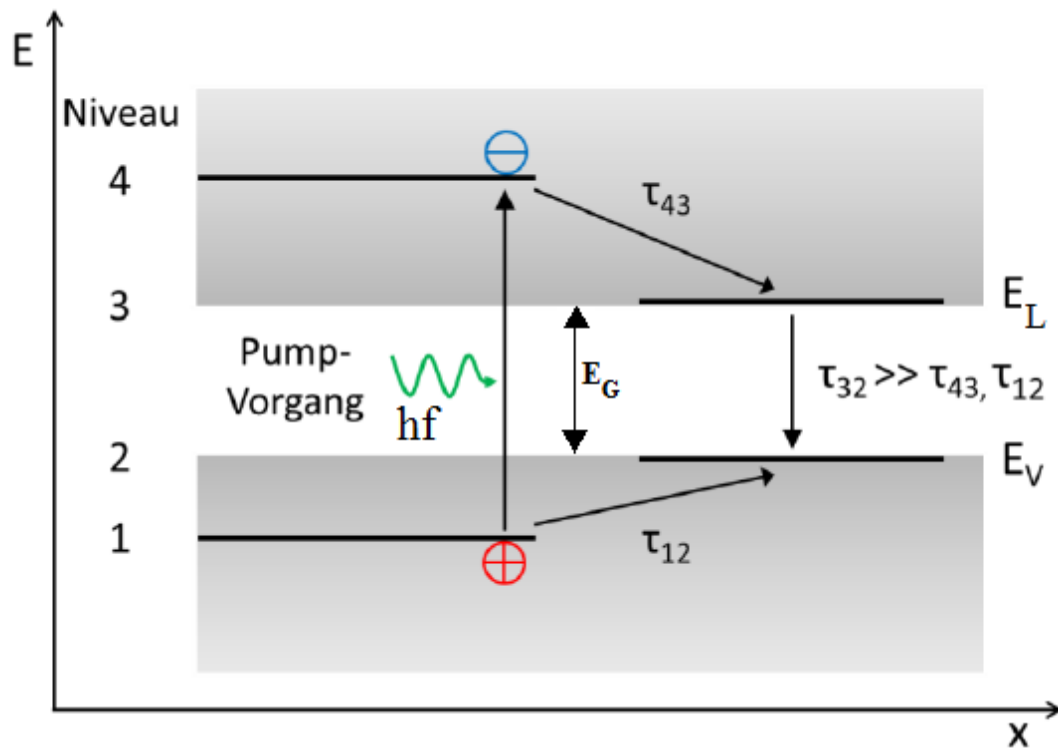


Abbildung 8: Auffassung eines Halbleiters als Vierniveaulaser. [11]

Im Idealfall besitzt ein Vierniveaulaser keine Pumpschwelle, da bereits ein Elektron im Niveau 3 eine Besetzungsinversion in Bezug zu Niveau 2 bedeutet.

2.4.5 Fabry-Perot-Resonator

Einer der wichtigsten Bestandteile eines Lasersystems ist der Resonator, in dem die durch stimulierte Emission erzeugte Strahlung vielfach reflektiert wird, so dass es durch Rückkopplung im Lasermedium zu einer Verstärkung kommt. Der klassische Fabry-Perot-Resonator besteht aus zwei planparallelen Spiegeln zwischen denen sich das aktive Medium befindet. Ein Spiegel sollte möglichst einen Reflexionskoeffizienten von 1 haben um Verluste zu vermeiden, wohingegen der andere noch eine gewisse Transmissivität aufweisen muss, sodass die erzeugte Laserstrahlung auch genutzt werden kann. Die in dieser Projektarbeit untersuchten Nanodrähte, deren GaAs-Kernstruktur Spiegel und aktives Medium zugleich darstellen, lassen sich als ein solcher Resonator auffassen. Der Reflexionskoeffizient für die Grenzfläche GaAs-Luft beträgt näherungsweise 0,32 [10], was bedeutet, dass die Endfacetten des Nanodrahtes prinzipiell als Spiegel fungieren können. Zusätzlich findet Reflexion am Übergang zwischen dem GaAs und dem AlGaAs in der Mantelstruktur statt, da der Brechungsindex des AlGaAs für nahezu alle

Aluminiumkonzentrationen kleiner als der des GaAs ist. Bei einer Temperatur von 79K und einer Konzentration von 20% wäre der Reflexionskoeffizient ca. 0,00057 [6]. Im Vergleich zum idealen Fabry-Perot-Resonator sind die Strahlungsverluste demnach hoch.

Bedingt durch die Tatsache, dass Halbleiter Energiebänder und keine diskreten Niveaus besitzen, weist deren Spektrum für die stimulierte Emission eine endliche Linienbreite mit dem Frequenzbereich $\Delta\nu$ auf. Sie lässt sich mathematisch mithilfe der Linienformfunktion $g(\nu)$ beschreiben und liefert die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Übergang zwischen Leitungs- und Valenzband ein Photon der Frequenz ν abgestrahlt wird [22].

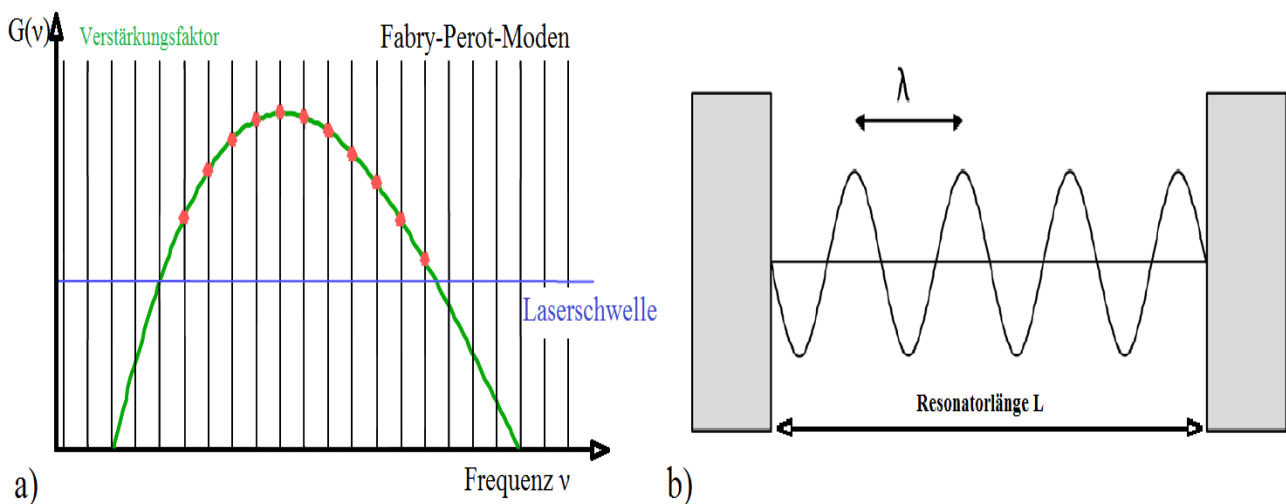


Abbildung 9: a) Modenspektrum mit eingezeichneter Laserschwelle und Verstärkungsfunktion b) Aufbau eines Fabry-Perot-Resonators [3].

Abb. 9b) zeigt den grundlegenden Aufbau eines Fabry-Perot-Resonators. Zwischen den beiden Spiegeln mit dem Abstand L kann nur Strahlung nur fortwährend Reflexion erfahren, wenn sie eine stehende Welle ausbildet. Es ergibt sich folgende Resonanzbedingung [22]:

$$L = m \frac{\lambda_0}{2n_R} \quad \text{mit } m \in \mathbb{N}$$

Die Resonatorlänge entspricht einem ganzen Vielfachen der halben Wellenlänge λ_0 im Medium mit dem Brechungsindex n_R . Aus der Bedingung ergeben sich die in Abb. 9a) dargestellten Lasermodes, welche im Idealfall einer Dirac-Funktion ähneln. Ihre Linienverbreiterung entsteht durch Verluste und Resonatorlängen-, Bandabstands- und Brechungsindexänderungen infolge von Temperaturschwankungen.

Resonanz ist noch kein hinreichendes Kriterium um aussagen zu können, ob eine Mode tatsächlich anschwingt. Zusätzlich muss der Strahlungsgewinn durch stimulierte Emission die Verluste im Resonator aufgrund von Absorption und Auskopplung überkompensieren, sodass die Laserschwelle überwunden wird. Eine mathematische Formulierung dafür liefert die Schwellenbedingung nach Schawlow und Townes[8]. Welche Frequenz in welchem Ausmaß eine Verstärkung erfährt, ist durch den frequenzabhängigen Verstärkungsfaktor $G(\nu)$ (in Abb. 9a) grün dargestellt), dessen Verlauf wiederum durch die Linienformfunktion $g(\nu)$ definiert ist, festgelegt [22]:

$$G(\nu) = (N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1) \frac{\left(\frac{c_0}{n_R}\right)^2}{8\pi\nu^2\tau_{sp}} g(\nu)$$

N_2 und N_1 stellen die Besetzungsdichten und g_2 und g_1 die Zahl der Unterniveaus der Energieniveaus E_2 und E_1 dar. Die Variable τ_{sp} beschreibt die Lebensdauer der spontanen Emission und c_0/n_R die Lichtgeschwindigkeit im Resonatormedium.

Abb. 9a) veranschaulicht nun, wie mithilfe der genannten Bedingungen die Modenselektion erfolgt. Die rot markierten Schwingungen liegen im Emissionsbereich des Mediums, haben eine der Resonanzbedingung entsprechende Wellenlänge und rufen mehr Emission als Verluste hervor, da $G(\nu)$ bei diesen Frequenzen über der Laserschwelle liegt.

Im Zuge der Strahlungsverstärkung ist die Resonatorgüte Q als Maß für die Dämpfung einer Welle eine wichtige Kenngröße. Sie ist definiert durch den Quotienten aus gespeicherter Energie und dem pro Schwingungsperiode auftretenden Energieverlust. Unter der Voraussetzung einer von der mittleren Aufenthaltszeit der Photonen im Resonator abhängigen exponentiellen Abnahme der Energie einer Mode folgt[23]:

$$Q = 2\pi\nu\tau_{sp}$$

ν kennzeichnet die Frequenz einer Resonatormode und τ_{sp} die Lebensdauer der spontanen Emission.

Aus der Güte lässt sich auch die Linienverbreiterung $\Delta\nu$ bestimmen [23]:

$$\Delta\nu = \frac{\nu}{Q}$$

Eine hohe Güte ist mit einer langen Lebensdauer der Photonen im Resonator gleichzusetzen, bevor sie absorbiert oder durch Auskopplung dem System entzogen werden [23].

2.4.6 Whispering-Gallery-Moden

Wie bereits erwähnt wurde, dient die Herstellung und Untersuchung der Nanodrähte der Anwendung für effiziente und kompakte Lasersysteme. Die Güte Q des Resonators spielt demnach eine große Rolle. Sie hängt von der Verweildauer der Photonen innerhalb des Drahtes ab. In Hinblick auf ihre zylindrische Form müssen deshalb neben den Lasermoden im Fabry-Perot-Resonator auch die Whispering Gallery Modes (WGM) beachtet werden.

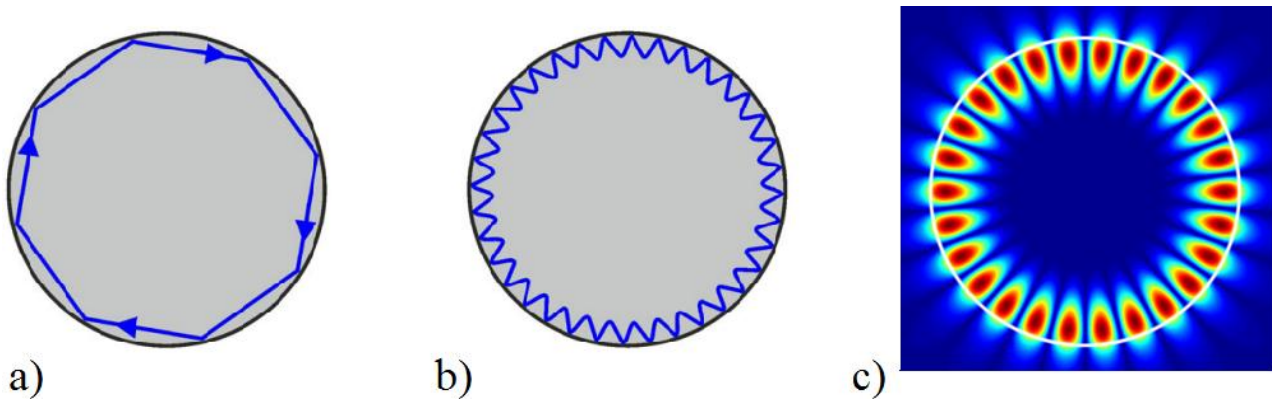


Abbildung 10: Lichtausbreitung innerhalb eines kreisförmigen WGM-Resonators im a) strahlenoptischen und im b) wellenoptischen Bild [24]. c) Intensitätsverteilung des elektrischen Feldes im Resonator, blau bedeutet in diesem Fall geringe, und rot hohe Intensität. [25]

Das Prinzip der WGM beruht auf der Totalreflexion des Lichtes an Übergängen von optisch dichteren zu optisch dünneren Materialien in rotationssymmetrischen Objekten. Im einfachsten Fall sind das Scheiben, Ringe oder Kugeln. Der Querschnitt eines Nanodrahtes ist näherungsweise kreisförmig und kann als ein Resonator angesehen werden, in dem sich WGM-Moden bilden können [25].

Anhand des Snellius'schen Brechungsgesetzes wird ersichtlich, dass Licht für Auftreffwinkel

$$\alpha < \arcsin\left(\frac{n_2}{n_R}\right)$$

mit n_2 als Brechungsindex der Umgebung und n_R als Brechungsindex des Resonators, Totalreflexion erfährt. Abb. 10a) stellt den Strahlenverlauf bei genügend flachem Einfallswinkel dar, wobei die Kreisgeometrie dafür sorgt, dass der Winkel nach jeder Reflexion gleich groß ist. Mithilfe von Abb. 10b), welche das wellenoptische Pendant zu Abb. 10a) ist, lässt sich die Resonatorbedingung aufstellen [25]:

Eine Lichtwelle kann sich innerhalb des Resonators mit dem Radius r und dem Brechungsindex n_R nur etablieren, wenn dessen Wellenlänge λ_0/n_R einem ganzen Vielfachen m des Resonatorumfangs $2\pi r$ entspricht. Unter dieser Bedingung findet konstruktive Interferenz statt. Die daraus resultierende Intensitätsverteilung der elektrischen Komponente des Lichts ist in Abbildung 10c) anschaulich dargestellt. Die roten Intensitätsmaxima liegen ausschließlich am Rand an der Innenseite des Resonators. Nur ein vergleichsweise geringer Teil (hellblau dargestellt) befindet sich außerhalb und veranschaulicht die entstehenden Strahlungsverluste.

3 Durchführung

3.1 Technologie

In diesem Kapitel werden die einzelnen Prozessschritte mit den entsprechenden Parametern zur Herstellung der elektrischen Kontaktpads an den intrinsischen GaAs/AlGaAs Nanodrähten ausführlich erklärt. Des Weiteren werden Probleme, die während der Verarbeitung der Probe M4581 entstanden sind, geschildert. In dieser Arbeit werden zwei intrinsische GaAs/AlGaAs Nanodrähte untersucht. Die erste Probe (M4581_1) bleibt vor der Kontaktierung unbehandelt. Bei der zweiten Probe (M4581_2) wird an einer Endfacette des Nanodrahtes die AlGaAs-Passivierung weggeätzt. Die Herstellung der GaAs-Kernstrukturen erfolgt in der MOVPE mit 100 nm großen kolloidalen Au-Partikel auf einem GaAs-Substrat mit der Kristallorientierung (111)B. Die AlGaAs-Mantelstruktur wird in der MBE realisiert. Nach Wachstum der i-GaAs/i-AlGaAs core-shell-Nanodrähte wird die Probe M4581 mit dem REM untersucht.

3.1.1 Prozesstechnologie der Probe M4581_1

Die Probe M4581_1 wird einem Ätzschritt mit HCl : H₂O (1:1) für 10 Sekunden zur Entfernung der AlGaAs-Ummantelung unterzogen und daraufhin im REM untersucht.

Die Nanodrähte werden für die optische und elektrische Charakterisierung von dem GaAs-Substrat auf ein mit Siliziumdioxid beschichtetes Silizium-Waferstück transferiert. Dazu wird das Silizium-Waferstück zunächst in einem Lösungsmittelschritt mit Aceton und Propanol gereinigt. Die Nanodrähte werden mit einem Skalpell abgekratzt, in Eppendorf-Caps überführt und daraufhin für 2 Minuten in ein Ultraschallbad gelegt. Das Silizium-Waferstück wird bei 85° C auf eine Heizplatte gelegt und die Nanodrähte werden aus einer dispergierten Lösung auf das Trägersubstrat aufgetragen. Anschließend wird nach dem Aufbringen der Nanodrähte die Probe unter dem Lichtmikroskop kontrolliert. Bei zu geringer Anzahl der Nanodrähte wird die Probe nochmals den Schritten des Nanodrahttransfers unterzogen bis ausreichend Nanodrähte zur Verarbeitung vorhanden sind.

Nach erfolgreichem Transfer der Nanodrähte auf das Trägersubstrat, werden die einzelnen Kontaktschichten des Kontaktpads hergestellt. Als Isolatorschicht zwischen dem Trägersubstrat und der Metallisierung wird Durimid 1:1 benutzt. Das Durimid 1:1 wird dafür aus dem Gefrierschrank entnommen und für 30 Minuten bei Raumtemperatur gerührt. Anschließend wird das Durimid auf die Probe mit einer Pipette aufgetragen und im Spincoater gleichmäßig verteilt. Die Enddrehzahl betrug 1000 Umdrehung pro Minute, die Dauer 150 Sekunden, die Beschleunigung 5000 und es wird Programm 8 ausgewählt. Nach dem Spin-Coating wird der Lack für 3 Minuten bei 95° C

ausgeheizt. Der Fotolack wird nachfolgend in der Maskenjustier- und Belichtungsanlage an den Endfacetten 40 Sekunden lang unter dem Filter 300 UV belichtet. Bei der Belichtung wird die JFET-Maske (Cr-Maske) benutzt.

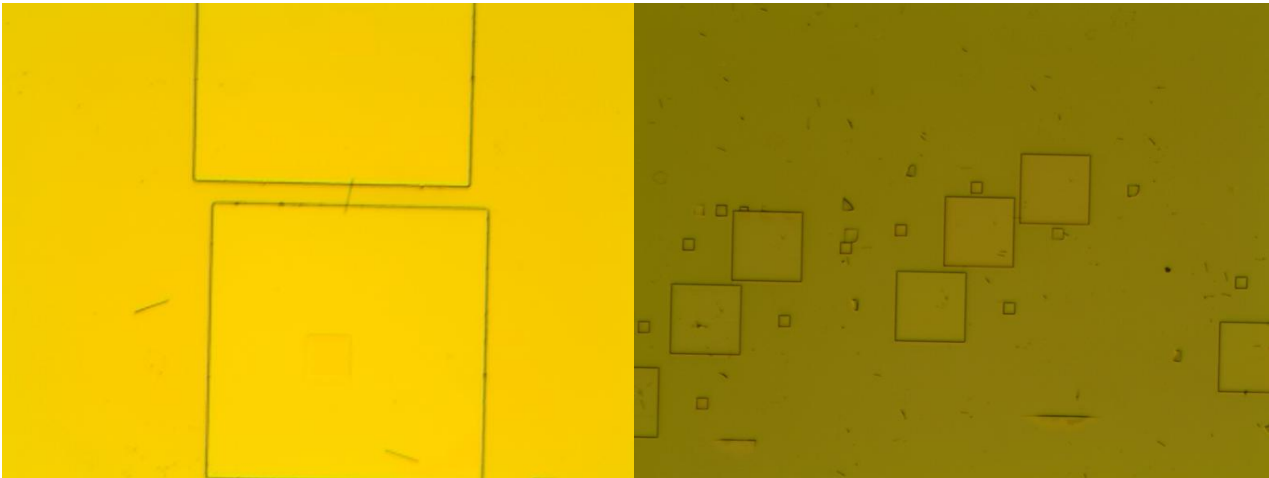


Abb. 11: Durimid-Schicht des Kontaktpads auf der Probe M4581_1 ungeätzt an den Endfacetten der Nanodrähte nach dem Belichten und Entwickeln des Durimids. Bild links: Lichtmikroskopaufnahme eines Nanodrahtes mit zwei Durimid-Schichten an den Endfacetten. Bild rechts: Lichtmikroskopaufnahme von mehreren Durimid-Schichten.

Es werden immer mindestens 15 Nanodrähte belichtet, da einzelne Kontaktpads in weiteren Prozessschritten wie z.B. bei nicht genau positionierte Belichtung der Endfacetten oder Verschmutzung unbrauchbar für die elektrische Charakterisierung werden. Bei dieser Probe werden 16 Nanodrähte belichtet. Im Anschluss wird die Probe 30 Minuten bei Raumtemperatur konditioniert und erst daraufhin hin entwickelt. Zum Entwickeln der Probe wird 30 Sekunden in HTRD2 und dann 30 Sekunden in RER600. Nach dem Entwicklungsschritt wird die Probe unter Stickstoffgas getrocknet und daraufhin unter dem Lichtmikroskop untersucht, ob die Durimid-Flächen für die elektrische Charakterisierung brauchbar sind (Abb. 11). Im Postbake wird das Durimid bei 170° C 120 Minuten ausgehärtet und anschließend im AST Legierofen mit dem Legierprogramm ipag_isol getempert. Nach Durchlauf aller Prozessschritte für die Herstellung der Durimid-Schicht wird die Probe unter dem Lichtmikroskop kontrolliert.

Im folgenden Abschnitt wird die Herstellung der Metallisierung auf der Isolatorschicht erläutert. Für jede Endfacette eines Nanodrahtes werden unterschiedliche Metallisierungen ausgewählt. Die fotolithografischen Prozessschritte des Belacken, Belichten und Entwickeln des Fotolacks verlaufen für beide Enden des Nanodrahtes analog. Zuerst wird die Prozessabfolge für das Aufbringen der Metallisierung an einem Ende des Nanodrahtes durchgeführt. Die Probe wird mit 1505 belackt und mit den Schleuderparametern 1000/30/4000 von Programm 6 (Geschwindigkeit in Umdrehungen pro Minute/Dauer in Sekunden/Beschleunigung) im Spin-Coater verteilt. Der Fotolack wird für 1

Minute bei 110° C ausgeheizt. Anschließend wird nur eine Endfacette der Nanodrähte unter der JFET-Maske für 3 Sekunden bei 400 UV belichtet. Der Resist wird zuerst 1 Minute mit AZ351 B : H₂O (1:4) entwickelt und danach 1 Minute unter destilliertem Wasser gehalten. Die Probe wird im Anschluss unter dem Lichtmikroskop untersucht (Abb. 12 links). Im darauf folgenden Aufdampfprozess wird als Metallisierung für den p-Kontakt Platin/Titan/Platin/Gold (Pt/Ti/Pt/Au) mit den Höhen 5/10/10/300 nm aufgetragen. Beim Lift-off werden alle nicht belichteten Stellen entfernt und die Probe wird darauf wiederum unter dem Lichtmikroskop kontrolliert (Abb. 12 rechts). Die Probe wird mit dem Programm uni-du.7 im Legierofen getempert.



Abb. 12: Lichtmikroskopaufnahmen der Probe M4581_1 bei der Herstellung der Metallisierung für den p-Kontakt. Bild links: Aufnahme nach dem Entwicklungsprozess des Fotolacks. Bild rechts: Aufnahme nach dem Legieren der Metallisierung des p-Kontaktes.

Der Herstellungsprozess der Metallisierungsschicht für den n-Kontakt verläuft vergleichsweise analog zu dem des p-Kontaktes. Die Kontakte unterscheiden sich in der Herstellung nur bei der Wahl der Metallisierung und dem darauf folgenden Legierprogramm. Für den n-Kontakt wird als Metallisierung Palladium/Germanium/Gold (Pd/Ge/Au) mit den Höhen 50/170/80 nm verwendet und wird mit dem Legierprogramm projekt.neu getempert. Bei dem Aufdampfprozess des Palladium in der Aufdampfanlage ist die Mechanik des Shutters defekt gewesen und das Aufdampfschiffchen, in welchem sich das Palladium befindet, besaß ein Loch. In Folge dessen wird beim ersten Aufdampfprozess kein Palladium aufgetragen und die Probe wird aufgrund der Fehlfunktion des Shutters verschmutzt. Die Probe wird daraufhin gereinigt und es werden die Prozessschritte zur Herstellung des p-Kontaktes wiederholt. Nach dem Lift-off wird die Probe unter dem Lichtmikroskop untersucht (Abb. 13).

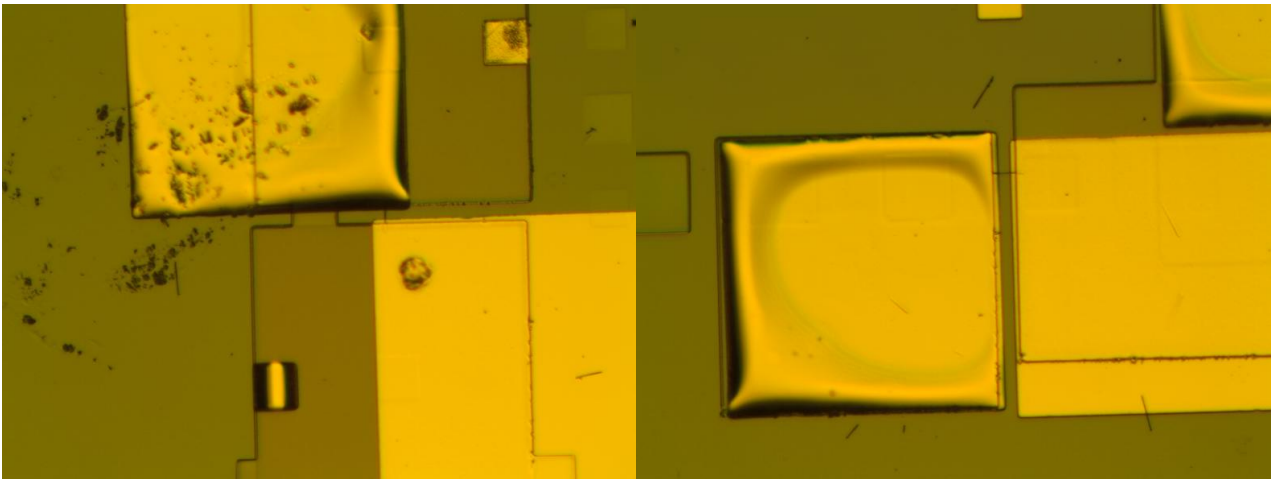


Abb. 13: Lichtmikroskopaufnahmen der Probe M4581_1 bei der Herstellung der Metallisierung für den n-Kontakt. Bild links: Aufnahme eines verschmutzten Kontaktpads nach dem Lift-Off. Bild rechts: Aufnahme einer nicht gelungenen Metallisierung des Kontaktpads nach dem Lift-Off.

3.1.2 Prozesstechnologie der Probe M4581_2

Die Probe wird vor dem Ätzen der Endfacetten einem Lösungsmittelschritt unterzogen und anschließend mit AR-P 5320 mit den Schleuderparametern 3000/30/3000 (Geschwindigkeit/Dauer/Beschleunigung) mit Programm 4 belackt. Der Fotolack wird 10 Minuten bei 110° C ausgeheizt und danach wird für 100 Sekunden eine Flutbelichtung mit einer Defuser-Maske durchgeführt. Nach dem vier-minütigen Entwicklungsschritt mit AR 300-26 : H₂O (1:1) wird die Probe 60 Sekunden mit destilliertem Wasser gespült. Der Postbake dauerte 30 Minuten bei 120° C.

Die Probe M4581_2 wird einem Ätzschritt mit HCl : H₂O (1:1) für 10 Sekunden zur Entfernung der AlGaAs-Ummantelung unterzogen und daraufhin im REM untersucht. Nach jedem Ätzschritt wird die Probe 60 Sekunden mit destilliertem Wasser gespült, um den Ätzvorgang zu stoppen. Der Ätzschritt hatte jedoch keinerlei Auswirkung auf die Nanodrähte. Die angefertigten Nanodrähte besaßen über der AlGaAs-Mantelstruktur eine GaAs-Hülle, die das Aluminium vor der Oxidation schützen sollte. Die GaAs-Passivierung konnte die Oxidation des Aluminiums nicht verhindern und daher konnten die Nanodrähte nicht geätzt werden. Daraufhin wird die Probe in unverdünntem HCl für 30 Sekunden geätzt. Die anschließende REM-Kontrolle ergibt, dass die AlGaAs-Mantelstruktur immer noch vorhanden ist. In einem zweiten Nachätzschritt wird die Probe 10 Sekunden mit H₃PO₄ : H₂O₂ : H₂O (1:1:25) angeätzt und dann 40 Sekunden mit konzentrierter HCl-Säure geätzt. Bei der Analyse mit dem REM wird ein erfolgreiches Ätzen der Probe M4581_2 festgestellt (Abb. 14).

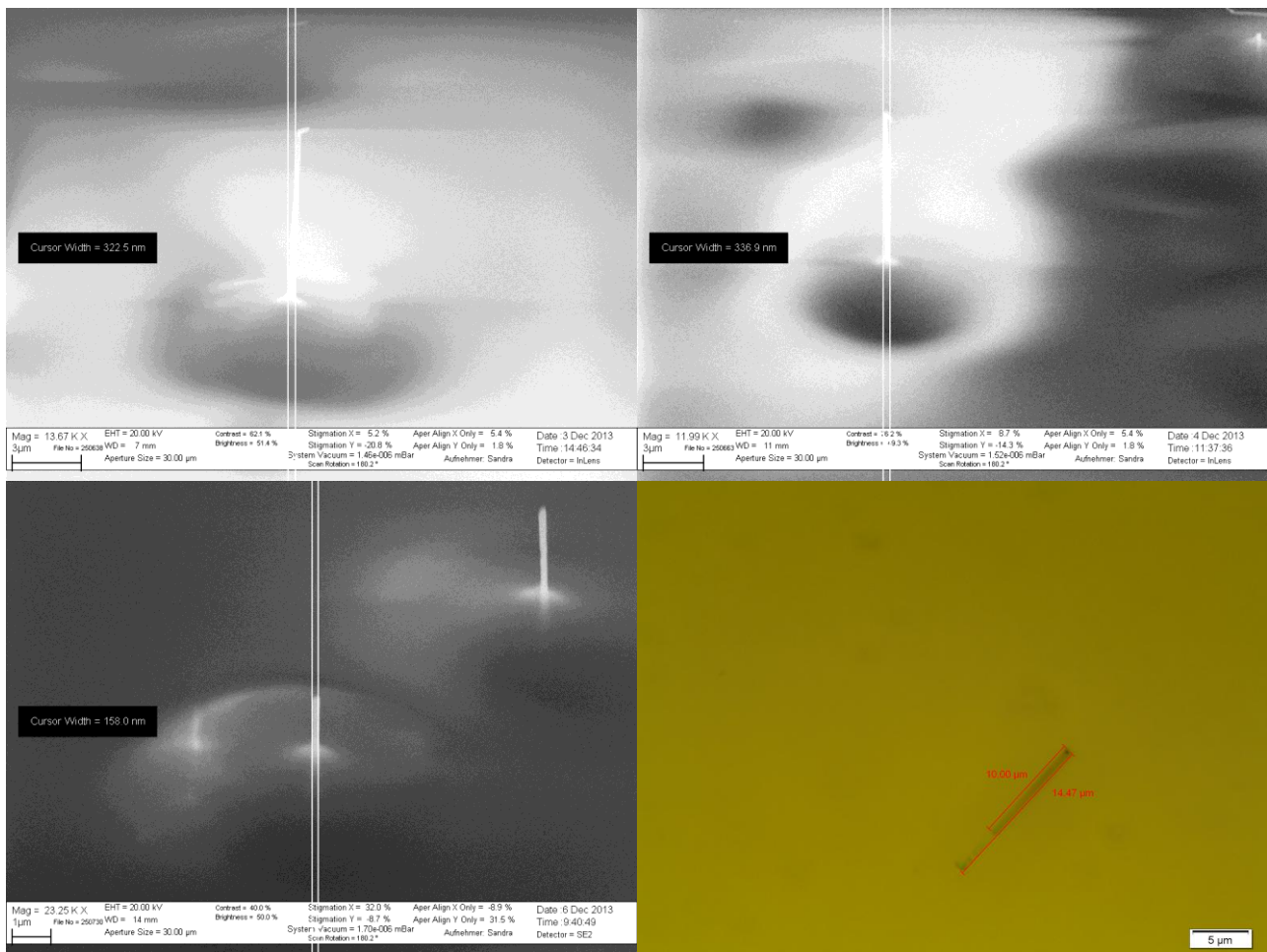


Abb. 14: Aufnahmen der Probe M4581_2 nach verschiedenen Ätzschritten. Bild o. links: REM-Aufnahme eines Nanodrahtes nach dem ersten Ätzschritt. Bild o. rechts: REM-Aufnahme eines Nanodrahtes nach dem zweiten Ätzschritt. Bild u. links: REM-Aufnahme eines Nanodrahtes nach dem dritten Ätzschritt. Die AlGaAs-Mantelstruktur wurde erfolgreich geätzt. Bild u. rechts: Lichtmikroskop-Aufnahme eines erfolgreich geätzten Nanodrahtes.

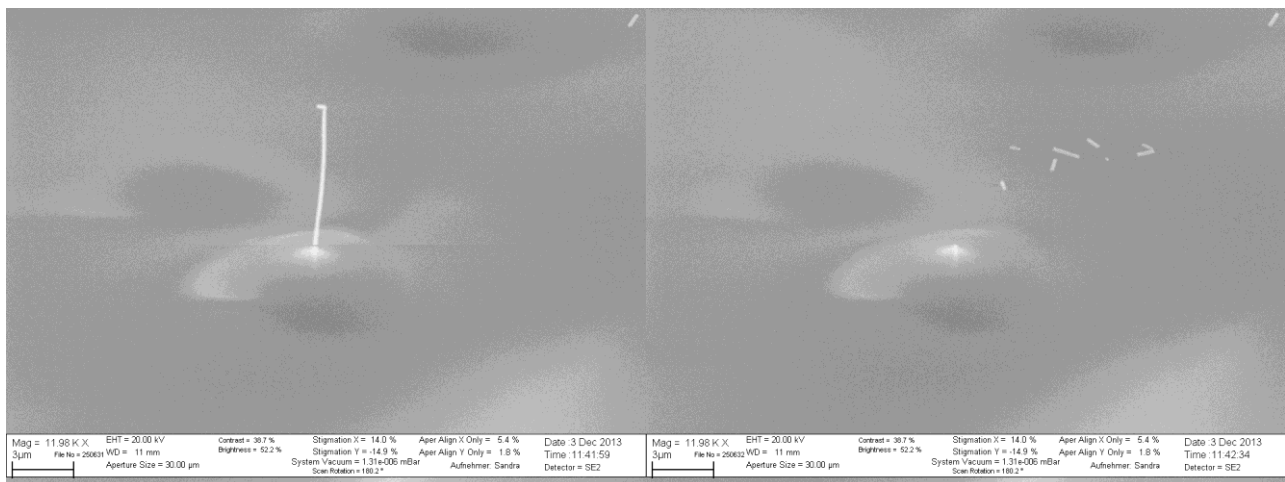


Abb. 15: Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahme eines Nanodrahtes der Probe M4581_2. Bild. links: Fokussierte Aufnahme des Nanodrahtes. Bild rechts: Fokussierte Aufnahme des selben Nanodrahtes, der durch statische Aufladung in kleinere Teile zerbrochen ist.

Der Nanodrahttransfer und die Durimid-Beschichtung der Probe M4581_2 verläuft mit gleichen Parametern wie bei der Probe M4581_1. Die Probe M4581_2 wird zweimal mit Durimid beschichtet, da die Schichten, die bei der ersten Beschichtung hergestellt wurden, zum größten Teil unbrauchbar waren (Abb. 16).

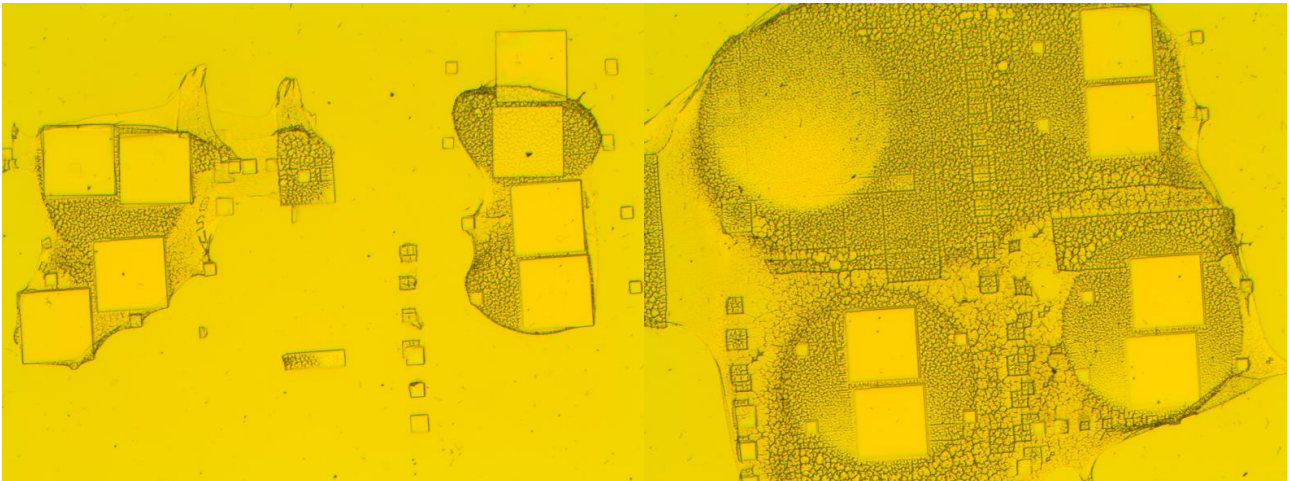


Abb. 16: Aufnahme der fehlerhaften Durimid-Schichten der Probe M4581_2 nach dem ersten Entwickeln. Das Durimid nahe der Belichtungsfelder wurde nach dem Entwicklungsschritt nicht vollständig gelöst.

Bei der Herstellung der Kontaktpads der Probe M4581_2 werden dieselben Metallisierungen und Legierprogramme verwendet wie bei der Probe M4581_1. Die (Pt/Ti/Pt/Au) (5/10/10/300 nm) Metallisierung für den p-Kontakt wird an dem GaAs-Kern aufgedampft und (Pd/Ge/Au) (50/170/80 nm) Metallisierung für den n-Kontakt an der AlGaAs-Mantelstruktur. Der Herstellungsprozess verläuft analog zu dem der Probe M4581_1 mit der Ausnahme, dass bei Probe M4581_2 ein anderer Fotolack zur Herstellung des Ohm'schen Kontaktes verwendet wird.

Der Fotolack AR-P 5350 wird mit den Schleuderparametern 5000/30/7000 (Geschwindigkeit/Dauer/Beschleunigung) im Spin-Coater auf der Probe verteilt und für 15 Minuten bei 95°C ausgeheizt. Anschließend wird die Endfacetten der Nanodrähte mit der HFET-Maske für je 5,5 Sekunden mit dem Filter 300 UV belichtet. Nach der Entwicklung des Fotolacks mit AR 300-35 : H₂O (1:2) für 1 Minute wird die Probe 1 Minute mit Wasser abgespült und danach unter dem Lichtmikroskop kontrolliert. Der Fotolack AR-P 5350 wird auf den belichteten Feldern nicht restlos gelöst. Bei der Herstellung des p-Kontaktes wird daraufhin 30 Sekunden mit AR 300-35 : H₂O (1:2) nachentwickelt, jedoch sind noch kleine Mengen an Fotolack auf den Belichtungsfelder vorhanden. Der Fotolack beim n-Kontakt wird 15 Sekunden mit AR 300-35 : H₂O (1:1) nachentwickelt und es sind kaum Reste erkennbar gewesen (Abb. 17). Die Fotolackparameter, die bei der Probe M4581_2 benutzt werden, eignen sich nicht für die Herstellung von Kontaktpads auf einem Silizium-

Waferstück, da die Probe wegen der Reflektion des Siliziumdioxid beschichteten Silizium-Wafers bei der Belichtung überbelichtet werden und daher schwer löslich sind.



Abb. 17: Lichtmikroskop-Aufnahme eines kontaktierten Nanodrahtes der Probe M4581_2. Der gelbe Kontakt (p-Kontakt), jeweils oben rechts auf den zwei Bildern zu sehen, weist mehr Fotolackreste auf, wie der durchsichtige Kontakt (n-Kontakt).

3.2 Aufbau des DC-Messplatzes

Bei der elektrischen Charakterisierung wird die Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U-Kennlinie) der Nanodrähte an einem DC-Messplatz vermessen. Die Probe wird dafür durch Vakuum an einem Probenhalter fixiert und an die Metall-Messspitzen herangefahren. Die Metallspitzen bestehen aus Wolfram und sind wie der Probenhalter frei beweglich. Für die Überprüfung der exakten Positionierung der zwei Messspitzen auf den sehr kleinen Kontaktpads dient ein Lichtmikroskop. Die Messspitzen sind mit einer Source Measurement Unit (SMU) verbunden, die einerseits Strom erzeugt, aber auch als Messgerät dient. Der DC-Messplatz ist an einem Computer angeschlossen und mit einer Anwendung sind die nötigen Parameter wie Strom-/Spannungshöhe und Höhe und Anzahl der Messschritte einstellbar. Gleichzeitig stellt das Programm je nach Voreinstellung die gemessenen Werte grafisch dar.

3.3 Rasterelektronenmikroskop

Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) lassen sich Strukturen mit Auflösungen im Bereich von einigen Nanometern, untersuchen. Dabei rastert ein Elektronenstrahl die Probe ab und durch Wechselwirkungen mit der Probe, kann die Oberflächenbeschaffenheit analysiert werden. Voraussetzung für die Messung ist einerseits eine leitfähige Probenoberfläche, damit beim Auftreffen des Elektronenstrahls die zur Bilderzeugung nötigen Sekundärelektronen erzeugt werden

können, und andererseits ein Hochvakuum, um störende Wechselwirkungen mit der Luft zu vermeiden.

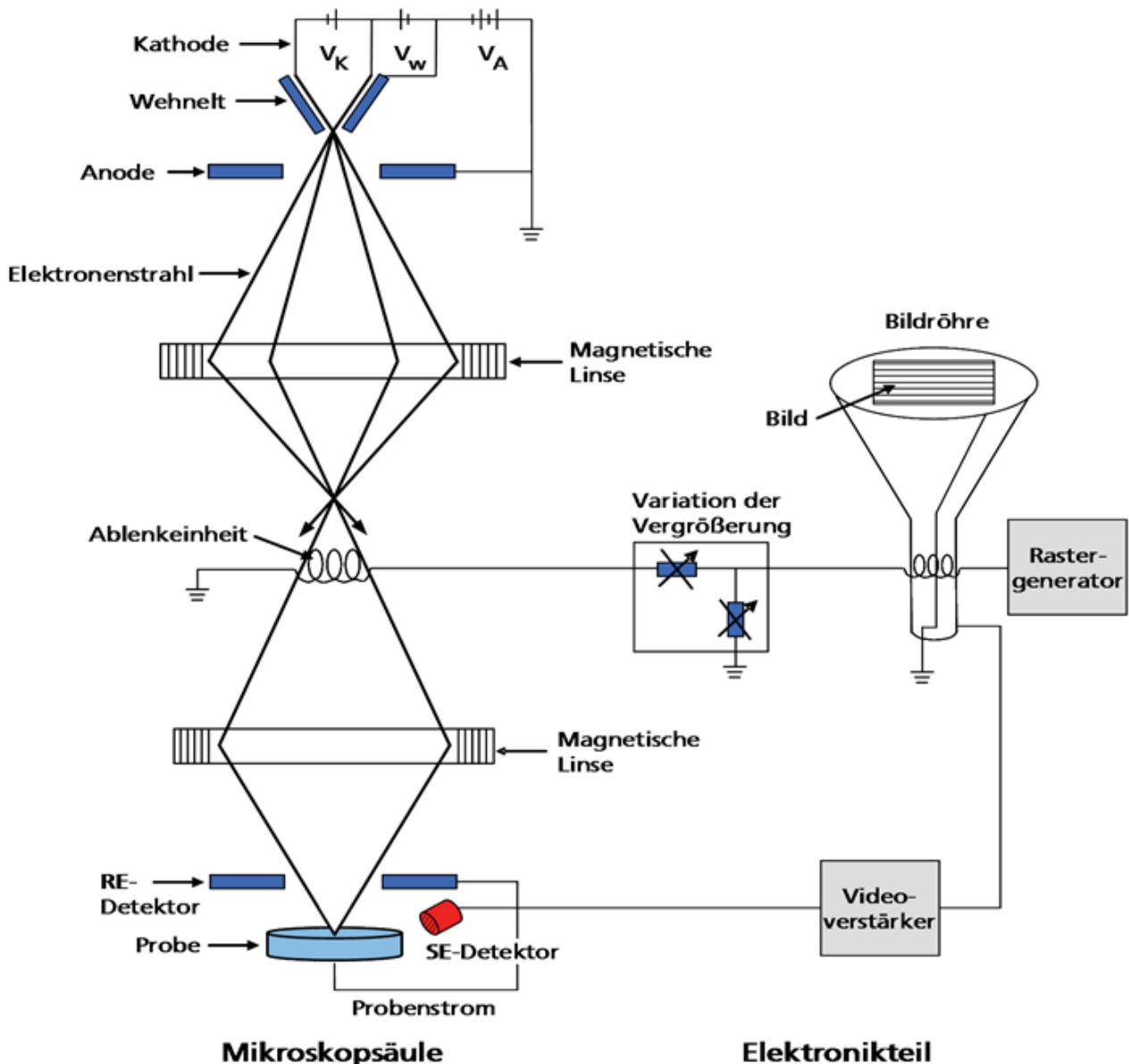


Abb. 18: Schematischer Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops (26)

Der Elektronenstrahl wird mit einer Wolfram-Glühkathode in einem Wehnelt-Zylinder erzeugt und durch Anlegen einer Beschleunigungsenergie an der Anode (in dieser Arbeit werden alle REM-Untersuchung bei 20 kV durchgeführt) auf die Probe beschleunigt. Magnetspulen dienen zur Ablenkung und Fokussierung des Elektronenstrahls und Ablenkspulen der Ablenkeinheit zum Abrastern der Probe. Durch die kinetische Energie der Elektronen, die auf die Probe treffen, werden Sekundärelektronen aus der Probenoberfläche herausgelöst, von Detektoren aufgenommen und durch Verstärkung der aufgenommenen Emission (Videoverstärker) zu einem Bild verarbeitet. Das Rasterelektronenmikroskop verfügt über verschiedene Detektoren mit denen zum Beispiel die

Rückstreuелектронен gemessen oder auch die Materialzusammensetzung (EDX) durch Röntgenstrahlung oder untersucht werden kann.

3.4 Aufbau des Photolumineszenzspektroskopie Messplatzes

Der in Abbildung 8 dargestellte Messplatz für die Photolumineszenzspektroskopie besteht unter anderem aus einem bei einer Wellenlänge von 1064 nm emittierenden frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser, der durch eine Laserdiode bei 808 nm optisch gepumpt wird. Es tritt Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 532 nm aus, deren Leistung präzise durch ein Filterradd (1) reguliert werden kann. Sie gelangt über den Fiber-Port (2) in eine Single-Mode-Glasfaser (3), welche der sicheren und einfachen Übertragung dient. Nach der Übertragung muss der Strahlengang zunächst wieder mittels Objektivlinse mit vierfacher Vergrößerung (4) parallelisiert werden.

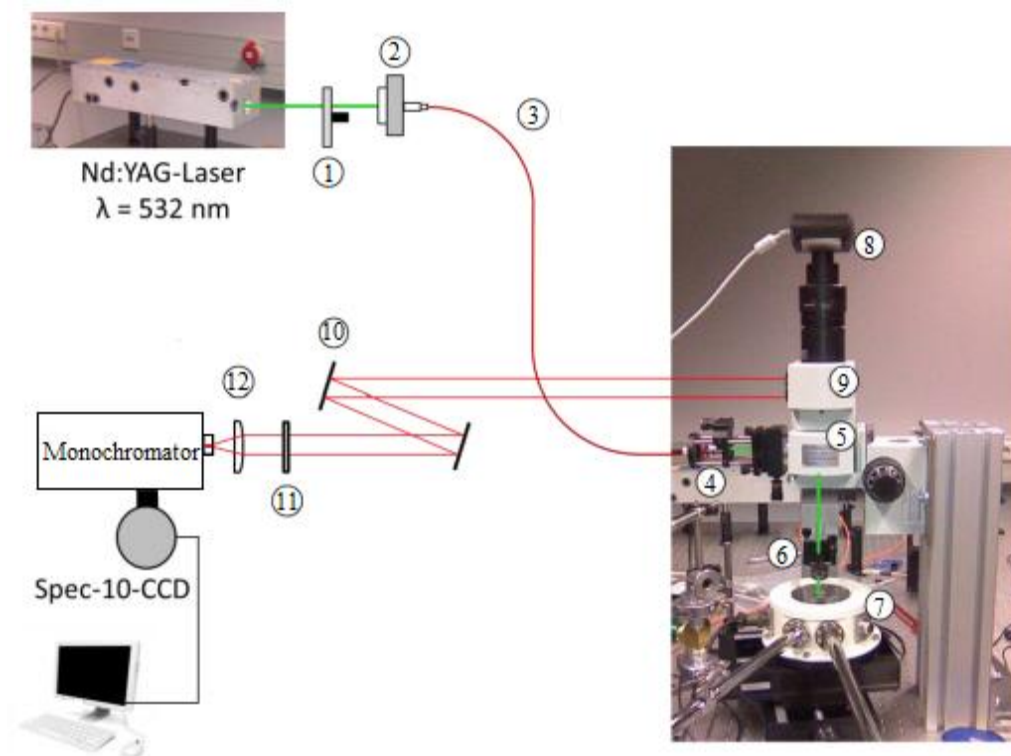


Abb.19: Aufbau des Photolumineszenzspektroskopie Messplatzes [11].

Das grundlegende Messprinzip basiert nun darauf, den Laserstrahl nach dem Durchlaufen des Strahlteilers (5) mittels einer weiteren Objektivlinse (6) zu einem Spot mit einem Durchmesser von ca. $150 \mu\text{m}$ auf die Probe (7) zu fokussieren, sodass dort mit hoher Selektivität ein definierter Bereich zur Emission angeregt wird. Diese Lumineszenz wird im Anschluss per Interferenz an

einem Gitter im Monochromator spektral aufgespalten. Nun kann jeder Wellenlänge ein anderer Ort auf dem CCD-Chip des Detektors zugewiesen werden, woraus ein Spektrum resultiert, das die Intensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge darstellt. Außerdem ist eine Lumineszenzabbildung der Probe möglich, indem das Gitter auf die 0-te Ordnung gestellt wird. Es kann hierbei zwischen zwei Gittern mit Auflösungen von 500 nm und 1 μm gewechselt werden.

Die Position des Lasers wird am Computer durch die Steuerung der 50-fach vergrößernden Mikroskopobjektivlinse (6) mit einer minimalen Schrittweite von 100 nm in alle Raumrichtungen verfahren. Zusätzlich ermöglicht die CCD-Kamera (8) eine zeitnahe Betrachtung der Probe (7), welche sich auf dem Kühlfinger des Durchfluss-Kryostaten befindet und mit flüssigem Stickstoff auf bis zu 79 K herabkühlen lässt. Nach der Bildaufnahme per CCD-Kamera ist die Erstellung eines Spektrums oder einer Lumineszenzabbildung erst wieder möglich, wenn der verstellbare Spiegel (9) umgeklappt wird, woraufhin das Photolumineszenzsignal samt reflektierter Laserstrahlung zu den Ablenkspiegeln (10) gelangt. Diese leiten das Strahlenbündel auf eine Linse (12), die auf den Eintrittsspalt des Monochromators fokussiert. Zuvor wird allerdings die hochintensive Laserstrahlung durch einen Langpassfilter (11), der alle Wellenlängen unter 550nm absorbiert, zum Schutz des empfindlichen CCD-Detektors herausgefiltert.

3.4.1 Ablauf der Messung

Mithilfe der Photolumineszenzspektroskopie soll herausgefunden werden, ob die in dieser Projektarbeit zu untersuchenden Nanodrähte in der Lage sind Photolumineszenz zu erzeugen, die innerhalb des Drahtes geleitet und wie in einem Resonator verstärkt wird, sodass Laseremission auftreten kann. Es werden dafür beide Messmodi ausgenutzt, die Photolumineszenzabbildung und die Aufnahme eines Spektrums. In beiden Fällen ist der Laserspot so einzustellen, dass er defokussiert in der Mitte des Drahtes einen Großteil zur Lumineszenz anregt. Das Messprinzip ist in Abbildung 9 dargestellt.

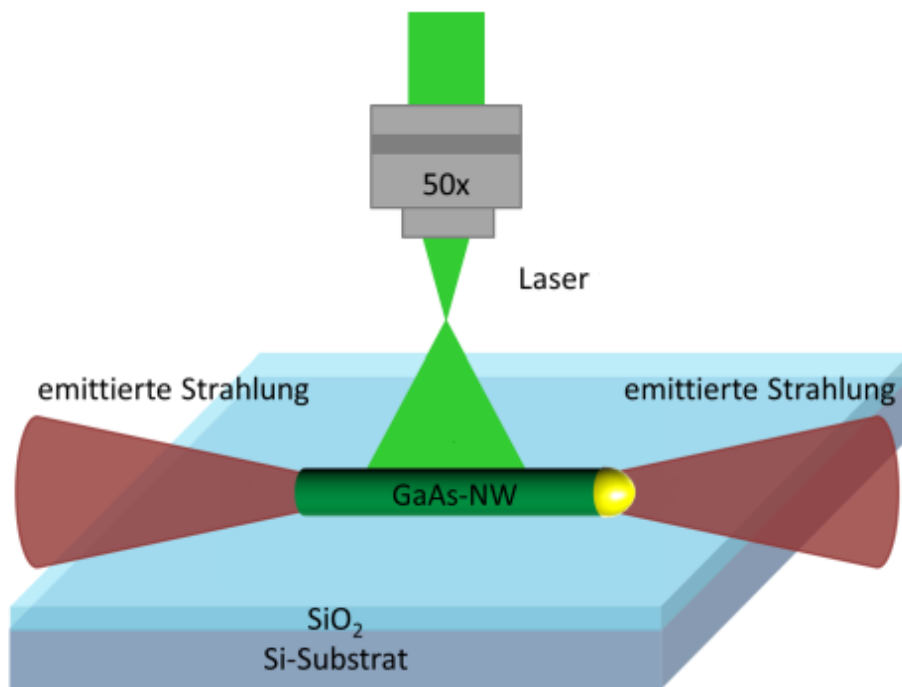


Abbildung 20: Darstellung des Messprinzips: Der defokussierte Laserstrahl trifft auf den Nanodraht und erzeugt drei Emissionspunkte [11].

Für die Untersuchung auf Wellenleitung erfolgt in dem zuvor beschriebenen Messaufbau eine Lumineszenzabbildung der Drähte, die sich auf einem mit Siliziumdioxid beschichteten Siliziumwafer befinden. Hierfür wird das Monochromatorgitter auf die 0-te Ordnung gesetzt, sodass es wie ein Spiegel funktioniert. Im Idealfall sollten bei Wellenleitung in der Abbildung drei Emissionspunkte zu sehen sein. Es ist zunächst zu erwarten, dass im Auftreffpunkt des Lasers, also in der Drahtmitte eine hohe Intensität erkennbar ist. Des Weiteren müsste jeweils ein Emissionspunkt an den Endfacetten auftreten, da dort nach der Leitung Licht ausgekoppelt wird.

Im Anschluss kann für jeden Emissionspunkt ein individuelles Spektrum aufgenommen werden, indem zunächst das Monochromatorgitter auf den zu erwartenden Wellenlängenbereich der Lumineszenz eingestellt wird. Danach ist es erforderlich das Emissionsbild mithilfe des Eintrittsspalts und des letzten Ablenkspiegels so einzuschränken, dass nur noch der gewünschte Punkt aufgenommen wird. Dies ermöglicht eine Minimierung der Störeinflüsse im Spektrum bedingt durch die anderen Emissionspunkte. Das Verkippen des Spiegels verschiebt den betrachteten Bereich und die Verkleinerung des Spalts reduziert ihn auf einen Streifen, in dem sich der Punkt befinden sollte. Dieser Bildbereich kann zusätzlich durch die Selektion der ausgelesenen

Zeilen des CCD-Chips eingeschränkt werden. Das Signal wird in dieser Arbeit standardmäßig zehn Sekunden lang zeitlich aufintegriert.

4 Auswertung

4.1 Messergebnisse der elektrischen Charakterisierung

Die Proben M4581_1 und M4581_2 werden zur Untersuchung des Einflusses der AlGaAs-Ummantelung auf die elektrischen Eigenschaften des GaAs-Nanodrahtes am DC-Messplatz vermessen. Dabei wird versucht die Strom-Spannungs-Kennlinie der intrinsischen AlGaAs/GaAs Nanodrähte festzustellen. Jeder Nanodraht wird einzeln vermessen und mit Spannungen mit unterschiedlichen Schrittgrößen angeregt und die SMU'S zeichnen den Strom auf und speichern Wertepaare, die dann vom Computer aus grafisch dargestellt werden können. Die Nanodrähte werden auf Lasing-Eigenschaften untersucht und sollten im Idealfall die Strom-Spannungs-Kennlinie ähnlich einer Diode aufweisen.

4.1.1 Prozesstechnologie der Probe M4581_1

Bei der Probe M4581_1 ungeätzt ist die AlGaAs-Ummantelung vollständig erhalten. Es werden bei dieser Probe insgesamt 16 Nanodrähte kontaktiert und vermessen. Dabei werden als Parameter zur Messung aller Nanodrähte eine Spannung von -1 V bis 1 V und eine Schrittgröße der Spannung von 0.2 V gewählt. Damit die Nanodrähte aufgrund von Überspannung nicht zerstört werden können, wird bei den Messungen eine Grenzspannung von 10^{-6} A voreingestellt. In Abbildung 21 (Bild links) ist die I-U-Kennlinie eines Nanodrahtes dargestellt.

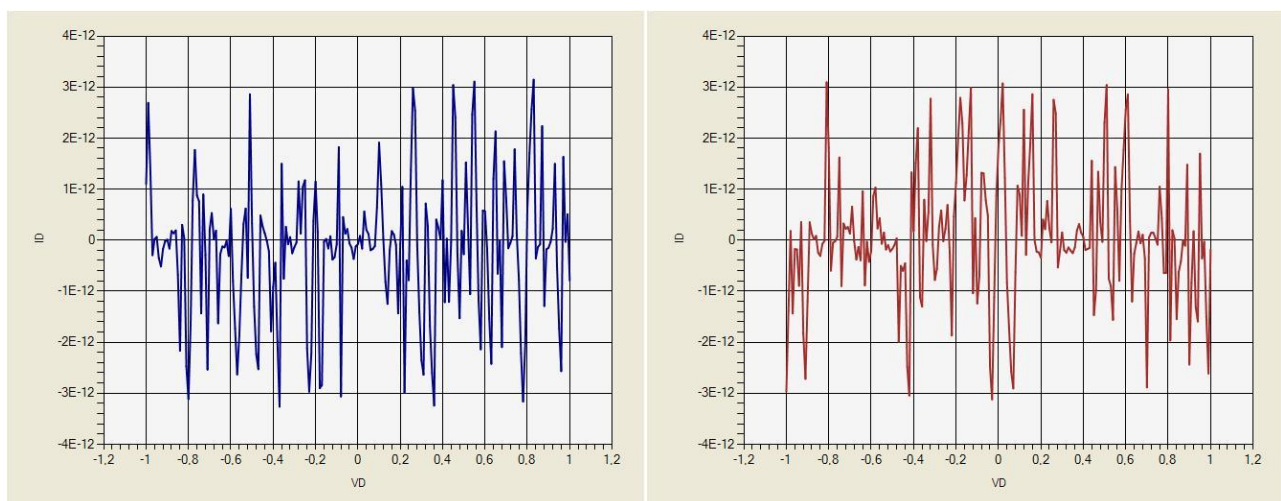


Abb. 21: Bild links: gemessene I-U-Kennlinie eines beliebigen Nanodrahtes der Probe M4581_1. Bild rechts: gemessene I-U-Kennlinie, wenn die Messspitzen keinen Kontakt haben.

Bei der I-U-Kennlinie in Abbildung 21 (Bild rechts) sind die Messspitzen zur Referenzmessung voneinander entfernt und angehoben, so dass diese keinen Kontakt mit der Probe haben und keine Leitung vorhanden ist. Die in Abbildung 21 (Bild links) und Abbildung 21 (Bild rechts) beispielsweise dargestellten I-U-Kennlinien wurden in ähnlicher Form bei allen gemessenen Nanodrähten nachgewiesen. Die gemessenen Spannungen bei Anregung der Probe durch Strom überschritten nicht den Bereich von 4 pA und die Spannungsausschläge, die sich in der Abbildung zeigen, sind willkürlich über den Stromverlauf verteilt. Die sehr niedrige Spannung und das willkürliche Verhalten der Spannungskurve, deutet darauf hin, dass hier Wechselwirkungen mit Luft oder Probe gemessen wird, da die hier gemessene Spannung für eine mögliche Leitung durch den Nanodraht um mehrere Größenordnungen zu klein ist. Demnach konnte bei der elektrischen Charakterisierung dieser Probe bei keiner der untersuchten Nanodrähte eine elektrische Leitung festgestellt werden.

Das Messgerät wird anschließend neu kalibriert und die Messung mit unterschiedlichen Parametern, wie z. B. verringerte und erhöhte Größe der Stromamplituden oder veränderter Schrittbreite des Stroms, erneut durchgeführt. Jedoch zeigte die Anregung durch Strom keine Leitung des Nanodrahtes. In Abbildung 22 sind die 16 gemessenen Nanodrähte in einem Grafen übereinandergelegt, um darzustellen, dass keine Messung eine nennenswert große Spannung aufweist.

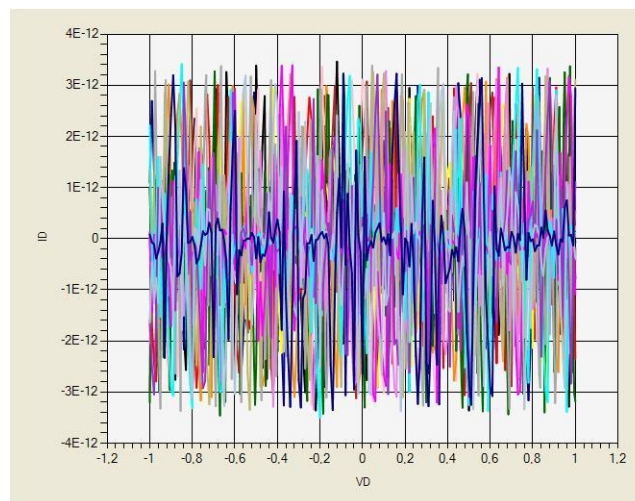


Abb. 22: Alle Werte der 16 gemessenen Nanodrähte wurden übereinandergelegt und in einem Graphen geplottet.

4.1.2 M4581_2 geätzt

Bei der Probe M4581_2 ist die AlGaAs-Ummantelung an einer Endfacette des Nanodrahtes abgeätzt. Bei der elektrischen Charakterisierung dieser Probe werden insgesamt nur 8 Nanodrähte vermessen, da die restlichen Nanodrähte für die Messung unbrauchbar sind. Es wurden dieselbe Spannungsbegrenzung, Stromstärke und Schrittgröße der Stroms wie bei der Probe M4581_1 zur Aufzeichnung der I-U-Kennlinie der Probe M4581_2 gewählt. Die Daten sind in Kapitel M4581_1 abzulesen.

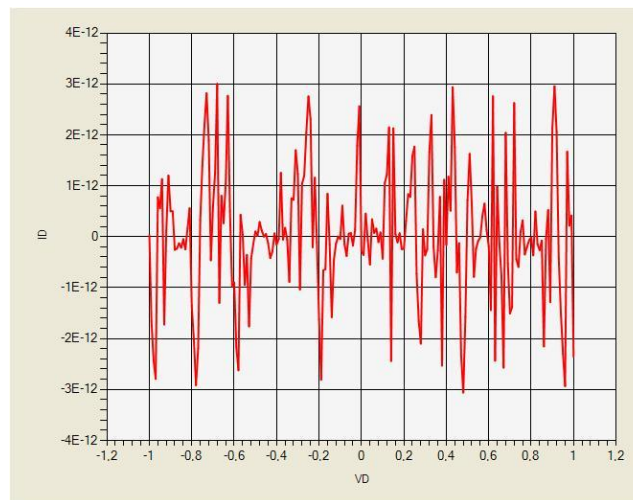


Abb. 23: Aufgezeichnete I-U-Kennlinie eines beliebigen Nanodrahtes der Probe M4581_2.

Die in Abbildung 23 dargestellten Charakteristiken der I-U-Kennlinie ist bei der Messung aller Nanodrähte festzustellen. Die willkürliche Verteilung der Spannungspeaks bei dieser geringen Stromstärke deutet darauf hin, dass die Nanodrähte der Probe M4581_2 wie bei den Messungen der Probe M4581_1 keine Leitfähigkeit besitzen. Die fehlerhafte Positionierung der Metallisierung kann als Fehlerquelle ausgeschlossen werden, da nach jedem Belichtungsschritt eine Kontrolle unter dem Lichtmikroskop erfolgte.

Anschließend wird auch bei dieser Probe mit unterschiedlichen Stromstärken und Schrittgrößen erneut gemessen. Auch bei Stromstärken von -3 V bis zu 3 V tritt keine Änderung bei der Aufzeichnung der Spannung zu den vorherigen Messungen auf.

4.2 Messergebnisse der Photolumineszenzspektroskopie

Im Rahmen dieser Projektarbeit wird an zwei Nanodrahtproben eine Photolumineszenzspektroskopie durchgeführt. Es handelt sich in beiden Fällen um die Ausgangsprobe M4581 mit intrinsischen GaAs Nanodrahtstrukturen, einer 200 nm dicken i-AlGaAs-Ummantelung und einer 3 nm dicken i-GaAs Passivierungsschicht. Im Vordergrund steht die Untersuchung auf Wellenleitfähigkeit und Lasing, welches durch optisches Pumpen mittels Nd:YAG-Laser erreicht werden soll.

Messergebnisse der Probe M4581_1

Analyse bei Raumtemperatur

Die erste Nanodrahtprobe ist unbehandelt und wird zunächst bei Raumtemperatur untersucht. Das Monochromatorgitter hat eine Auflösung von 1 μm und ist auf die Center-Wellenlänge von 870nm eingestellt. Dies entspricht der Bandlücke von GaAs bei 293 K.

Von den ungefähr 15 betrachteten Nanodrähten wies nur einer drei Emissionspunkte und somit Wellenleitung in der Lumineszenzabbildung auf. Es erfolgte für jeden Emissionspunkt eine Leistungsserie mit Anregungsdichten von 8,11 kW/cm² bis 68,96 kW/cm², wobei für deren Berechnung eine zylinderförmige Drahtoberfläche angenommen wurde, die sich mithilfe der in REM-Aufnahmen ermittelten durchschnittlichen Länge von 14 μm und Breite von 250 nm errechnen ließ. Die Laserleistung wurde mit einer Siliziumdiode gemessen und um den Faktor 0,9 aufgrund von Reflexionsverlusten am Kryostatenfenster korrigiert. Eine Leistungsserie ermöglicht es zu erkennen, ab welcher Anregungsdichte gegebenenfalls das gewünschte Lasing eintritt und wann detektierbare Wellenleitung einsetzt.

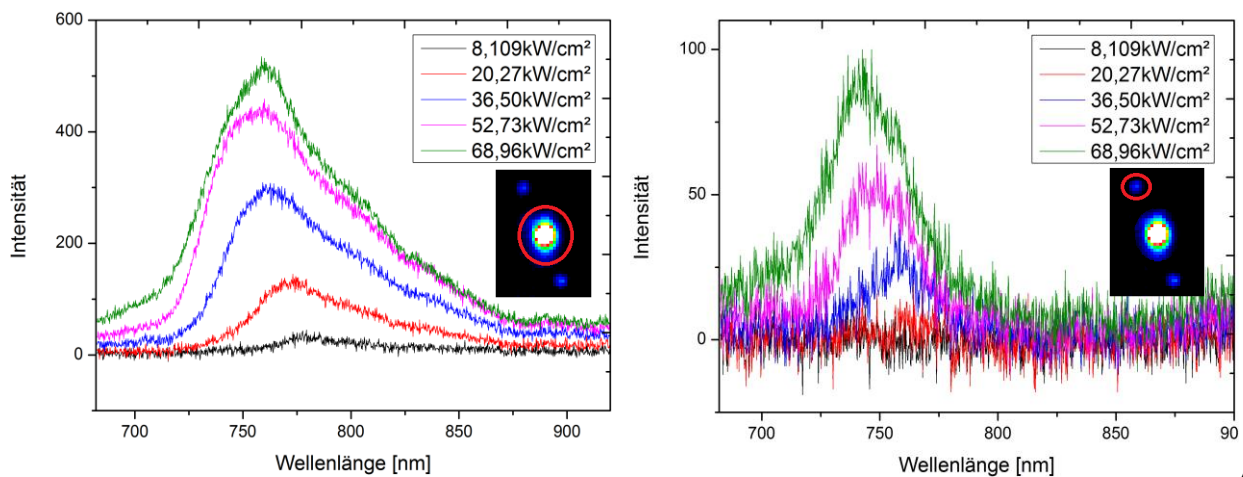


Abb.

10: a) Photolumineszenzspektrum des auf der rechten Seite der Abbildung dargestellten mittleren Emissionspunktes (rot eingekreist) bei verschiedenen Anregungsdichten b) Spektrum der linken Endfacette.

In Abbildung 10a) ist anhand der drei Emissionspunkte in der Lumineszenzdarstellung zu erkennen, dass die erste Probe bei Raumtemperatur Wellenleitung aufweist. Die Emission der Drahtmitte, also des Auftreffpunktes des Lasers, wird durch den roten Kreis hervorgehoben. Es ist außerdem das dazugehörige Photolumineszenzspektrum dargestellt.

Für jede Anregungsdichte ist jeweils nur ein relativ breiter Peak zu sehen (FWHM=75 nm bei höchster Anregungsdichte). Die drei höchsten Peaks haben ihr Maximum bei einer Wellenlänge von 760 nm und entsprechen wahrscheinlich der Bandlücke des AlGaAs in der Mantelschicht, welche von der Zusammensetzung abhängt. Die Maxima der Peaks bei niedrigen Anregungsdichten sind um ca. 15 nm rotverschoben. Des Weiteren fällt der deutlich flachere Anstieg der energetisch niedrigeren Flanke auf, was womöglich an einer schwachen Lumineszenz des GaAs oder von Defektzuständen liegen könnte.

Abbildung 10b) enthält das Spektrum der linken Endfacette. Es tritt eine Blauverschiebung der Peaks im Vergleich zum mittleren Emissionspunkt auf. Die Maxima liegen jetzt bei ca. 745 nm. Die Intensität des Signals ist zudem um mehr als ein Fünftel gesunken. Demnach entstehen erhebliche Verluste bei der Wellenleitung infolge von Absorptions- und Streuprozessen. Bei der geringsten Anregungsdichte ist keine Lumineszenz mehr erkennbar.

Das unten in Abbildung 11a) abgebildete Spektrum der rechten Endfacette des Drahtes weist geringfügig höher intensive Peaks auf als bei der linken. Die Lage der Peaks entspricht ungefähr der

Emission des Drahtmittelpunktes. Auffällig ist allerdings das Spektrum bei der Anregungsdichte $86,98 \text{ kW/cm}^2$, da offenbar ein zusätzliches Maximum bei 730 nm auftritt, dessen Lage nicht eindeutig zugeordnet werden kann. Möglich wäre allerdings ein durch den Goldkeim geschaffener Defektzustand [3], welcher den Peak erklären könnte. Die geringste Anregungsdichte erzeugt wie zuvor auch kein Signal mehr.

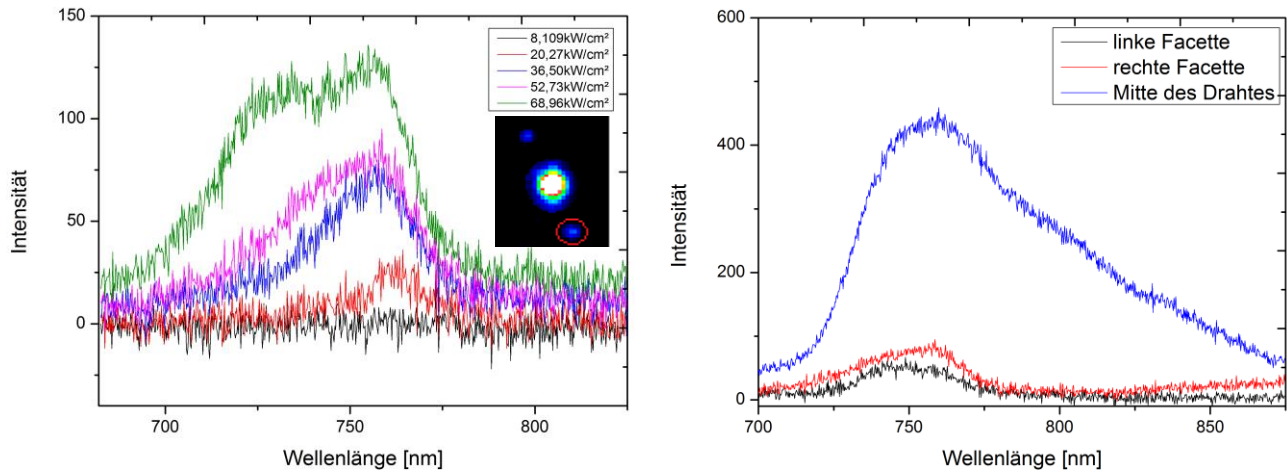


Abb. 11: a) Spektrum der rechten Endfacette b) Gegenüberstellung der Spektren aller Emissionspunkte bei $52,73 \text{ kW/cm}^2$.

Abbildung 11b) zeigt nochmals einen Vergleich der Spektren verschiedener Emissionspunkte bei einer Anregungsdichte von $52,73 \text{ kW/cm}^2$. Es wird der große Intensitätsunterschied deutlich. Zudem ist erkennbar, dass nur das Spektrum des mittleren Emissionspunktes eine stark abgeflachte niederenergetische Flanke aufweist.

Untersuchung bei Tieftemperatur

Die Nanodrahtstrukturen wurden mit flüssigem Stickstoff im Durchfluss-Kryostaten auf 79 K gekühlt um die Gitterschwingungen zu reduzieren, sodass die Streuprozesse geringer sind als bei Raumtemperatur und dementsprechend eine bessere Lichtausbreitung im Draht erfolgen kann. Das Monochromatorgitter ist auf die Bandlücke von GaAs bei dieser Temperatur eingestellt (823 nm). Alle anderen Versuchsparameter blieben konstant.

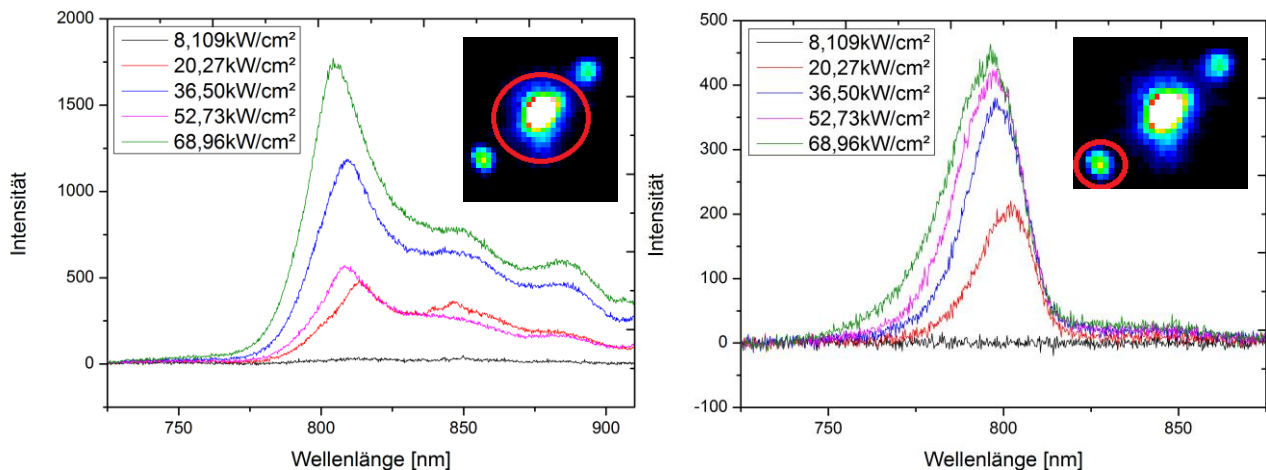


Abb.12: a) Photolumineszenzspektrum der mittleren Lumineszenz b) Spektrum der linken Endfacette.

Abbildung 12a) enthält die Spektren der mittleren Lumineszenz bei verschiedenen Anregungsdichten. Es fällt zunächst auf, dass die Intensität erwartungsgemäß fast viermal höher ist als bei Raumtemperatur. Der höchste Peak liegt nun bei ca. 808 nm und kann folglich nicht die Lumineszenz des GaAs sein, da dieses bei 79 K eine Bandlücke von ca. 823 nm aufweist. Es handelt sich erneut um den Peak des AlGaAs, das in diesem Nanodraht scheinbar eine andere Materialzusammensetzung hat, wodurch sich die Bandlücke ändert. Der bei Raumtemperatur beschriebene flache Abfall der rechten Flanke äußert sich bei den höheren Anregungsdichten nun in zwei kleinen Peaks bei 847 nm und bei 885 nm. Sie traten bei allen Drähten an verschiedenen Orten im Spektrum auf und wurden auch bei anderen Proben entdeckt. Es könnte sich um infolge von Defekten in der AlGaAs-Hülle erzeugte Lumineszenz handeln.

Das Spektrum der linken Facette des Drahtes (Abb. 13b)) weist nur den AlGaAs Peak bei einer kleineren Wellenlänge als am Auftreffpunkt auf. Das GaAs erzeugt also erneut keine Lumineszenz. Die Intensität ist ungefähr auf ein Viertel gesunken, was bedeutet, dass die Kühlung

der Probe zu einer um 20% effizienteren Wellenleitung im Vergleich zur Raumtemperaturmessung führte. Die Halbwertsbreite (FWHM) ist außerdem von 41 nm auf 24 nm gesunken (bei 68,96 kW/cm²).

Das Photolumineszenzspektrum der rechten Facette (Abb. 12a)) gleicht bei Anregungsdichten bis 36,5 kW/cm² dem der linken Facette was die Lage und Form angeht. Die Intensität des Peaks ist jedoch nur ein Fünftel der Anfangsintensität am Anregungspunkt. Außerdem tritt ein Sättigungsverhalten auf, da die Intensitätszunahme mit steigender Laserleistung geringer wird. Die beiden höchsten Peaks sind um 11 nm blauverschoben.

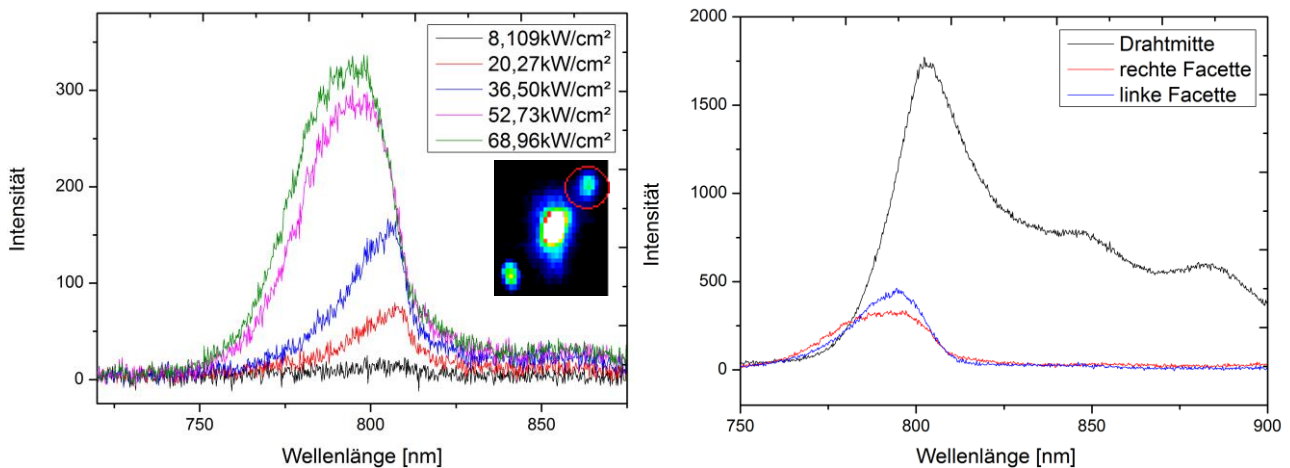


Abb.13: a) Spektrum der rechten Endfacette b) Vergleich der Spektren aller Emissionspunkte bei 68,96 kW/cm².

In Abbildung 13b) sind die Spektren der verschiedenen Emissionspunkte bei der höchsten Anregungsdichte eingezeichnet. Neben dem großen Intensitätsunterschied wird deutlich, dass die Peaks der Endfacetten bei höheren Energien liegen, aber keine kleineren Maxima im niederenergetischen Bereich aufweisen. Diese Emissionen bei hohen Wellenlängen sorgten wahrscheinlich für die Rotverschiebung der eigentlichen AlGaAs-Lumineszenz.

Messergebnisse der Probe M4581_2

Bei der zweiten Probe handelt es sich um zur Hälfte angeätzte Nanodrähte. Eine Hälfte besteht deshalb nur aus dem reinen GaAs-Kern und die andere aus der zuvor beschriebenen Drahtstruktur mit Ummantelung. Die Untersuchung gibt Aufschluss über den Einfluss der AlGaAs-Hülle, da bei der Betrachtung eines Drahtes beide Bereiche zugleich analysiert werden.

Analyse bei Raumtemperatur

Die Anregung der Nanodrähte erfolgt mit einer Anregungsdichte von $68,96 \text{ kW/cm}^2$ und das Monochromatorgitter ist auf 870 nm ausgerichtet.

Die Photolumineszenzdarstellung in Abbildung 14a) unterscheidet sich insofern von den bisherigen Aufnahmen, als dass keine eindeutigen drei Emissionspunkte mehr zu sehen sind. Der linke Teil des Drahtes leuchtet vollständig, da dort die Ätzung der AlGaAs-Ummantelung erfolgte und somit der aus dem Kern austretende Strahlungsanteil nicht von der Hülle absorbiert und nun detektiert werden kann. Die Intensität der Endfacette dieser Seite und des Mittelpunktes hebt sich dennoch von der dazwischenliegenden ab und es findet noch Wellenleitung statt. Von ungefähr 20 betrachteten Drähten war bei den meisten nur Lumineszenz an der Drahtmitte erkennbar.

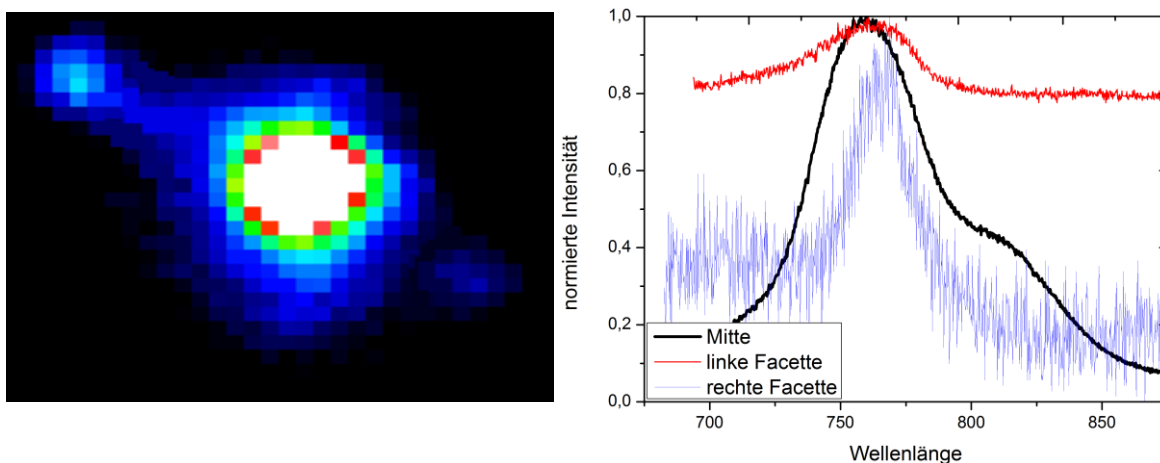


Abb.14: a) Lumineszenzdarstellung der zweiten Probe bei Raumtemperatur b) normierte Spektren aller drei Emissionspunkte.

Abbildung 14b) beinhaltet die Spektren der Emissionspunkte. Die Intensität der mittleren Lumineszenz ist im Vergleich zur linken Facette fünfmal und zur rechten vierzigmal größer. Daher sind die Spektren normiert, sodass die Lage der Peaks besser verglichen werden kann. Das Signal

des linken Punktes erscheint aufgrund der nicht vorhandenen Hülle heller als das des rechten. Die Wellenleitung ist im Vergleich zu den Nanodrähten der ersten Probe in Hinblick auf die an den Enden ausgekoppelte Intensität trotzdem deutlich schlechter.

Alle drei Maxima liegen bei 760 nm und entsprechen somit der der Bandlücke des AlGaAs. Trotz des Ätzschrittes ist kein GaAs zu erkennen. Das fehlende Auftreten der GaAs-Lumineszenz kann eventuell damit begründet werden, dass der Auftreffpunkt zu weit rechts liegt, sodass ein Großteil des Lasers von der Mantelstruktur absorbiert wird und kaum das GaAs trifft. Der auf die linke Seite auftreffende Anteil der Laserstrahlung kann zudem vermutlich aufgrund des Mangels an Ladungsträgern, welcher aus der Rekombination an Oberflächenzuständen resultiert (siehe hierzu Kapitel: "Funktionsweise der AlGaAs-Ummantelung"), keine nennenswerte Lumineszenz erzeugen.

Untersuchung bei Tieftemperatur

Anders als bei der Untersuchung bei Raumtemperatur tritt bei 79 K das soeben gezeigte charakteristische Emissionsverhalten der zweiten Probe bei nahezu allen Drähten auf, wobei nur wenige auch gleichzeitig Lumineszenz an der Endfacette mit der noch vorhandenen Ummantelung ausbilden. Das Verhalten eines solchen Drahtes wird im Folgenden erforscht.

Abbildung 15a) ist zu entnehmen, dass diesmal bei einer Wellenlänge von ungefähr 820 nm im Spektrum der Drahtmitte ein deutlicher Peak auftaucht, der dem GaAs trotz einer leichten Blauverschiebung zugeordnet werden kann und bei einem Intensitätsmaximum von 1200 counts eine mittlere Halbwertsbreite von 6nm hat. Der AlGaAs-Peak ist im Vergleich dazu zehnmal schwächer. Es wurde also großflächig ein Teil des GaAs mit dem Laser getroffen und es ist in der Lage eine detektierbare Lumineszenz zu erzeugen. Nun wird deutlich, dass die Mantelstruktur das Emissionsverhalten des GaAs in den bisherigen Fällen negativ beeinflusste.

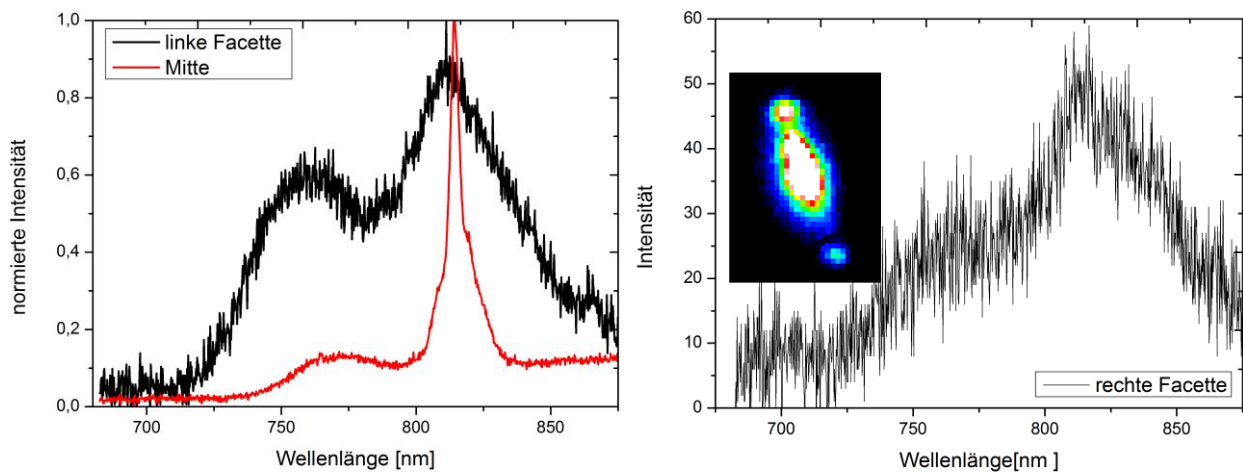


Abb.15: PL-Spektrum a) der linken Facette und der Mitte (normiert) b) der rechten Facette mit eingefügtem Lumineszenzbild.

Bei Betrachtung der Spektren der Endfacetten (siehe Abb. 15 a) und 15c)) ergibt sich für die linke Seite eine sechsmal und die rechte eine achtzehnmal geringere Intensität mit Peaks bei den gleichen Wellenlängen wie im Spektrum der Drahtmitte. Verglichen mit der ersten Probe bei 79 K sind diese ungefähr dreimal geringer.

Diskussion und Vergleich der Ergebnisse

Bei der optischen Charakterisierung mittels Photolumineszenzspektroskopie wurde zunächst deutlich, dass beide Proben Nanodrähte enthalten, die sowohl bei Raumtemperatur, als auch bei 79 K Wellenleitfähigkeit aufweisen, wobei dieser Effekt bei Raumtemperatur deutlich seltener und mit einer geringeren Intensität auftritt. Die Ursache dafür sind die erhöhten Verluste infolge von Streuungen an Phononen. Sie sind außerdem zusammen mit möglichen Gitterdefekten für die starke Intensitätsabnahme der Endfacettenlumineszenz im Vergleich zur Lumineszenz der Drahtmitte verantwortlich.

Trotz Wellenleitung enthielt die Probe M4581_1 allerdings keinen Nanodraht, bei dessen Untersuchung ein Lumineszenzpeak des Galliumarsenids im Spektrum zu sehen war. Folglich konnten auch keine Modulationen und damit kein Lasing beobachtet werden, da Galliumarsenid als aktives Lasermedium laut Messdaten kaum zur Lumineszenz angeregt wurde. Es traten ausschließlich Peaks der AlGaAs-Mantelfläche bei einer typischen Wellenlänge von ca. 760 nm

auf. Dieser Umstand gibt Grund zur Annahme, dass die Ummantelung den Kern von der Laserstrahlung abschirmt und somit die optischen Eigenschaften des Nanodrahts verschlechtert.

Nanodrähte der Probe M4581_2 lieferten für Raumtemperatur und für 79 K charakteristische Emissionsbilder, bei der eine Seite des Drahtes vollständig leuchtet. Es handelt sich bei dieser Seite um den angeätzten Teil des Drahtes. Die in diesem Teil austretende Strahlung war zuvor aufgrund der AlGaAs-Hülle nicht sichtbar und veranschaulicht die Verluste im Resonator durch ungewollte Auskopplung von Licht. Im Gegensatz zu den meisten Drähten bei Raumtemperatur zeigten die Strukturen bei 79 K Wellenleitung an beiden Endfacetten, wobei die Verluste im Vergleich zur ersten Proben etwas höher ausfielen. Im Spektrum der zweiten Probe bei 79 K ist nun ein deutlicher Peak zu erkennen, der dem GaAs zugeordnet werden kann. Dieses Ergebnis unterstützt die Vermutung, dass die Ummantelung zu dick ist einen Großteil der Laserstrahlung absorbiert.

Die in Kapitel 4.1 nachgewiesene geringe Leitfähigkeit der Drähte lässt außerdem auf eine Aluminiumoxidschicht an der AlGaAs-Hülle schließen. Demnach oxidierte das Aluminium der Nanodrähte trotz GaAs-Passivierungsschicht im Laufe der sechsmonatigen Lagerungszeit. Zusätzlich zur Absorption in der AlGaAs-Hülle sorgt die Oxidschicht für eine starke Streuung des Laserlichtes. EDX-Analysen lieferten einen Aluminiumoxidanteil von 10% und bestätigen somit diese Vermutung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand dieser Projektarbeit war die optische und elektrische Untersuchung von intrinsischen GaAs-Nanodrähten, insbesondere in Hinblick auf eine potentielle Laseranwendung. Des Weiteren wurde der Einfluss einer AlGaAs-Mantelstruktur auf die Problematik der Oberflächenzustände der GaAs-Nanodrähte analysiert. Die optische Charakterisierung erfolgte am Photolumineszenzmessplatz, woraus wellenlängenabhängige Intensitätsverteilungen der Emission resultierten. Der DC-Messplatz lieferte Strom-Spannungs-Kennlinien von den zuvor kontaktierten Nanodrähten. Zusätzlich ermöglichten es REM- und EDX-Aufnahmen Aussagen über die Struktur und Beschaffenheit zu machen.

Durch die Photolumineszenzspektroskopie konnte festgestellt werden, dass die im Rahmen dieser Projektarbeit betrachteten Drahtstrukturen in der Lage sind mithilfe der in Kapitel 2.4 beschriebenen Vorgänge elektromagnetische Wellen wie in einem Resonator zu leiten. Die Signalintensität der drei auftretenden Emissionspunkte war jedoch im Vergleich zu ähnlichen Nanodrahtproben aus anderen Arbeiten (siehe [3]) sehr gering. Zudem zeigte kein Nanodraht der

Probe M4581_1 trotz Wellenleitung eine Lumineszenz, die dem Galliumarsenid in der Kernstruktur zugeordnet werden kann. Erst bei partieller Entfernung der Mantelstruktur wurde ein Signal des GaAs detektierbar, woraus sich schlussfolgern lässt, dass die Ummantelung bei dieser Probe mit einem negativen Einfluss auf die optischen Eigenschaften der Drähte hatte. Die Laserstrahlung wird zu einem zu stark absorbiert, als dass sie eine Lumineszenz des aktiven Mediums hervorrufen könnte. Eine weitere Erklärung lieferte die elektrische Charakterisierung. Hierbei wurde eine nahezu nicht vorhandene Leitfähigkeit nachgewiesen. Daraus folgt, dass die Passivierungsschicht aus GaAs die Oxidation des Aluminiums aus der AlGaAs-Mantelstruktur nicht verhindern konnte. Es entstand an der Drahtoberfläche im Laufe der Zeit Aluminiumoxid, das auch in einer EDX-Analyse nachgewiesen werden konnte. Es verhält sich wie ein Isolator und verhindert jegliche Ladungsträrgbewegung. Zudem sorgt es für eine starke Streuung des Laserlichts.

Anhand der in dieser Projektarbeit gewonnenen Erkenntnisse lassen sich mehrere Maßnahmen zur Optimierung der Nanodrahteigenschaften ergreifen.

Eine Verwendung von unterschiedlich dotiertem GaAs und AlGaAs würde beispielsweise zu einem pn-Übergang führen. Hieraus resultiert eine stärkere Banddiskontinuität und somit ein besseres Ladungsträger Confinement. Des Weiteren kann eine höhere Selektivität bei Ätzprozess erreicht werden und die Ohm'schen Kontakte für das elektrische Pumpen zeigen ein besseres Verhalten.

Ein weiterer wichtiger Punkt in Hinblick auf die Optimierung ist die Dicke der AlGaAs-Hülle. 200 nm erwiesen sich als zu dick und sollten deutlich eingeschränkt werden, um eine Anregung des Resonatormaterials gewährleisten zu können.

Zudem wurde deutlich, dass eine 3 nm GaAs-Passivierungsschicht bei einer Lagerungszeit von sechs Monaten nicht ausreichend ist. Eine erhöhte Schichtdicke könnte allerdings zu einer Beeinträchtigung der Drahteigenschaften führen, weshalb mit anderen Materialien experimentiert werden sollte.

Zuletzt soll noch angemerkt werden, dass der Aufbau des Photolumineszenzmessplatzes in seiner jetzigen Form zu keinen hinreichend guten Ergebnissen führt. Nur ein sehr geringer Anteil der an der Probe erzeugten Lumineszenz wird auch tatsächlich wieder von der Mikroskopobjektivlinse wieder eingefangen und in den CCD-Detektor geleitet, sodass nicht alle erzeugten Wellenlängen detektiert werden können. Seitliches Anschneiden der Probe unter einem Winkel von ungefähr 45° würde ein besseres Signal liefern.

6 Literaturverzeichnis

11

12 "Nanotechnologie 2" Skript, Prof. Dr. rer. Nat. Gerd Bacher (2013)

13 "Epitaxial Growth and Design of Nanowire and Complex Nanostructures", K. Dick, Doctorial Thesis, Solid State Physics, Lund University, (2007).

14 "A Systematic Study on the Growth of GaAs Nanowires by Metal–Organic Chemical Vapor Deposition", Cesare Soci ,Xin-Yu Bao , David P. R. Aplin and Deli Wang (2008)

15 "Technologie der III/V-Halbleiter", Werner Prost (1997)

16 "Physics of Semiconductor Devices ", Simon M. Sze (1981)

17 “Optische Eigenschaften von Festkörpern“, Mark Fox, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, (2012).

18 J. Franck und G. Hertz: Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben. In: Verh. Dtsch. Phys. Ges.. Nr. 16, 1914, S. 457–467.

19 Erwin Schrödinger: Die Wellenmechanik. Battenberg, Stuttgart, 1963

20 Vorlesungsskript "Festkörperelektronik", Prof. Dr. Tegude

21 "Laser : Bauformen, Strahlführung, Anwendungen", Jürgen Eichler & Hans-Joachim Eichler, Springer, 7, 2010

22 "Laser", Fritz Kurt Kneubühl & Markus Werner Sigrist, Vieweg und Teubner, 7, 2008

23 techniklexikon.net

24 "Mikroresonatoren aus Glas und Polymeren als optische Flüstergalerien", Mario Hauser

25 "Stabilizing Lasers using Whispering Gallery Mode Resonators", Benjamin Sprenger

26 Bild entnommen aus "Eigenschaften und Anwendungen von Stählen, Band 2: Stahlkunde", Winfried Dahl (1993)

(X) Eintrag zu CAS-Nr. 67-64-1 in der GESTIS-Stoffdatenbank des IFA

(X) Eintrag zu 2-Propanol in der GESTIS-Stoffdatenbank des IFA

¹ "Brockhaus ABC Chemie", VEB F. A. Brockhaus Verlag Leipzig (1965)

² "Elektronegativität (Tabellarische Übersicht)", uniterra.de (2012)

³ "Einführung in die Werkstoffe der Elektrotechnik", Gerd Bacher (2011)

⁴ Grafik entnommen von Wikimedia Commons

⁵ Grafik entnommen von ioffe.ru: Band structure and carrier concentration of Gallium Arsenide

⁶ "Dissertationsreihe der Fakultät für Physik der Universität Regensburg, Band 17", Robert Schulz (2010)

⁷ "Semiconducting and other major properties of gallium arsenide", J. S. Blakemore, J. Appl. Phys., 53, R123, (1982)

⁸ refractiveindex.info

⁹ "Surface States and Rectification at a Metal Semi-Conductor Contact", J. Bardeen, Phys. Review, 71, (1947).

¹⁰ "Einführung in die Materialwissenschaft II" Skript, Helmut Föll (2013)

¹¹ "Properties of aluminium gallium arsenide", Sadao Adachi, Institution of Electrical Engineers, London, 7, 1993

¹² S. Adachi, J. Appl. Phys., 58, no.3, pp.R1-R29 (1985).

¹³ "Lichtemission aus Galliumarsenid Nanodrähten für Laseranwendungen", Thorsten Wierzkowski, 2013

¹⁴ "Structural and Optical Properties of GaAs/AlGaAs Core/Shell Nanowires with and without Quantum Well Shells", Hannah J. Joyce*, Y. Kim, Q. Gao, H. H. Tan, C. Jagadish (2006)