

1 Einleitung

Laserdioden mit einer Emission im blauen bis nahen ultravioletten Spektralbereich ermöglichen die Erschließung einer Vielzahl von Anwendungsfeldern. Hierbei ist die Entwicklung in der optischen Datenspeicherung ein Bereich, der bis in den Alltag der meisten Menschen vorgedrungen ist. So führte der Wechsel von rot zu blau emittierenden Halbleiterlasern zu der Weiterentwicklung von der DVD zur Blu-ray Disc. Durch die Verringerung der Wellenlänge von 635 nm auf 405 nm konnte die Datenmenge von 4,7 GByte auf etwa 25 GByte [1, 2] pro Datenträger erhöht werden. Neben diesem vermutlich bekanntesten Anwendungsgebiet werden blaue Laserdioden heutzutage ebenfalls für Laserdrucker und -projektoren, in der Medizintechnik, der Bioanalytik, der Materialbearbeitung und der Spektroskopie eingesetzt. Aufgrund der Diversität dieser Anwendungsfelder werden auch verschiedenste Anforderungen an die Laserparameter, wie bspw. Ausgangsleistung, Linienbreite oder Strahlqualität, gestellt. Gemein ist jedoch allen Anwendungen, dass Laserdioden mit hoher Stabilität und möglichst langer Lebensdauer benötigt werden.

Erste blau emittierende Laserdioden wurden auf der Basis von II-VI-Verbindungshalbleitern aus dem ZnSe-Materialsystem hergestellt [3]. Das Problem der geringen Lebensdauer im Dauerstrichbetrieb (cw-Betrieb) konnte für Laser aus diesem Materialsystem jedoch nie vollständig gelöst werden [3, 4].

Parallel dazu fanden Forschungsarbeiten zur Realisierung von blauen Lasern mit dem III-V-Verbindungshalbleiter GaN statt. Hier war zunächst die schwer zu realisierende p-Dotierung das größte Hindernis bei der erfolgreichen Entwicklung von elektrisch gepumpten Halbleiterlasern. Im Jahr 1989 stellten Amano et al. [5] fest, dass mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOCVD, engl.: metal-organic chemical vapour deposition) gewachsene und mit Magnesium dotierte GaN-Schichten zunächst elektrisch isolierend sind. Erst eine anschließende Bestrahlung mit niederenergetischen Elektronen führte zur p-Leitfähigkeit der Schichten. Nakamura et al. [6] gelang 1992 die Aktivierung der p-Leitfähigkeit von GaN:Mg durch thermische Behandlung des Materials. Die Notwendigkeit eines Aktivierungsschritts lässt sich durch den MOCVD-Wachstumsprozess erklären. Hier sind sowohl in den Trägergasen als auch in den reaktiven Ausgangsstoffen wie dem Ammoniak und den Metallorganika große Mengen Wasserstoff vorhanden. Dies führt zum Einbau von elektrisch neutralen Mg-H-Komplexen [7]. Durch den Temperaturschritt werden die Komplexe aufgebrochen und die Mg-Akzeptoren aktiviert. Die exakten physikalischen Vorgänge bei der Aktivierung der p-Leitfähigkeit von GaN:Mg-Schichten waren in der Vergangenheit [7-12] und sind auch heutzutage noch Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung [13-19].

Im Jahr 1996 gelang Nakamura et al. [20, 21] die Realisierung des ersten elektrisch gepumpten Halbleiterlasers auf der Basis von GaN. Aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von GaN-Substraten wurden die damaligen Laser auf Saphir-Substraten hergestellt. Durch Optimierungen in der Epitaxie und der Prozesstechnologie konnten in den nächsten Jahren cw-Lebensdauern bis zu einigen 10 h erzielt werden [22-25]. In den Folgejahren war vor allem die Entwicklung der Substrattechnologie die Triebkraft zur weiteren Erhöhung der Lebensdauer. Durch Strukturieren und selektives Überwachsen (ELOG, engl.: epitaxial lateral overgrowth) der Saphir Substrate mit GaN konnten die Versetzungsdichten von 10^9 cm^{-2} bis 10^{10} cm^{-2} auf etwa $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ reduziert werden [26-28]. Damit einher ging eine Erhöhung der Lebensdauer auf einige 1.000 h [29-32]. Heutzutage sind GaN-Substrate mit Versetzungsdichten im Bereich von 10^5 cm^{-2} erhältlich [33]. Auf solchen Substraten hergestellte, kommerziell erhältliche Laser erreichen Lebensdauern von einigen 10.000 h [34-37].

Weltweit gibt es nur wenige Hersteller (wie Nichia oder OSRAM Opto Semiconductors), die Laserdioden auf GaN-Basis vertreiben. Dies führte zu einer Einengung des Produktportfolios. So sind Laserdioden, deren Eigenschaften auf eine bestimmte Anwendung zugeschnitten sind, häufig nicht erhältlich. Daher hat sich das Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) dazu entschlossen, maßgeschneiderte (InAlGa)N-Laserdioden mit hoher Zuverlässigkeit zu entwickeln.

Obwohl die kommerziell erhältlichen Laserdioden beeindruckende Lebensdauern aufweisen, sind die Ausfall- und Degradationsmechanismen nur bedingt bekannt. So ist die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Defektdichte, wie bereits beschrieben, klar nachweisbar [31, 32, 35, 36]. Die physikalischen Gründe dafür sind jedoch nicht eindeutig geklärt. In der Literatur werden hauptsächlich verschiedene Mechanismen zur Generation von nichtstrahlenden Rekombinationszentren [38-41] in der und Diffusion von Mg zur aktiven Zone [42, 43] als Ursachen für einen Abfall der optischen Ausgangsleistung diskutiert. Zusätzlich wurden verschiedenste betriebsinduzierte Ablagerungen auf den Laserfacetten gefunden [44-47], welche ebenfalls als Ursache für einen Abfall der Ausgangsleistung betrachtet werden. Das abgelagerte Material hängt dabei von der Laserwellenlänge, einer möglichen Facettenbeschichtung und der Umgebungsatmosphäre ab. Allerdings ist auch hier die Datenlage nicht eindeutig. So konnten Schoedl et al. [46] durch eine Facettenbeschichtung Ablagerungen an den Facetten verhindern, während bei Marona et al. [47] diese unabhängig von der Facettenpräparation auftraten.

Neben dem Abfall der optischen Ausgangsleistung sind auch Instabilitäten der Betriebsspannung bei GaN-basierten Laserdioden bekannt. Diese werden zumeist mit Degradationseffekten an den p-Kontakten assoziiert [48, 49]. Studien an (InAlGa)N-basierten Leuchtdioden (LEDs) konnten auch einen Einfluss der vorhandenen Wasserstoffkonzentration im Halbleiter auf die Spannungsstabilität zeigen [50-52]. Der Ursprung des Wasser-

stoffs kann dabei sowohl prozessbedingt sein, als auch in einer ungenügenden Aktivierung der p-Leitfähigkeit begründet liegen. Systematische Studien zum Einfluss des Wasserstoffs auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von (InAlGa)N-Laserdioden sind dabei nicht bekannt.

Zu Beginn dieser Arbeit lagen erste am FBH auf GaN-Substraten gewachsene Laserstrukturen vor. Mit diesen Bauelementen konnte im gepulsten Modus ein Laserbetrieb erzielt werden. Im cw-Betrieb lagen die Lebensdauern zwischen einigen Minuten und wenigen Stunden. Ziel dieser Arbeit war es daher, bei einer hohen Chipausbeute pro Wafer die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Laserdioden zu steigern. Hierfür wurden die Chipprozessstechnologie optimiert und systematische Analysen der Degradationsmechanismen an der zur Verfügung stehenden Epitaxiestructur durchgeführt. Die hier vorgestellten Untersuchungen und Weiterentwicklungen führten zu einer Erhöhung der Lebensdauer von Rippenwellenleiter-Lasern (RW-Lasern) auf mehrere 100 h bei einer gleichzeitig deutlich gestiegenen Ausbeute an cw-fähigen Laserdioden. Zusätzlich konnten Optimierungspotenziale in der Epitaxie und Facettentechnologie aufgezeigt und Empfehlungen für zukünftige Entwicklungen gegeben werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen zum einen dafür genutzt werden, durch weiterführende Technologie- und gezielte Epitaxieoptimierungen die Lebensdauern zukünftig noch weiter zu erhöhen. Zum anderen sollen auf der Basis der Technologieplattform für die hier untersuchten Breitstreifen- und RW-Laser auch komplexere Laserstrukturen wie Trapez-, DBR- (engl.: Distributed Bragg Reflector) und DFB-Laser (engl.: Distributed Feedback) mit hoher Zuverlässigkeit entwickelt werden.

Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst die für diese Arbeit verwendete Epitaxiestructur vorgestellt. Zum besseren Verständnis der später durchgeführten Technologieoptimierungen werden anschließend die Herstellungsverfahren der in dieser Arbeit verwendeten Laserdioden erläutert. Abschließend folgt eine kurze Erklärung der angewandten elektro-optischen Charakterisierungsverfahren.

In Kapitel 3 werden einzelne Schritte der Prozesstechnologie näher untersucht und optimiert. Der Fokus liegt dabei auf der Erhöhung der Zuverlässigkeit des Herstellungsprozesses sowie der späteren Laserperformance. Im Detail werden zuerst die p-Kontakte optimiert. Danach werden die verwendeten dielektrischen Isolatorschichten vorgestellt und deren Einfluss auf die Funktionsweise der Laser diskutiert. Im letzten Teil des Kapitels wird die Ausbeute bei der Erzeugung von Laserchips durch die Optimierung des Substratabdünnverfahrens, des Chipdesigns sowie des Spaltverfahrens thematisiert.

Anschließend wird in Kapitel 4 der Einfluss der Aktivierung der p-Leitfähigkeit, und damit der Wasserstoffkonzentration im Halbleiter, auf die Stabilität von Breitstreifenlasern unter-

sucht. Hier werden zunächst die Auswirkungen verschiedener Aktivierungsmethoden auf die Laserschwelle und die Betriebsspannung analysiert. Als Nächstes erfolgt die Diskussion der Alterungsmessungen von Breitreifenlasern. Der Fokus liegt hierbei auf der Stabilität der Betriebsspannung. Ein Degradationsmechanismus, der zu einem charakteristischen Anstieg der Betriebsspannung führt, wird näher untersucht und die beobachteten Effekte werden physikalischen Vorgängen im Halbleiter zugeordnet. Am Ende des Kapitels werden die Auswirkungen des Langzeitbetriebs auf die Laserschwelle diskutiert.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Kapiteln 2 bis 4 wurden mit einigen Technologievariationen RW-Laser prozessiert. In Kapitel 5 werden die Alterungsuntersuchungen an diesen Lasern vorgestellt. Dafür wurden die Laser zunächst im Puls- und cw-Betrieb charakterisiert und anhand dieser Messungen der Einfluss der Technologievariationen diskutiert. Nachfolgend werden zwei separate Alterungsmechanismen betrachtet, die spannungsabhängige und die spannungsunabhängige Degradation der Ausgangsleistung. Für erstere werden systematisch technologische und messtechnische Einflussgrößen bestimmt und anschließend ein physikalisches Modell für diesen Mechanismus aufgestellt. Abschließend wurden zum Verständnis der spannungsunabhängigen Instabilitäten der Ausgangsleistung Untersuchungen mit dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM) an den Laserfacetten durchgeführt.

In Kapitel 6 werden die erzielten Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Optimierungspotenziale gegeben.

2 Aufbau und Charakterisierung von GaN-basierten Laserdioden

Der Fokus dieser Arbeit liegt u. a. darauf, die Einflüsse einzelner Schritte der Prozesstechnologie auf die Zuverlässigkeit von GaN-basierten Laserdioden zu identifizieren. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird der Herstellungsprozess bezüglich der Lebensdauer und Ausbeute der Laserdioden optimiert. In diesem Kapitel wird daher zunächst ein Überblick über die verwendeten Laserstrukturen und die zugehörigen Prozesse zur Herstellung dieser Bauelemente gegeben.

Im ersten Teil des Kapitels wird die Epitaxiestruktur der Bauelemente vorgestellt. Zur Charakterisierung der Epitaxie sowie für erste Stabilitätsmessungen wurden für diese Arbeit Breitstreifenlaser genutzt. Daher wird anschließend der Herstellungsprozess dieser Bauelemente erläutert. Im zweiten Teil des Kapitels wird ein Überblick über den Prozessablauf zur Herstellung der RW-Laser gegeben. Hier wird insbesondere auf die Rippenätzung und deren Auswirkungen auf das spätere Bauelement eingegangen. Abschließend werden die in dieser Arbeit verwendeten Messmethoden zur elektro-optischen Charakterisierung der hergestellten Bauelemente kurz beschrieben.

2.1 Verwendete Laser-Heterostruktur

Das Schichtwachstum der in dieser Arbeit untersuchten (InAlGa)N-Laserdioden wurde mittels MOCVD realisiert. Bei diesem Verfahren werden Trimethyl-Gallium oder Triethyl-Gallium als metallorganische Quellen für das Gallium verwendet. Als Quelle für den Stickstoff wird Ammoniak genutzt. Unter der Verwendung von Trägergasen (Wasserstoff oder Stickstoff) werden die Reaktionspartner über das geheizte Substrat geleitet. Dort scheiden sich bei geeigneter Prozesstemperatur und Druck durch thermische Dissoziation die gewünschten Elemente ab und eine epitaktische Schicht wächst auf dem Substrat.

Für die in dieser Arbeit verwendeten Laserstrukturen wurden defektarme GaN-Substrate (c-Ebene) mit einem Durchmesser von 2 Zoll von zwei unterschiedlichen Herstellern, der Fa. Mitsubishi Chemical Holdings Group und der Fa. Saint-Gobain Lumilog, benutzt. Prinzipiell hat das verwendete Substrat einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der darauf gewachsenen Schichten. Beide Hersteller geben für die Kristallqualität ihrer Substrate sehr ähnliche Kenndaten an. So liegt die Dichte an Durchstoßversetzungen bei ca. $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ und der Winkel der Substratoberfläche zur c-Ebene (sogenannter Miscut-Winkel) im Waferzentrum bei etwa $0,4^\circ$ bis $0,5^\circ$. Die Ladungsträgerkonzentration für die n-dotierten Substrate beider Hersteller beträgt etwa $1\text{-}2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Die resultierenden

spezifischen Widerstände sind bei beiden Substraten $\leq 2 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$. Aufgrund der Ähnlichkeit der Eigenschaften der Substrate konnten auch keine signifikanten Unterschiede zwischen Bauelementen mit diesen beiden Substraten festgestellt werden. Änderungen in der Prozesstechnologie in Abhängigkeit vom Substrat würden sich ergeben, wenn nach dem epitaktischen Schichtwachstum die Verbiegung der Wafer grundlegend verschieden wäre. Für beide Substrate liegt der Radius der Verbiegung der Wafer nach der Epitaxie im Bereich zwischen 5 m und 10 m, sodass keine Abweichungen in der Prozesstechnologie nötig waren. Da sich weder technologisch noch aufgrund der Bauteilperformance signifikante Unterschiede zwischen den Substraten ergaben, werden im Rahmen dieser Arbeit keine weiteren Untersuchungen zu dem Einfluss der verschiedenen Substrate durchgeführt.

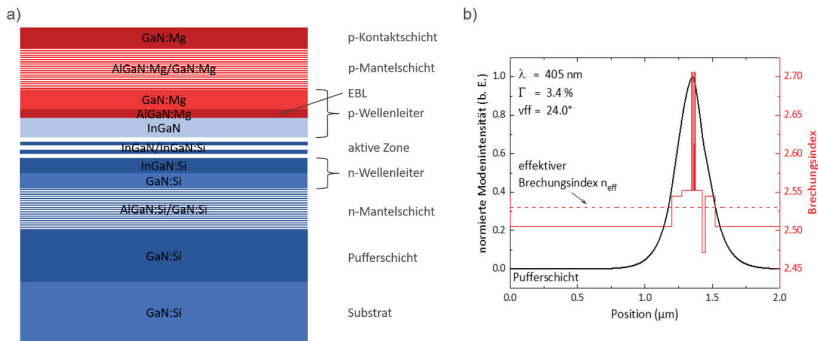


Abbildung 2.1: Die verwendete Epitaxiestruktur: in a) schematische (nicht maßstabsgetreue) Darstellung der einzelnen Schichten und in b) Simulation der geführten transversalen Mode bei einer Wellenlänge von 405 nm mit dem berechneten Füllfaktor Γ und dem vertikalen Fernfeldwinkel vff

Die Substrate werden von den Herstellern „epitaxiebereit“ geliefert. Daher findet vor dem Wachstum keine zusätzliche Reinigung statt. In einem ersten Schritt wird eine etwa $2 \mu\text{m}$ dicke GaN:Si-Pufferschicht gewachsen. Diese Schicht dient als Grundlage für das epitaktische Wachstum der optisch aktiven Schichten. Um eine ähnliche elektrische Leitfähigkeit wie die der Substrate zu erzielen, hat die Pufferschicht eine Si-Dotierung von etwa $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Anschließend erfolgt das Wachstum der ersten optisch aktiven Schicht, der Mantelschicht. Diese besteht auf der n-leitenden Seite des Halbleiters aus einem kurzperiodischen Supergitter von 200 jeweils $2,5 \text{ nm}$ dicken GaN:Si/ $\text{Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$:Si-Schichten. Die Si-Dotierung beträgt ca. $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Nach der Mantelschicht folgt das Wachstum des Wellenleiters. Dieser besteht aus zwei Schichten. Die erste ist eine 75 nm dicke GaN:Si-Schicht und die zweite eine 60 nm dicke $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{N}$:Si-Schicht. Beide haben eine Si-Konzentration von ca. $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Nach dem Wachstum des Wellenleiters folgt die aktive Zone. Diese besteht aus drei $3,5 \text{ nm}$ dicken $\text{In}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$ -Mehrfachquantenfilmen. Die Quantenfilme sind durch 7 nm dicke $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{N}$:Si-

Barrieren getrennt. Die Barrieren haben eine mittlere Si-Konzentration von $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Die Barriere nach dem letzten Quantenfilm ist 20 nm dick und undotiert. Im Anschluss an die aktive Zone beginnt das Wachstum des Wellenleiters auf der p-leitenden Seite des Halbleiters. Dieser besteht aus zwei Teilen. Der untere Teil ist eine ca. 60 nm dicke, undotierte $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{N}$ -Schicht. Danach folgt die Elektronenblockierschicht (der EBL, engl: electron blocking layer), welche eine energetische Barriere für die Elektronen darstellt. Der EBL besteht aus einer 20 nm dicken $\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N:Mg}$ -Schicht. Die Mg-Dotierung beträgt ca. $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Anschließend folgt der zweite Teil des Wellenleiters. Dieser ist eine etwa 45 nm dicke GaN:Mg -Schicht mit einer Mg-Dotierung von etwa $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Danach wird die Mantelschicht gewachsen. Diese besteht, wie auf der n-leitenden Seite, aus einem kurzperiodischen Supergitter aus diesmal jeweils 100 Schichten von je 2,5 nm dicken $\text{Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N:Mg/GaN:Mg}$. Die Mg-Dotierung innerhalb der Mantelschicht beträgt etwa $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Abschließend folgt eine 80 nm dicke, hochdotierte GaN:Mg -Schicht. Diese dient als Kontaktschicht und ist essenziell für das Erreichen von Ohm'schen p-Kontakten. Die Dotierhöhe liegt bei etwa $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Ein schematischer Überblick über die gesamte Epitaxiestruktur ist in Abbildung 2.1a zu sehen. Diese Epitaxiestruktur wurde für alle in dieser Arbeit vorgestellten Laserprozesse verwendet.

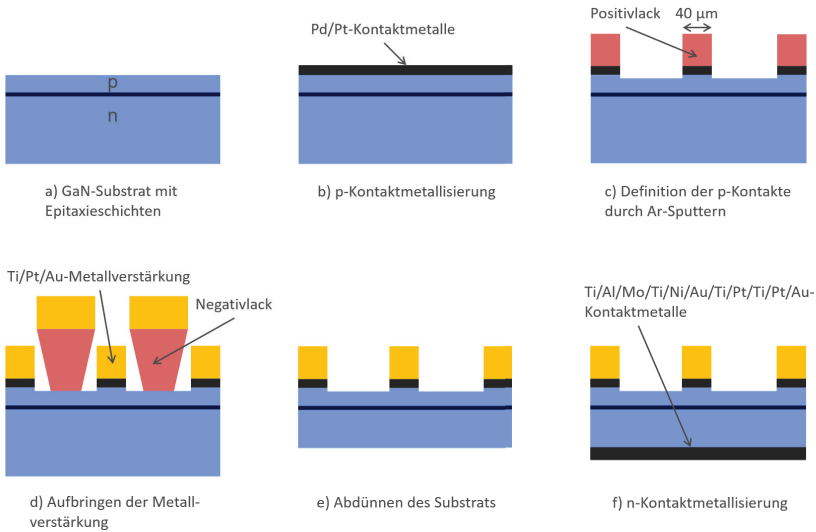
Aufgrund der vorgestellten Epitaxiestruktur ergibt sich in vertikaler Richtung durch das Brechungsindexprofil des Schichtstapels eine Wellenführung. Diese wurde im Rahmen dieser Arbeit mit dem Programm QIP2 berechnet. Die physikalischen Grundlagen dieses Programms sind ausführlich in [53] beschrieben. Die Software berechnet anhand der Dicke, Komposition und Dotierung jeder einzelnen Schicht die transversal ausbreitungsfähigen Moden für eine vorgegebene Wellenlänge. Dabei nutzt das Programm die effektive-Index-Methode. Die Brechungsindizes und Absorptionskoeffizienten einzelner Schichten können durch verschiedene Modelle [54-56] bestimmt werden (siehe auch Kapitel 4.1.1). So lässt sich für die vorgegebene Schichtstruktur zeigen, dass in transversaler Richtung nur die Grundmode ausbreitungsfähig ist (siehe Abbildung 2.1b).

2.2 Herstellung von gewinngeführten Breitstreifenlasern

Zur Charakterisierung der Epitaxiestruktur würde sich ein vollständiger Chipprozess zur Herstellung von RW-Lasern nicht eignen, da dieser mit einer Gesamtdauer von etwa 12 Wochen zu lang wäre und der komplexe Prozess selber einen großen Einfluss auf die Performance der Bauteile hat. Daher werden hierfür am FBH gewinngeführte Breitstreifenlaser genutzt. Diese sind mit weniger Prozessschritten schneller herzustellen. In Abbildung 2.2 ist ein schematischer Überblick über den Prozessverlauf dargestellt. Aufgrund der Breite der p-Kontakte ($40 \mu\text{m}$) und der nicht optimierten Wärmeabfuhr rollen diese Laser im cw-Betrieb vor dem Erreichen der Laserschwelle thermisch über. Daher erfolgt die Charakterisierung der Epitaxie im gepulsten Betrieb (siehe Kapitel 2.4). Zusätzlich zu den ge-

pulsten Messungen wurden die Breitstreifenlaser im Rahmen dieser Arbeit für Langzeituntersuchungen im cw-Betrieb genutzt. Auch wenn die Laserdioden in diesem Betriebsmodus nicht so schnell verschleichen, ist die Herstellung der Breitstreifenlaser dennoch eine Herausforderung für die Zuverlässigkeit.

daher die Prozesskette zur He



Wafer hergestellt. Dieser auch als Aktivierung bezeichnete Prozessschritt hat maßgeblich auf die Stabilität der Laserdioden und wird daher ausführlich in den Kapiteln 3.1.2 und 4 untersucht. Aus diesen Untersuchungen folgend, erwies sich eine Aktivierung für 2 min bei 820 °C in einer Stickstoff-/Sauerstoffatmosphäre (im Verhältnis 7:3) als am besten geeignet. Anschließend wird die Waferoberfläche vor der p-Kontaktmetallabscheidung gereinigt. Dieser Schritt ist essenziell, um Ohm'sche Kontakte mit niedrigen spezifischen Kontaktwiderständen im Bereich $\leq 1 \times 10^{-2} \Omega$ zu erzeugen. Dabei müssen verschiedene Arten von Verunreinigungen, wie bspw. Kohlenstoff, metallische Verbindungen und Oberflächenoxide, entfernt werden.

Reinigungsprozess. Zuerst erfolgt eine Ätzung

in einem Gemisch aus Schwefelsäure, Wasserstoffperoxid und Wasser im Verhältnis 3:1:1, anschließend ein Ätzschritt in Königswasser und abschließend einer in verdünnter HF-Säure. Weiterführende Untersuchungen zu dem Reinigungsschritt sind in Kapitel 3.1.1 dargelegt. Nach der Entfernung der Oberflächenoxide werden die p-Kontaktmetalle mittels Elektronenstrahlverdampfen ganzflächig auf dem Wafer abgeschieden (siehe Abbildung 2.2b). Der Kontakt besteht aus einer 30 nm dicken Pd-Schicht und einer 20 nm dicken Pt-Schicht. Der Einfluss der beiden Metalle auf die Kontaktwiderstände wird in Kapitel 3.1.1 betrachtet. In Kapitel 4.2.1 werden die Kontaktmetalle hinsichtlich ihrer Stabilität während des cw-Betriebs untersucht. Nach der Metallabscheidung erfolgt die Formierung des Kontaktes für 5 min bei 530 °C unter Stickstoffatmosphäre. Auch dieser Schritt wird in Kapitel 3.1.1 näher untersucht.

Nun wird mittels Fotolithographie ein Positivlack auf den Metallkontakt aufgebracht und strukturiert. Der Lack wird als Maske zur Erzeugung der p-Kontakte genutzt. Die Metallstrukturierung erfolgt dann mittels Ar-Ionen (siehe Abbildung 2.2c). Anschließend wird mithilfe eines weiteren Fotolithographieschrittes mit einem Negativlack eine ca. 1 µm dicke Metallverstärkung bestehend aus einem Ti/Pt/Au-Schichtstapel auf die p-Kontakte aufgebracht (siehe Abbildung 2.2d). Im nächsten Schritt werden die Substrate durch mechanisches Läppen auf eine Dicke von 150 µm abgedünnt (siehe Abbildung 2.2e). Dies ist notwendig, um das spätere Vereinzeln der Wafer in Laserriegel bei gleichzeitig hoher Facettenqualität zu ermöglichen. Das Abdünnen ist ein sehr kritischer Prozessschritt, da GaN ein sehr sprödes und hartes Material ist und es hier, bei einem nicht optimierten Prozess, zum Waferbruch kommen kann. In Kapitel 3.3.1 wird daher das Abdünnen der GaN-Substrate näher untersucht und optimiert. Anschließend wird der n-Kontaktschichtstapel durch Elektronenstrahlverdampfen auf der Waferrückseite aufgebracht und für 1 min bei 450 °C in Stickstoffatmosphäre formiert. Der Prozess ist im Detail von Redaelli et al. in [57] beschrieben. Abschließend wird der n-Kontakt mit einer ca. 460 nm dicken Ti/Pt/Au-Schichtfolge verstärkt (siehe Abbildung 2.2f).

Nach der Prozessierung werden die Wafer in 12 mm breite Laserriegel mit Resonatorlängen von 600 µm und 1300 µm vereinzelt. Hierfür wird als Verfahren die Lasermikrostrukturierung (LMS) verwendet. Dafür werden die Wafer auf der Epitaxienseite mit einem Lasersystem der Fa. Innolas, bestehend aus einem frequenzverdreifachten Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 355 nm, einer Pulslänge von ≤ 30 ns und einer Pulsfolgefrequenz von 20 kHz, angeritzt. Anschließend erfolgt das Spalten des Wafers in Laserriegel mit dem Breaker OBM-90TP der Fa. Opto System Co. Ltd. Hierbei wird auf der Rückseite des Wafers eine Kraft entlang des Laserritzes aufgebracht und der Wafer vereinzelt. Details zu dem Vereinzelnprozess wurden von Kang et al. in [58] veröffentlicht. Die Auswirkungen des Vereinzelnprozesses auf die Qualität und die Ausbeute der Laserriegel werden in Kapitel 3.3.2 untersucht.

2.3 Herstellung von indexgeführten Rippenwellenleiterlasern

Im Gegensatz zu den gewinngeführten Breitstreifenlasern wird bei RW-Lasern durch die Ätzung der Rippe und den dadurch entstehenden Sprung im Brechungsindexprofil auch eine laterale Führung des Lichtes erzeugt, daher spricht man auch von indexgeführten RW-Lasern. Die Form der Rippe, also die Kombination aus Rippenbreite und -äztiefe, beeinflusst elementare Lasereigenschaften, wie die Anzahl der ausbreitungsfähigen lateralen Moden, die Schwellenstromdichte und die Stabilität der Laserdioden. Daher wird im Nachfolgenden zunächst ein allgemeiner Überblick über die Herstellung der RW-Laser gegeben. Im Anschluss daran werden Simulationen zur Abschätzung der lateralen Modenführung für die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Laser durchgeführt. Die Zuverlässigkeitsuntersuchungen in Abhängigkeit der Rippengeometrie erfolgen in Kapitel 5.2.3.

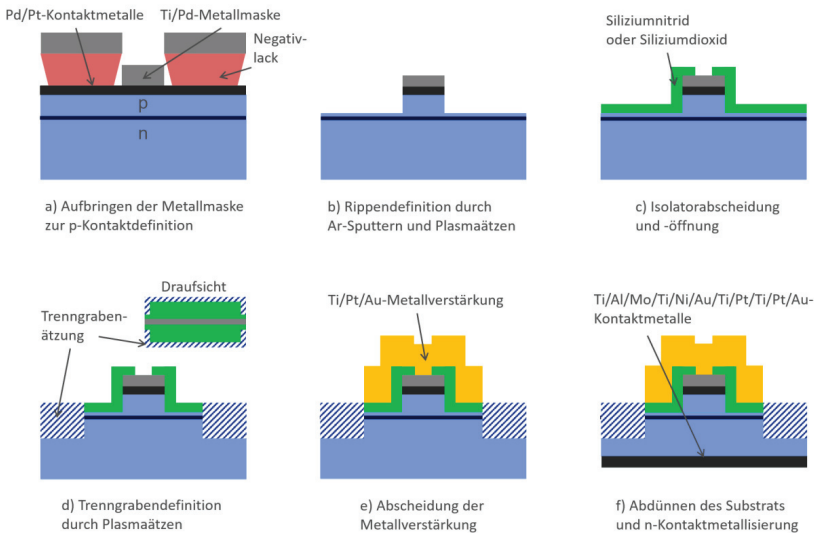


Abbildung 2.3: Schematische (nicht maßstabgetreue) Darstellung des Rippenwellenleiterprozesses (p-Kontaktmetallisierung identisch wie beim Breitstreifenlaser und hier nicht explizit dargestellt)

Die Prozessschritte zur Reinigung der Waferoberfläche, zur Abscheidung der Pd/Pt-Kontaktmalle sowie zur Formierung des p-Kontaktes sind identisch zu dem in Kapitel 2.2 vorgestellten Breitstreifenlaserprozess. Für die Definition der Rippengeometrie wird zunächst über einen Fotolithographieschritt eine Metallmaske, bestehend aus einer 30 nm dicken Ti-Schicht und einer 215 nm dicken Pd-Schicht, mittels Elektronenstrahlverdampfen abgeschieden (siehe Abbildung 2.3a). Dabei entspricht die Kontaktbreite nach Entfernung des Negativlacks der angestrebten Rippenbreite. Im Rahmen dieser Arbeit wurden