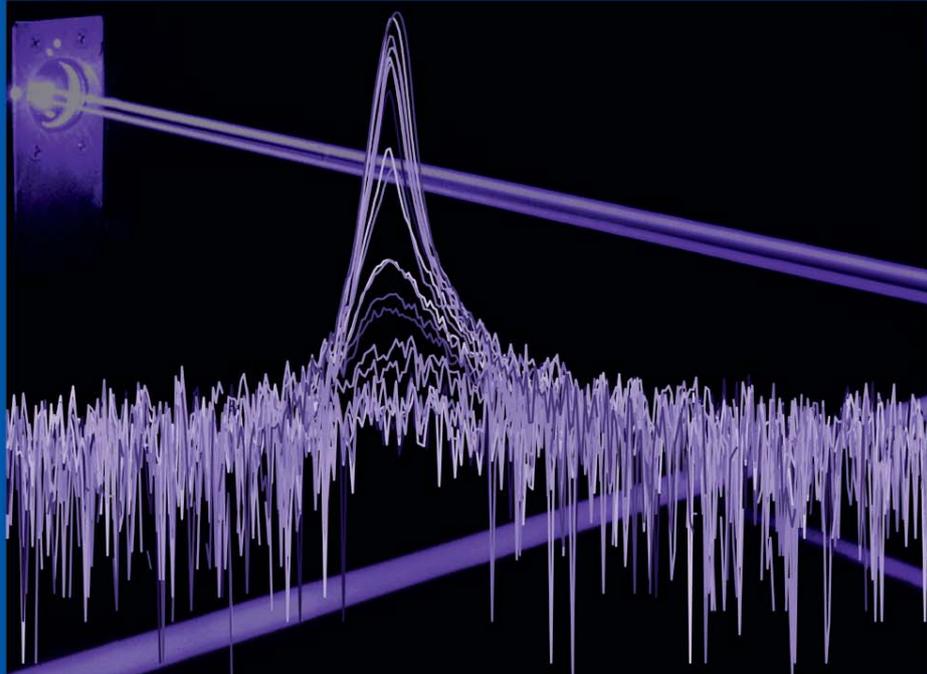


Forschungsberichte aus dem  
Ferdinand-Braun-Institut,  
Leibniz-Institut  
für Höchstfrequenztechnik

## Entwicklung von optisch pumpbaren UVC-Lasern auf AlGaIn-Basis









aus der Reihe:

## **Innovationen mit Mikrowellen und Licht**

**Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut,  
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik**

Band 47

Jörg Jeschke

Entwicklung von optisch pumpbaren UVC-Lasern auf AlGaN-Basis

**Herausgeber: Prof. Dr. Günther Tränkle, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich**

Ferdinand-Braun-Institut  
Leibniz-Institut  
für Höchstfrequenztechnik (FBH)  
Gustav-Kirchhoff-Straße 4  
12489 Berlin

Tel. +49.30.6392-2600  
Fax +49.30.6392-2602

E-Mail [fbh@fbh-berlin.de](mailto:fbh@fbh-berlin.de)  
Web [www.fbh-berlin.de](http://www.fbh-berlin.de)



## Innovationen mit Mikrowellen und Licht

Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut,  
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

### Vorwort der Herausgeber

Neue Ideen, Entwicklungen und Konzepte aus der Forschung sind die Basis von Fortschritt und Wettbewerbsfähigkeit. Als Inventionen erweitern sie den Stand des Wissens und der Technik, als innovative Produkte und Dienstleistungen schließlich findet ein Teil von ihnen Eingang in unsere Alltagswelt.

In diesem Sinne dokumentiert die Reihe „Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik“ aktuelle Forschungen und Entwicklungen aus dem Institut. Wir möchten Ihnen diese Ergebnisse zugänglich machen und zur weiteren Diskussion anregen – nicht zuletzt, damit möglichst viele Entwicklungen zu einem Teil unseres Alltags werden.

Die vorliegende Arbeit präsentiert theoretische und experimentelle Ergebnisse zu Halbleiterlasern aus Aluminiumgalliumnitrid, die im UVC-Bereich emittieren. Ziel der umfassenden Untersuchungen war es, die relevanten physikalischen Parameter zu identifizieren, die zu einer effektiven Reduzierung der Laserschwellen unter optischer Anregung führen. Es wurden die Auswirkungen von Siliziumdotierung auf die Bauelementeigenschaften untersucht, wobei auch die Quelle ungewollter Si-Dotierung identifiziert wurde. Durch Optimierung der Laserstrukturen, insbesondere durch Reduktion von nichtstrahlender Rekombination an Grenzflächen, konnten die Laserschwellen von mehr als 10 MW/cm<sup>2</sup> auf weniger als 700 kW/cm<sup>2</sup> gesenkt werden. Dies ist ein weiterer Schritt auf dem Weg zur Realisierung elektrisch gepumpter UVC-Laserdioden.

Eine anregende Lektüre wünschen

Prof. Dr. Günther Tränkle  
Direktor

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich  
stellvertretender Direktor

### Das Ferdinand-Braun-Institut

Das Ferdinand-Braun-Institut erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern. Diese sind Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsweldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das Institut vom sichtbaren bis zum ultravioletten Spektralbereich. Die Anwendungsfelder reichen von der Medizintechnik, Präzisionsmesstechnik und Sensorik bis hin zur optischen Satellitenkommunikation. In der Mikrowellentechnik realisiert das FBH hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen, unter anderem für energieeffiziente Mobilfunksysteme und Komponenten zur Erhöhung der Kfz-Fahrsicherheit. Kompakte atmosphärische Mikrowellenplasmaquellen mit Niederspannungsversorgung entwickelt es für medizinische Anwendungen, etwa zur Behandlung von Hauterkrankungen.

Das FBH ist ein international anerkanntes Zentrum für III/V-Verbindungshalbleiter mit allen Kompetenzen: vom Entwurf, über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung von Bauelementen.

Seine Forschungsergebnisse setzt das FBH in enger Zusammenarbeit mit der Industrie um und transferiert innovative Produktideen und Technologien erfolgreich durch Spin-offs. In strategischen Partnerschaften mit der Industrie sichert es in der Höchstfrequenztechnik die technologische Kompetenz Deutschlands.



# Entwicklung von optisch pumpbaren UVC-Lasern auf AlGaIn-Basis

vorgelegt von  
Master of Science

**Jörg Jeschke**

geb. in Kühlungsborn

Von der Fakultät II - Mathematik und Naturwissenschaften  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften  
Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Michael Lehmann  
Gutachter: Prof. Dr. Michael Kneissl  
Gutachter: Prof. Dr. Ulrich T. Schwarz  
Gutachter: Prof. Dr. Markus Weyers

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18. Juni 2018

Berlin 2018



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten  
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2018

Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2018

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2018  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung  
des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile  
daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie)  
zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2018

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier  
aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9918-3

eISBN 978-3-7369-8918-4

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Einfluss verschiedener Aspekte des epitaktischen Wachstums und des Heterostrukturdesigns auf optisch gepumpte AlGaIn-Laser mit Emissionswellenlängen im Bereich von 240 nm untersucht. Dabei wurden neue Erkenntnisse über elektrische und optische Verlustmechanismen gewonnen, die über den konkreten Anwendungsfall hinaus für AlGaIn-Heterostrukturen relevant sind. Außerdem wurde eine Verringerung der Laserschwellen von mehr als 10 MW/cm<sup>2</sup> auf weniger als 700 kW/cm<sup>2</sup> erreicht.

In Studien zum Einfluss der Temperatur, des Drucks und des V/III-Verhältnisses auf das Wachstum von Al<sub>0,7</sub>Ga<sub>0,3</sub>N-Schichten wurde gezeigt, dass sich Silizium aus den SiC-Beschichtungen des MOVPE-Reaktors in die nominell undotierten Schichten einbaut und dass dies durch die Wahl geeigneter Wachstumsbedingungen oder durch die Verwendung von TaC-Beschichtungen deutlich verringert werden kann. Auch eine Erhöhung der Photolumineszenzintensität durch die Si-Dotierung war zu beobachten.

Laserstrukturen wurden auf epitaktisch lateral überwachsenen (ELO) AlN/Saphir-Templates gewachsen. In Abhängigkeit vom Substratfehlschnitt kommt es durch die Strukturierung der Templates auf der Probenoberfläche entweder zu ausgeprägten Stufen von bis zu 15 nm Höhe oder nur zu einer leichten Welligkeit. An den Makrostufen sammelt sich während des Wachstums Gallium an, sodass sich eine inhomogene Emissionswellenlänge in den Quantenfilmen (Quantum Wells, QWs) ergibt. Außerdem können die Stufen in den Lasern als Streuzentren wirken und die optischen Verluste erhöhen. Andererseits führen sie aber auch zum Abknicken von Versetzungen und damit zu einer insgesamt reduzierten Versetzungsdichte, was sich positiv auf die Ladungsträgerrekombination auswirkt. Die Daten deuten außerdem darauf hin, dass die Versetzungen auch als optische Streuzentren wirken. Es wird gezeigt, dass der resultierende Einfluss auf die Laserschwellen unvorhersehbar sowohl positiv als auch negativ sein kann und daher eine Abkehr von derart strukturierten ELO-AlN/Saphir-Templates empfehlenswert scheint.

Die Untersuchung des Einflusses von QW-Dicke und -anzahl ergab, dass die Trennung der Ladungsträgerwellenfunktionen durch den Quantum Confined Stark Effect (QCSE) nur bei geringen Ladungsträgerdichten zu einer verringerten Emissionsrate führt. Im Laserbetrieb hingegen werden die Polarisationsfelder ausreichend abgeschirmt. Simulationen deuten allerdings darauf hin, dass die nichtstrahlende Rekombination an Grenzflächen eine entscheidende Rolle spielt, da die Laserschwelle mit abnehmender QW-Anzahl sank.

Aufgrund der an AlGaIn-Schichten gewonnenen Erkenntnisse wurden in Laserstrukturen die QWs, die Barrieren oder die gesamte Heterostruktur mit Siliziumkonzentrationen zwischen  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  und  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dotiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Abnahme der Gruppe-III-Vakanzen für Siliziumkonzentrationen bis  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  gefolgt von ihrer anschließenden Zunahme sich direkt auf die Laserschwellen auswirkt. Bei einer Siliziumkonzentration von  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  zeigte sich dessen Wirkung als Antisurfactant deutlich und es kam zu einem stark verzögerten, verringerten Galliumeinbau und dadurch zu inhomogenen QWs mit blauverschobener Emission.

Die gefundenen Ergebnisse sind zu großen Teilen auf andere AlGaIn-Bauelemente übertragbar. Die Identifikation des SiC im Reaktor als Quelle für die Siliziumkontamination ist darüber hinaus auch für die MOVPE anderer Materialsysteme bei hohen Temperaturen relevant.



## Abstract

This work discusses the influence of growth parameters and heterostructure design on optically pumped AlGaIn-lasers emitting around 240 nm. Important electrical and optical loss mechanisms are identified, which are relevant for AlGaIn heterostructures beyond the specific samples analyzed here. Additionally, the laser threshold power densities were successfully reduced by more than an order of magnitude from over 10 MW/cm<sup>2</sup> to less than 700 kW/cm<sup>2</sup>.

Studies of the influence of temperature, pressure, and V/III ratio on the growth of nominally undoped Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N layers show that silicon from SiC reactor coatings is incorporated in the layers leading to an unintentional doping. The incorporation can be reduced either by choosing appropriate growth conditions or by replacing the SiC coatings with TaC. However, the Si doping also increased the photoluminescence intensity of the AlGaIn layers, which is discussed more deeply in a later part of this thesis.

Laser samples have been grown on epitaxially laterally overgrown (ELO) AlN/sapphire templates. Depending on the substrate offset the patterned template induces either pronounced macrosteps on the sample surface with a height of up to 15 nm or just slight height undulations. Gallium accumulates at the macrosteps, leading to an inhomogeneous quantum well emission wavelength. Additionally, the steps act as scattering centers in the lasers increasing optical losses. On the other hand, they induce a tilt of the threading dislocations improving their mutual annihilation. Also, the data indicate that threading dislocations themselves can act as optical scattering centers. It is shown that the resulting influence of the offset on the laser thresholds is unpredictable and can be positive as well as negative. From this perspective, replacement of the ELO templates should be considered.

Analyses of the influence of quantum well thickness and number reveal that the separation of the charge carrier wave functions due to the Quantum Confined Stark Effect (QCSE) only reduces the radiative emission rate for low carrier densities, while during lasing, the polarisation fields are screened sufficiently. In contrast, the laser thresholds are reduced with decreasing quantum well number, which is attributed to nonradiative recombination at heterointerfaces in accordance with simulations.

The observed influence of silicon on the photoluminescence intensity was taken as a starting point to analyze doped laser structures. By doping either quantum wells, barriers or the whole heterostructure with silicon concentrations between  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  and  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , it is shown that the reduction of group III vacancies up to a silicon concentration of  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  followed by its subsequent increase are directly reflected by the laser thresholds. Furthermore, at a concentration of  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , silicon acts as an antisurfactant during growth, reducing and delaying the gallium incorporation and thus causing inhomogeneous quantum wells with a strongly blue-shifted emission wavelength. No lasing was observed due to this deterioration of the material quality.

Many of the presented results can be applied to other AlGaIn based devices. The identification of the SiC in the reactor as a significant source for silicon contamination is also relevant for the epitaxy of other material systems which require high growth temperatures.



## Eigene Veröffentlichungen

Teile dieser Arbeit wurden bereits vorab in folgenden Beiträgen veröffentlicht:

### Publikationen:

- J. Jeschke, M. Martens, A. Knauer, V. Kueller, U. Zeimer, C. Netzel, C. Kuhn, F. Krueger, C. Reich, T. Wernicke, M. Kneissl and M. Weyers. UV-C Lasing From AlGa<sub>N</sub> Multiple Quantum Wells on Different Types of AlN/Sapphire Templates. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 27(18):1969–1972, September 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2015.2448127>.
- J. Jeschke, A. Knauer, and M. Weyers. Si impurity concentration in nominally undoped Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N grown in a planetary MOVPE reactor. *J. Cryst. Growth*, 483:297–300, February 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2017.12.025>.
- J. Jeschke, M. Martens, S. Hagedorn, A. Knauer, A. Mogilatenko, H. Wenzel, U. Zeimer, J. Enslin, T. Wernicke, M. Kneissl, and M. Weyers. Influence of template properties and quantum well number on stimulated emission from Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N/Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>N quantum wells. *Semicond. Sci. Technol.*, 33(3):035015, 2018. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6641/aaab79>.
- Anna Mogilatenko, Viola Küller, Arne Knauer, J. Jeschke, Ute Zeimer, Markus Weyers, and Günther Tränkle. Defect analysis in AlGa<sub>N</sub> layers on AlN templates obtained by epitaxial lateral overgrowth. *J. Cryst. Growth*, 402:222–229, September 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.06.025>.
- U. Zeimer, J. Jeschke, A. Mogilatenko, A. Knauer, V. Kueller, V. Hoffmann, Christian Kuhn, T. Simoneit, M. Martens, T. Wernicke, M. Kneissl, and M. Weyers. Spatial inhomogeneities in Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N quantum wells induced by the surface morphology of AlN/sapphire templates. *Semicond. Sci. Technol.*, 30(11):114008, 2015. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/30/11/114008>.
- A. Lobanova, E. Yakovlev, J. Jeschke, A. Knauer, and M. Weyers. Kinetics of AlGa<sub>N</sub> metal-organic vapor phase epitaxy for deep-UV applications. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55(5S):05FD07, April 2016. <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.55.05FD07>.
- C. Netzel, J. Jeschke, F. Brunner, A. Knauer, and M. Weyers. Temperature and doping dependent changes in surface recombination during UV illumination of (Al)Ga<sub>N</sub> bulk layers. *J. Appl. Phys.*, 120(9):095307, September 2016. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4962319>.
- C. Netzel, J. Jeschke, A. Knauer, and M. Weyers. Avoidance of instable photoluminescence intensity from AlGa<sub>N</sub> bulk layers. *Physica Status Solidi B*, 254(8):1521–3951, August 2017. <http://dx.doi.org/10.1002/pssb.201600672>.

## Tagungsbeiträge:

- J. Jeschke, V. Hoffmann, A. Knauer, V. Kueller, U. Zeimer, A. Mogilatenko und M. Weyers. Einfluss der Oberflächenmorphologie von AlN/Saphir-Templates auf strukturelle und optische Eigenschaften von AlGaN/AlGaIn Quantenfilmen für den UVC-Bereich. Vortrag. 28. Workshop der DGKK „Epitaxie von III/V Halbleitern“. Illmenau, Deutschland, 2013.
- J. Jeschke, A. Knauer, V. Kueller, and M. Weyers. The Influence of T, p and V/III Ratio on Morphology and Growth Rate of MOVPE AlGaIn/AlN MQWs for Deep UV Light Emitters. Poster TUGP32. International Workshop on Nitride Semiconductors. Wroclaw, Poland, 2014.
- J. Jeschke, C. Netzel, A. Knauer, A. Lobanova, E. Yakovlev, D. Henning, C. Reich, and M. Weyers. The influence of growth T, p, and V/III ratio on morphology and emission characteristics of MOVPE grown Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N layers. Poster TUGP46. 11th International Conference on Nitride Semiconductors. Beijing, China, 2015.
- J. Jeschke, M. Martens, T. Wernicke, C. Kuhn, C. Reich, F. Mehnke, J. Rass, J. Enslin, M. Lapeyrade, U. Zeimer, A. Mogilatenko, S. Einfeldt, V. Kueller, S. Hagedorn, A. Knauer, C. Hartmann, J. Wollweber, M. Bickermann, M. Weyers, and M. Kneissl. AlGaIn-based deep UV lasers. Eingeladener Vortrag. Nanophotonic Symposium. Berlin, Deutschland, 2015.
- J. Jeschke, M. Martens, S. Hagedorn, A. Knauer, A. Mogilatenko, H. Wenzel, U. Zeimer, T. Wernicke, M. Kneissl, and M. Weyers. Influence of template properties and quantum well thickness on stimulated emission from Al<sub>0.7</sub>GaIn/Al<sub>0.8</sub>GaIn quantum wells. Vortrag. 18th International Conference on MOVPE. San Diego, USA, 2016.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung &amp; Motivation</b>	<b>1</b>
<b>1. Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1. AlGa <sub>N</sub> -Halbleiter . . . . .	3
1.1.1. Kristall- und Bandstruktur . . . . .	3
1.1.2. Polarisierung . . . . .	5
1.2. Laser . . . . .	7
1.2.1. Ladungsträgerdynamik . . . . .	7
1.2.2. Optische Moden . . . . .	12
1.2.3. Laserbedingungen . . . . .	14
<b>2. MOVPE-Wachstum und Charakterisierungsmethoden</b>	<b>17</b>
2.1. Probenpräparation . . . . .	17
2.1.1. MOVPE-Reaktor . . . . .	17
2.1.2. AlN/Saphir-Templates . . . . .	21
2.1.3. Prozessstabilität . . . . .	22
2.1.4. Si-Dotierung . . . . .	25
2.1.5. Prozessierung von optisch pumpbaren Laserstrukturen . . . . .	26
2.2. Charakterisierungsmethoden . . . . .	26
2.2.1. Röntgendiffraktometrie . . . . .	26
2.2.2. Rasterelektronenmikroskopie und Kathodolumineszenz . . . . .	28
2.2.3. Sekundärionenmassenspektrometrie . . . . .	30
2.2.4. Photolumineszenz . . . . .	31
2.2.5. Optisches Pumpen . . . . .	33
<b>3. Wachstumsstudien an Al<sub>0,7</sub>Ga<sub>0,3</sub>N-Schichten</b>	<b>37</b>
3.1. Wachstumsraten, Gasphasenreaktionen und Reaktionseffizienz . . . . .	38
3.2. Der Siliziumhintergrund in undotiertem Al <sub>0,7</sub> Ga <sub>0,3</sub> N . . . . .	44
3.3. Einfluss auf Photolumineszenzeigenschaften . . . . .	51
3.4. Fazit . . . . .	56
<b>4. Auswirkungen von Morphologie und Design auf die Lasereigenschaften</b>	<b>59</b>
4.1. Ausgangslage . . . . .	59
4.2. Einfluss des Substrat-Fehlschnitts . . . . .	69
4.3. Variation der Quantenfilmanzahl und -dicke . . . . .	74
4.4. Fazit . . . . .	83



<b>5. Einfluss von Siliziumdotierung auf Quanteneffizienz und Laserschwelle</b>	<b>85</b>
5.1. Einfluss der Dotierhöhe . . . . .	86
5.1.1. Quantenfilmdotierung . . . . .	86
5.1.2. Barrierendotierung . . . . .	88
5.1.3. Dotierung aller Schichten . . . . .	90
5.2. Dotierung verschiedener Schichten . . . . .	93
5.3. Fazit . . . . .	96
<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>99</b>
<b>A. Herleitungen, Proben und Parameter</b>	<b>103</b>
A.1. Herleitungen und Erläuterungen . . . . .	104
A.2. Probandaten . . . . .	112
A.2.1. AlGaIn-Schichten für Wachstumsstudien . . . . .	112
A.2.2. Laserproben . . . . .	114
A.3. Konstanten und Materialparameter . . . . .	117
<b>B. Verzeichnisse</b>	<b>119</b>
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	120
Tabellenverzeichnis . . . . .	123
Abbildungsverzeichnis . . . . .	124
Literaturverzeichnis . . . . .	128
<b>Danksagung</b>	<b>153</b>



# Einleitung & Motivation

Laser haben seit der ersten Demonstration im Jahr 1960 ihren Weg in vielfältige Anwendungen gefunden und sind in fast allen Wellenlängenbereichen kommerziell verfügbar. Das tiefe UV mit Wellenlängen  $< 280$  nm gehört zu den wenigen Bereichen, für die Laserlichtquellen bisher nur sehr begrenzt zur Verfügung stehen. Gleichzeitig gibt es eine Vielzahl potentieller Anwendungen, z.B. in der Medizin (Fluoreszenzmikroskopie, Atemgasanalyse), in der Datenspeicherung (CD, DVD, Blu-Ray, ...), in der Materialanalyse und Gefahrstoffidentifikation (Ramanspektroskopie) oder auch in der Wasser- und Oberflächendesinfektion. Bei den vorhandenen UV-Strahlquellen handelt es sich in der Regel um Excimerlaser oder frequenzvervielfachte Laser, die nativ wesentlich langwelliger emittieren. Sie alle zeichnen sich durch einen komplexen Aufbau, hohe Anschaffungs- und Wartungskosten, geringe Effizienz, fixe Wellenlängen oder eine beliebige Kombination dieser Eigenschaften aus. Halbleiterlaser hingegen haben aufgrund der frei wählbaren Wellenlänge, der geringen Stückkosten, langen Lebensdauern und der extrem hohen erreichbaren Effizienzen von bis zu 70 % [1] im blauen bis infraroten Spektralbereich ihre Überlegenheit über viele andere Lasersysteme gezeigt. Die Entwicklung blauer Laserdioden auf Basis von Galliumnitrid (GaN) wurde erst Anfang der 1990er durch die Arbeiten von Nakamura, Amano und Akasaki möglich, die erstmals erfolgreich die p-Leitfähigkeit mit Magnesium realisierten [2–5]. Dies eröffnete auch die Möglichkeit zur Realisierung direkt ultraviolett emittierender Laserdioden, da die Bandlücke von Aluminiumgalliumnitrid (AlGaIn) den gesamten UV-Bereich von 200–364 nm abdeckt. Unglücklicherweise ist die p-Dotierung trotz weitreichender wissenschaftlicher Fortschritte immer noch eine Herausforderung. Sie wird mit abnehmender Wellenlänge schwieriger, da die Aktivierungsenergie des Mg-Akzeptors mit dem Aluminiumgehalt kontinuierlich von ca. 150 meV auf ca. 500 meV zunimmt, sodass eine thermische Aktivierung der Löcher bei Raumtemperatur ( $E_{\text{therm}} = 26$  meV) kaum möglich ist.

Hinzu kommt für Wellenlängen unterhalb von ca. 330 nm der Mangel an passenden Substraten. Ungefähr bis zu dieser Wellenlänge kann auf GaN-Substraten gewachsen werden, für höhere Aluminiumgehalte wird der Unterschied in den Gitterkonstanten und damit die Verspannung in den Heterostrukturen aber zu groß, sodass es zur Bildung von Defekten und Rissen kommt. Für den UVC-Bereich wären AlN-Substrate gut geeignet, deren Verfügbarkeit ist allerdings bisher stark limitiert und mit hohen Kosten verbunden, da die Kristalle nicht wie z.B. Silizium aus der Schmelze gezogen werden können, sondern auf wesentlich aufwendigere Wachstumsverfahren (z.B. Physical Vapor Transport) angewiesen sind. Das Wachstum auf Fremdsubstraten wie Siliziumkarbid oder Saphir stellt eine häufig genutzte Alternative dar, führt aber zu hohen Versetzungsdichten im Bereich von  $10^9$  cm<sup>-2</sup> oder mehr, die die Effizienz optoelektronischer Bauelemente reduzieren.



Die kürzeste Emissionswellenlänge, die mit einer AlGaIn-Laserdiode bei Raumtemperatur bisher erreicht wurde, liegt bei 336 nm und wurde im Jahr 2008 von Yoshida et al. demonstriert [6]. Seitdem sind zwar LEDs im gesamten Wellenlängenbereich bis 230 nm realisiert worden, die für Lasing notwendigen Stromdichten und Effizienzen wurden aber nicht erreicht. Dies wirft die Frage auf, ob konventionelle Laserdioden auf AlGaIn-Basis im UVC-Bereich überhaupt realisierbar sind. In der Forschung werden vermehrt alternative Ansätze untersucht, die vom Ersetzen klassischer Metallkontakte durch Graphen [7] über die Lochinjektion mittels Tunnelioden [8] und die Frequenzverdopplung blauer Laser [9] bis hin zur Ladungsträgerinjektion mittels Elektronenstrahlpumpen [10] reichen.

Lasing basiert auf stimulierter Emission monochromatischer Strahlung und findet bei deutlich höheren Ladungsträgerdichten statt als der Betrieb einer LED oder auch viele Analysemethoden wie zum Beispiel Photolumineszenzmessungen. Daraus folgt, dass die Optimierung einer Laserstruktur anhand ihrer spontanen Emission häufig nicht zielführend ist. Es ist deutlich einfacher, eine funktionierende Laserstruktur zu optimieren, als einen Laser überhaupt zu realisieren. Dieser Angriffspunkt wird in der vorliegenden Arbeit genutzt, denn unter optischer Anregung ist im UVC-Bereich bereits mehrfach Lasing von AlGaIn-Strukturen gezeigt worden [11–13]. Umfangreichere Analysen der Eigenschaften dieser optisch gepumpten Laser wurden allerdings noch nicht veröffentlicht. Hier bietet sich jedoch die Gelegenheit, die limitierenden physikalischen Effekte in diesen Lasern zu identifizieren, sie zu verbessern und so die Laserschwelle zu senken, sodass eventuell auch elektrisch gepumptes Lasing einfacher realisierbar wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher untersucht, wie sich verschiedene Parameter auf die Eigenschaften von AlGaIn-Lasern mit Emissionswellenlängen im Bereich von 240–250 nm auswirken. Die Untersuchungen beschränken sich auf Kantenemitter-Laser mit Quantenfilmen als aktiver Zone, da diese vergleichsweise einfach zu realisieren sind.

In den ersten beiden Kapiteln wird zunächst eine kurze Einführung in die theoretischen Grundlagen sowie die experimentellen Methoden zur Herstellung und Charakterisierung der Proben gegeben. Kapitel 3 untersucht den Einfluss von Temperatur, Druck und V/III-Verhältnis während des MOVPE-Wachstums von AlGaIn-Schichten auf den Wachstumsprozess selbst, die Fremdatomkonzentrationen und die Photolumineszenzeigenschaften der Schichten. Ziel ist es, das Verständnis davon, inwiefern die Wachstumsbedingungen die Materialeigenschaften beeinflussen, zu erhöhen. Es wird gezeigt, dass Silizium, dessen unbeabsichtigter Einbau in den Kristall stark von den Wachstumsbedingungen abhängt, die Lumineszenzintensität der Schichten beeinflusst. In Kapitel 4 werden undotierte Laserstrukturen untersucht. Unter Zuhilfenahme verschiedenster Charakterisierungsmethoden wird der Einfluss der AlN/Saphir-Templates und des Heterostrukturdesigns auf die Lasereigenschaften analysiert. Kapitel 5 schließlich greift das Thema der Siliziumdotierung aus Kapitel 3 wieder auf und vereint es mit den Laserergebnissen aus dem vorherigen Kapitel. Durch Dotierung verschiedener Schichten in der Laserstruktur mit unterschiedlich hohen Siliziumkonzentrationen ist hier eine detaillierte Analyse des Siliziumeinflusses möglich und die für die optischen Eigenschaften und die Laserschwelle relevanten physikalischen Effekte können identifiziert werden.

Am Ende der Arbeit steht eine Zusammenfassung, in der auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Halbleiterbauelemente diskutiert wird.



# Kapitel 1.

## Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird auf grundlegende physikalischen Eigenschaften von Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN) und Halbleiterlasern eingegangen. Da zu diesen Themen bereits unzählige Bücher existieren, sollen nur die für diese Arbeit relevantesten Eigenschaften und Effekte wiedergegeben werden. Für das AlGaN-Materialsystem zählen dazu die für das epitaktische Wachstum und das Heterostrukturdesign entscheidende Kristall- und Bandstruktur inklusive der elektrischen Polarisationsfelder, welche einen signifikanten Einfluss auf die Ladungsträgerrekombination in Quantenfilmen hat. Für Laser sind die Ladungsträgergenerations- und -rekombinationsprozesse, die Ausbildung optischer Moden im Resonator und die sich aus dem Zusammenspiel dieser Effekte ergebenden Bedingungen für Lasing von besonderem Interesse.

### 1.1. AlGaN-Halbleiter

#### 1.1.1. Kristall- und Bandstruktur

Die thermodynamisch stabile Kristallstruktur von AlGaN ist die Wurtzitstruktur. Unter entsprechenden Bedingungen ist auch Wachstum in Zinkblendestruktur möglich [14–17], während Kristallisation in der Steinsalzstruktur nur bei sehr hohen Drücke  $>500$  GPa stattfindet [18]. Alle weiteren Beschreibungen beziehen sich daher auf die Wurtzitstruktur, die in Abbildung 1.1(a) dargestellt ist. Sie besteht aus zwei hexagonalen Gittern, die gegeneinander verschoben sind. Dabei sitzt ebenso jedes Gruppe-III-Atom im Zentrum einer Tetraederbindung mit vier Stickstoffatomen wie jedes Stickstoffatom mit vier Gruppe-III-Atomen verbunden ist.

Die Gitterkonstanten  $a$  und  $c$  sowie die Bandlücken  $E_g$  für AlN und GaN sind in Tabelle 1.1 aufgeführt. Für unverspannte Mischkristalle  $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$  mit dem Al-Gehalt  $x$  und dem Ga-Gehalt  $(1-x)$  können die Gitterkonstanten über die Vegard'sche Formel interpoliert werden [19]:

$$a(\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}) = x \times a(\text{AlN}) + (1 - x) \times a(\text{GaN}) \quad (1.1)$$

$$c(\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}) = x \times c(\text{AlN}) + (1 - x) \times c(\text{GaN}) \quad (1.2)$$

Diese Formeln gelten allerdings nur bei Mittelung über viele Einheitszellen, da die Abstände der einzelnen atomaren Bindungen sich mit der Zusammensetzung nur wenig ändern [20]. Die Bandlücke von ternärem  $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$  kann ebenso über Interpolation berechnet werden.