

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

Charakterisierung und Optimierung von (Al, Ga)N-basierten UV-Photodetektoren









aus der Reihe:

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

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

Band 39

Moritz Brendel

Charakterisierung und Optimierung von (Al, Ga)N-basierten
UV-Photodetektoren

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
Web 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.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit AlGaIn-Photodetektoren, die UV-Strahlung detektieren, aber für sichtbare Strahlung weitgehend unempfindlich sind. Das eingesetzte MSM-Konzept kommt ohne Dotierung aus, auch Ätzschritte werden nicht benötigt. Durch die ausgeklügelte Kombination von Schichtstruktur, Metallisierung und Elektrodenlayout werden die Detektoreigenschaften anwendungsspezifisch optimiert. Basis dafür sind umfassende Simulationen, insbesondere zur Erzeugung und zum Transport der Ladungsträger im Bauelement. Dank dünner Absorberschichten und durch die Kombination von Schottky-Kontakten mit legierten, weitgehend Ohm'schen Kontakten lassen sich sehr hohe Quantenausbeuten erzielen. Mit erhöhtem Aufwand durch Mehrschrittepitaxie können zudem sehr empfindliche Bauelemente mit Verstärkung realisiert werden.

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 Bedarfsfeldern 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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.

Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Charakterisierung und Optimierung von (Al, Ga)N-basierten UV-Photodetektoren

vorgelegt von
Dipl.-Phys.

Moritz Brendel
geb. in Potsdam

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: 24. November 2016

Berlin 2016
D 83



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2017
Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2016

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2017
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
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 2017

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9465-2
eISBN 978-3-7369-8465-3



„... *now I see the light* ...“
– Cliff Rigano





Abstract

Abstract (deutsch)

In dieser Arbeit wurden die Einflüsse von Versetzungsdichte, Heterostruktur und Detektorgeometrie auf die elektrooptischen Eigenschaften AlGa_N-basierter Metall-Halbleiter-Metall Photodetektoren (MSM PD) untersucht. Im Vordergrund stand dabei die Realisierung von Schottky-Typ MSM PD, die für die Photodetektion für Wellenlängen unterhalb von 300 nm geeignet sind und eine möglichst hohe externe Quanteneffizienz (EQE) aufweisen.

Zunächst wurden experimentelle und simulierte Ergebnisse zu einer ausführlichen Studie des Bauteilverhaltens front- und rückseitig bestrahlter Al_{0,5}Ga_{0,5}N/AlN MSM PD auf planaren c-Saphir Templates zusammengeführt. Besonders hervorzuheben ist hierbei das Schwellen- und Sättigungsverhalten der EQE als Funktion der Betriebsspannung sämtlicher Detektoren mit AlN-Pufferschicht unter rückseitiger Bestrahlung, da hier eine EQE von bis zu ca. 50 % bzw. 68 % bei 50 V für Absorberschichtdicken zwischen 0,1 µm und 0,5 µm erzielt werden konnte. Die Analyse 2-dimensionaler Simulationsdaten zeigte, dass es aufgrund der Polarisationsladung am AlGa_N/AlN-Heteroübergang zu einer Akkumulation photogenerierter Löcher entlang dieser Grenzfläche führt, deren Transport zum Schottky-Kontakt oberhalb einer mit sinkender Absorberschichtdicke von ca. 22 V auf ca. 5 V abnehmenden Schwellenspannung einsetzt. Für dünne Detektoren wurde eine EQE von ca. 30 % bei rund 7 V für die geometrisch symmetrische bzw. bei nur noch 1 V für eine geometrisch asymmetrische Elektrodenkonfiguration erzielt. Die Verwendung eines legierten und eines nicht legierten Elektrodenkamms (a-MSM) ermöglichte schließlich eine EQE von 24 % ohne externe Vorspannung.

Außerdem wurden frontseitig bestrahlte Al_{0,4}Ga_{0,6}N MSM PD auf zwei unterschiedlichen Template-Typen untersucht, die mittels epitaktisch lateralem Überwachsens (ELO) von AlN auf strukturierten AlN/Saphir hergestellt wurden, um das Bauteilverhalten bei reduzierter Durchstoßversetzungsdichte zu untersuchen. Aus REM- und CL-Untersuchungen ging hervor, dass die Al_{0,4}Ga_{0,6}N-Absorberschichten auf ELO-AlN bis zu einer gewissen Schichtdicke eine im Mittel reduzierte jedoch periodisch modulierte Versetzungsdichte aufweisen und die Materialzusammensetzung inhomogen ist. Bei dünnen Absorberschichten (ELO) liegen aufgrund interner Grenzflächen hohe Dunkelströme und außerdem Photostromverstärkung im Detektor vor. Für dicke Absorberschichten (ELOB), bei denen die Materialinhomogenität tiefer unterhalb der Elektroden vergraben liegt, wurde eine Erhöhung der EQE beobachtet, die auf die von $9 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ im planaren PD auf $1,4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ abgesenkte Versetzungsdichte im ELOB PD zurückgeführt werden kann. Schließlich wurde die Anisotropie der EQE von MSM PD auf verkippten Substraten dadurch erklärt, dass die wachstumsbedingte Modulation der Versetzungsdichte einer alternierenden Abfolge von Materialregionen mit unterschiedlichem spezifischen Widerstand aufgefasst werden kann, so dass der Photostromfluss zwischen zwei Elektroden gerade durch deren parallele Anordnung begünstigt wird. Diese Ergebnisse wurden ebenfalls anhand von 1-dimensionalen Berechnungen reproduziert.

Insgesamt wurde das Verständnis der Transportprozesse in AlGa_N MSM PD verbessert und es wurden Ansätze sowohl für Detektoren mit hoher EQE ohne Verstärkung als auch sehr empfindliche, aber dennoch lineare Detektoren mit Verstärkung aufgezeigt.

Abstract (english)

In this work, the influence of dislocation density, heterostructure design and detector geometry on the electro-optic properties of AlGa_{0.5}N-based metal-semiconductor-metal photodetectors (MSM PD) was investigated. The focus was on the realization of Schottky-type MSM PD suitable for photodetection below wavelengths of 300 nm with a high external quantum efficiency (EQE).

First, experimental and simulated results were combined to give a detailed study of the performance of top- and bottom-illuminated Al_{0.5}Ga_{0.5}N/AlN MSM PD on planar c-sapphire templates. Of particular note here is the threshold and saturation behavior of the EQE as a function of the operating voltage observed for all detectors with an AlN buffer layer under bottom illumination, since an EQE of 50 % and 68 % was achieved at 50 V for absorber layer thicknesses of 0.1 μm and 0.5 μm , respectively. The analysis of 2-dimensional simulation data showed that this is essentially caused by the polarization charge located at the AlGa_{0.5}N/AlN heterojunction, leading to an accumulation of photo-generated minority carriers along this interface. The transport of these charge carriers to the Schottky contact correlates to a certain threshold voltage which decreases from 22 V to 5 V with decreasing absorber layer thickness. For thin detectors therefore an EQE of about 30 % was obtained at 7 V or 1 V for geometrically symmetric or asymmetric electrode configuration, respectively. The use of an alloyed and a non-alloyed electrode comb in the MSM design (a-MSM) finally allowed an EQE of 24 % with no external bias. In addition, top-illuminated Al_{0.4}Ga_{0.6}N MSM PD fabricated on two different template types were examined, which by means of epitaxial lateral overgrowth (ELO) of AlN were produced on patterned AlN/sapphire to investigate the device behavior at reduced threading dislocation density. Using SEM and CL it was found that the Al_{0.4}Ga_{0.6}N absorber layers on ELO-AlN showed a periodically modulated distribution of the threading dislocation density as well as an inhomogeneous material composition. With thin absorber layers (ELO) high dark currents due to internal interfaces as well as photoconductive gain due to hole accumulation at these interfaces were observed. For thick absorber layers (ELOB), in which the material inhomogeneity is buried far from the electrodes, an increase in the EQE over that of the planar PD of same geometry was observed, that was explained by the threading dislocation density being reduced from $9 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ in the planar PD to $1.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ in the ELOB PD. Finally, the anisotropy of the EQE of MSM PD with respect to substrate miscut and electrode orientation was explained by approximating the modulated dislocation density as a periodically altering arrangement of AlGa_{0.5}N regions of different specific resistance promoting the flow of photo-induced current between two electrodes for the parallel case. These results have also been reproduced based on 1-dimensional calculations.

Overall understanding of transport processes in AlGa_{0.5}N MSM PD has been improved and approaches for the realization of detectors with high EQE but without gain as well as very sensitive, yet linear detectors with gain have been demonstrated.



Eigene Veröffentlichungen

- [EV1] M. Brendel, M. Helbling, A. Knigge, F. Brunner, and M. Weyers. Solar-blind AlGa_N MSM photodetectors with 24 % external quantum efficiency at 0 V. *Electronics Letters*, 51:1598–1600(2), October 2015.
- [EV2] M. Brendel, A. Knigge, F. Brunner, S. Einfeldt, A. Knauer, V. Kueller, U. Zeimer, and M. Weyers. Anisotropic Responsivity of AlGa_N Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors on Epitaxial Laterally Overgrown AlN/Sapphire Templates. *Journal of Electronic Materials*, 43(4):833–837, 2014.
- [EV3] Moritz Brendel, Markus Helbling, Arne Knauer, Sven Einfeldt, Andrea Knigge, and Markus Weyers. Top- and bottom-illumination of solar-blind AlGa_N metal-semiconductor-metal photodetectors. *physica status solidi (a)*, 212(5):1021–1028, 2015. (Zitiert auf Seiten 25, 47, 54, 64).
- [EV4] Moritz Brendel, Markus Helbling, Andrea Knigge, Frank Brunner, and Markus Weyers. Measurement and simulation of top- and bottom-illuminated solar-blind AlGa_N metal-semiconductor-metal photodetectors with high external quantum efficiencies. *Journal of Applied Physics*, 118(24), 2015. (Zitiert auf Seite 1).
- [EV5] Moritz Brendel, Enrico Pertzsch, Vera Abrosimova, Torsten Trenkler, and Markus Weyers. Solar- and Visible-Blind AlGa_N Photodetectors. In Michael Kneissl and Jens Rass, editors, *III-Nitride Ultraviolet Emitters*, volume 227 of *Springer Series in Materials Science*, pages 219–266. Springer International Publishing, 2016.
- [EV6] A. Knigge, M. Brendel, F. Brunner, S. Einfeldt, A. Knauer, V. Kueller, and M. Weyers. AlGa_N photodetectors for the UV-C spectral region on planar and epitaxial laterally overgrown AlN/sapphire templates. *physica status solidi (c)*, 10(3):294–297, 2013.
- [EV7] A. Knigge, M. Brendel, F. Brunner, S. Einfeldt, A. Knauer, V. Kueller, U. Zeimer, and M. Weyers. Solar-blind Al_xGa_{1-x}N MSM photodetectors on patterned AlN/sapphire templates with $0.4 < x < 1$. *physica status solidi (c)*, 11(3-4):802–805, 2014.
- [EV8] A. Knigge, M. Brendel, U. Zeimer, M. Helbling, A. Knauer, F. Brunner, V. Kueller, S. Einfeldt, and M. Weyers. Enhanced quantum efficiency of AlGa_N photodetectors by patterned growth. *physica status solidi (a)*, 212(5):1005–1010, 2015. (Zitiert auf Seite 105).

- [EV9] Andrea Knigge, Moritz Brendel, Frank Brunner, Sven Einfeldt, Arne Knauer, Viola Kueller, Ute Zeimer, and Markus Weyers. AlGa_N Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors on Planar and Epitaxial Laterally Overgrown AlN/Sapphire Templates for the Ultraviolet C Spectral Region. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52(8S):08JF03, 2013.
- [EV10] Jessica Schlegel, Moritz Brendel, Martin Martens, Andrea Knigge, Jens Rass, Sven Einfeldt, Frank Brunner, Markus Weyers, and Michael Kneissl. Influence of Carrier Lifetime, Transit Time, and Operation Voltages on the Photoresponse of Visible-Blind AlGa_N Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52:08JF01, 2013.



Inhaltsverzeichnis

Einleitung & Motivation	1
1. Grundlagen	3
1.1. AlGa _N -Materialsystem	3
1.1.1. Strukturelle Eigenschaften	3
1.1.2. Elektronische Eigenschaften	4
1.1.3. Optische Eigenschaften	11
1.2. Metall-Halbleiter-Metall Photodetektoren	17
1.2.1. Schottky-Barriere und Raumladungszone	18
1.2.2. Stromfluss am Schottky-Kontakt	20
1.2.3. Dunkelstrom einer MSM-Struktur	22
1.2.4. Photostrom und externe Quanteneffizienz eines MSM PD	23
1.2.5. Einfaches 1D-Modell für die EQE eines MSM PD	25
1.3. Stand der Forschung	27
2. Experimentelles	29
2.1. Epitaxie von AlGa _N für MSM PD	29
2.2. Prozessierung von AlGa _N -basierten MSM Detektoren	31
2.3. Charakterisierungsmethoden	33
2.3.1. Materialanalytische Charakterisierungsmethoden	33
2.3.2. Photostrom-Spektroskopie (PCS)	34
2.4. Simulation der Charakteristika von AlGa _N -basierten MSM PD mit ATLAS	42
2.4.1. Eingangsstruktur	42
2.4.2. Verwendete Modelle und Parameter	43
3. Front- und rückseitig bestrahlte AlGa_N MSM Photodetektoren	49
3.1. Spektrale EQE frontseitig bestrahlter Al _x Ga _{1-x} N MSM Photodetektoren	50
3.1.1. Einflüsse auf α_{opt} in den langwelligen Bereichen	50
3.1.2. Ableitung der optischen Konstanten für Al _x Ga _{1-x} N	53
3.2. Abhängigkeit der EQE von der Vorspannung	55
3.2.1. EQE-Kennlinien	55
3.2.2. EQE-Spektren	58
3.3. Erläuterung der Ergebnisse anhand der 2D-Simulation	60
3.3.1. Schwellen- und Sättigungsverhalten unter RS-Bestrahlung	60
3.3.2. EQE unter FS-Bestrahlung	65
3.4. Zusammenfassung des Kapitels	66



4. Optimierung AlGaIn-basierter MSM PD	69
4.1. Variation der Schichtstruktur	69
4.1.1. Einfluss der Absorberschichtdicke	69
4.1.2. Einfluss der Grenzflächenkontamination	74
4.1.3. $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ MSM PD mit und ohne AlN-Pufferschicht	79
4.2. Variation der Elektrodengeometrie	82
4.2.1. Symmetrische Elektrodenkonfiguration	82
4.2.2. Asymmetrische Elektrodenkonfiguration	85
4.3. Variation des Metallisierungsschemas	91
4.3.1. Dicke α -MSM PD unter frontseitiger Bestrahlung	92
4.3.2. Kombination der verschiedenen Optimierungsansätze	93
4.4. Zusammenfassung des Kapitels	95
5. AlGaIn MSM PD auf ELO-Templates	97
5.1. Materialanalytische Charakterisierung	98
5.1.1. Oberflächenmorphologie	99
5.1.2. Kompositionsfluktuationen	99
5.1.3. Durchstoßversetzungen	102
5.2. ELO MSM PD der ersten Generation	107
5.2.1. Grundlegende Charakteristika	107
5.2.2. Temperaturverhalten	110
5.2.3. Modellierung der Verstärkung	114
5.3. ELO MSM PD der zweiten Generation (ELOB)	120
5.3.1. Grundlegende Charakteristika	120
5.3.2. Zusammenhang zwischen EQE und Versetzungsdichte	123
5.4. Anisotropie des Photostroms	127
5.4.1. Experimentelle Befunde	127
5.4.2. Modellierung der Anisotropie	128
5.5. Zusammenfassung des Kapitels	131
Zusammenfassung und Ausblick	133
A. Konstanten, Parameter und Ableitungen	137
A.1. Konstanten und Parameter	138
A.2. Probendaten	140
A.3. Halbleiter-Gleichungen	142
A.4. Schottky-Näherung	143
A.5. Ableitung: EQE vs. Versetzungsdichte	145
Verzeichnisse	149
Danksagung	173

Einleitung & Motivation

Diese Arbeit befasst sich mit der Charakterisierung und Optimierung von Metall-Halbleiter-Metall (MSM, *engl.: metal-semiconductor-metal*) Photodetektoren (PD) auf Basis von Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN).

Die Bandlückenenergien im ternären $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Materialsystem sind durch das Verhältnis x von Aluminium zu Gallium (im Folgenden: Al-Anteil) festgelegt und liegen zwischen ca. 3,4 eV für GaN und 6,2 eV für AlN [1]. Das macht AlGaN-basierte PD besonders attraktiv für die Überwachung von Strahlungsquellen im ultra-violetten (UV) Spektralbereich, da zum einen eine potentielle Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung und thermischer Einwirkung vorliegt, und sich zum anderen die langwellige Detektionsgrenze solcher Detektoren, die sog. cut-off-Wellenlänge, über den Al-Gehalt zwischen ca. 365 nm und 200 nm gezielt einstellen lässt. Damit eröffnen sich für den Einsatz AlGaN-basierter Detektoren verschiedene Anwendungsgebiete, wie z. B. die Lackaushärtung [2] im UV-A (380 nm bis 315 nm), die medizinische Behandlung bestimmter Hautkrankheiten mittels Phototherapie [3] im UV-B (315 nm bis 280 nm) oder die Keimabtötung in Wasser [4] im UV-C (280 nm bis 200 nm).

Die Arbeiten zu AlGaN-basierten Photodetektoren der letzten 40 Jahre zeigen, dass inzwischen eine Vielzahl unterschiedlicher Photodetektortypen, teilweise sogar im gesamten Kompositionsbereich ($x = 0, \dots, 1$), realisiert wurde. Dabei reicht die Spanne von strukturell einfachen Metall/Halbleiter-Strukturen (Photoleiter [5, 6], MSM PD [7, 8, 9] und Schottky Photodiode [10, 11]) und Photokathoden [12, 13] für Photomultiplier über anspruchsvollere Homo- und Heteroschichtsysteme (z. B. p-i-n [14, 15] oder Avalanche PD [16, 17, 18, 19]) bis hin zu komplexen zeilen- oder flächenartigen Detektionseinheiten – z. B. focal-plane-array (FPA) [20, 21, 22].

Ein grundsätzliches Problem AlGaN-basierter optoelektronischer Bauteile, die auf Fremdsubstraten wie z. B. Saphir hergestellt werden, stellt die teilweise sehr hohe Dichte an Durchstoßversetzungen ($\gtrsim 10^9 \text{ cm}^{-2}$) in den aktiven Schichten dar, da die externe Quanteneffizienz (EQE) direkt durch die nichtstrahlende Rekombination an Versetzungen limitiert wird [23, 24]. Für einige Detektortypen ergeben sich mit steigendem Al-Gehalt außerdem technologische Schwierigkeiten p- oder n-leitende AlGaN-Schichten mit entsprechenden Ohmschen Kontakten zu realisieren.

In dieser Arbeit werden AlGaN-basierte MSM Photodetektoren mit einem vergleichsweise einfachen Aufbau – koplanar angeordneten Schottky-Kontakten auf nominell undotiertem $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Absorber – untersucht. Der Hauptnachteil gegenüber den diodenartigen Bauformen ist, dass dieser unter Vorspannung betrieben werden muss. Außerdem wird das feldbehaftete Gebiet unter den Elektroden bei metallseitiger (im Folgenden: frontseitiger) Bestrahlung abgeschattet. Letzterem wurde in der Vergangenheit durch die substratseitige (im Folgenden: rückseitige) Bestrahlung des MSM PD begegnet [25, 26, 27, 28, 29]. Hier-

bei handelt es sich jedoch ausschließlich um experimentelle Untersuchungen grundlegend verschiedenartiger Detektorstrukturen, so dass ein Unterschied der EQE zur frontseitigen Bestrahlung – wenn überhaupt untersucht – schwer eingeordnet werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wird deshalb mit einer abgestimmten Probenserie und unterschiedlichen Detektorgeometrien gezielt untersucht, unter welchen Bedingungen sich unter rückseitiger Bestrahlung eine sehr hohe EQE nahe dem theoretischen Maximalwert erzielen lässt.

Im ersten Ergebnisteil (Kapitel 3) werden zunächst typische EQE-Spektren und -Kennlinien von AlGa_N MSM Photodetektoren vorgestellt. Die Unterschiede in den experimentellen Ergebnissen für front- und rückseitig bestrahlte Al_{0,5}Ga_{0,5}N/AlN MSM PDs mit einer Absorberschichtdicke von 0,5 µm werden dann anhand von zweidimensionalen Simulationen im Rahmen eines Drift-Diffusions-Modells interpretiert.

Der zweite Ergebnisteil (Kapitel 4) befasst sich mit verschiedenen Optimierungsansätzen, die zur Erhöhung der EQE von rückseitig bestrahlten Al_{0,5}Ga_{0,5}N/AlN MSM PD unter geringen Vorspannungen führen. Dabei werden die Einflüsse von Schichtstruktur und Elektrodengeometrie sowie eines asymmetrischen Metallisierungsschemas auf die Bauteilcharakteristika diskutiert. Durch die qualitative Anpassung des Simulationsmodells an die experimentellen Daten wird dabei das Verständnis der physikalischen Vorgänge im Photodetektor entscheidend erweitert.

Im letzten Ergebnisteil (Kapitel 5) wird schließlich der Einfluss der Versetzungsreduktion auf die Charakteristika von MSM PD anhand von Al_{0,4}Ga_{0,6}N MSM PD auf planaren sowie ELO AlN/Saphir-Templates untersucht. Durch die grundlegend unterschiedlichen Eigenschaften zweier Generationen ELO-basierter MSM PDs wird zum einen die besondere Rolle interner verkippter AlGa_N-Heterogrenzflächen im Absorber herausgearbeitet und zum anderen schließlich ein direkter Zusammenhang zwischen Versetzungsdichte und EQE in AlGa_N-basierten Photodetektoren mit unterschiedlicher Elektrodenkonfiguration nachgewiesen.

Kapitel 1.

Grundlagen

1.1. AlGaN-Materialsystem

Die Untersuchung AlGaN-basierter MSM-Photodetektoren erfordert ein Verständnis der grundlegenden Eigenschaften von Galliumnitrid (GaN), Aluminiumnitrid (AlN) und Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN). Deshalb sollen in diesem Abschnitt, die zum Aufbau dieser Arbeit relevanten Informationen über die Kristallstruktur sowie die elektronischen und optischen Eigenschaften des Gruppe-III-Nitrid Halbleiters $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ zusammengetragen und erläutert werden.

1.1.1. Strukturelle Eigenschaften

Kristallstruktur Das Materialsystem $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ist ein ternäres Halbleitergemisch aus den binären Komponenten GaN und AlN. Das Mischverhältnis von Al- zu Ga- Atomen x_{Al} , der Aluminium-Molenbruch, wird häufig kurz als Al-Gehalt x bezeichnet. Sowohl die binären als auch die ternären III-Nitride sind polymorph, da sie sowohl in der hexagonalen Wurtzit-Struktur als auch in den kubischen Strukturen Zinkblende und Kochsalz vorliegen können [30]. Die thermodynamisch stabilste Form, in der AlGaN kristallisiert, ist jedoch die Wurtzit-Struktur. Das Wurtzit-Gitter hat eine primitive Einheitszelle mit zwei Stickstoff- (N) und zwei Metallatomen (Al oder Ga) und kann durch die Gitterkonstanten a und c beschrieben werden, die nach dem Vegard'schen Gesetz [31] linear interpoliert werden können:

$$a(x) = x \cdot a_{\text{AlN}} + (1 - x) \cdot a_{\text{GaN}} \quad \text{bzw.} \quad (1.1)$$

$$c(x) = x \cdot c_{\text{AlN}} + (1 - x) \cdot c_{\text{GaN}}. \quad (1.2)$$

Werte für a und c für GaN und AlN sind im Anhang in Tabelle A.2 angegeben.

Die Wurtzit-Struktur gehört zur Raumgruppe $P6_3mc$ und besteht aus zwei hexagonal dichtestgepackten (hcp), um $5/8$ entlang der sechszähligen Drehachse (c -Achse) verschobenen Untergittern jeder Atomsorte mit je einatomiger Basis. Daraus ergibt sich unmittelbar die Stapelfolge $aA, bB, aA, bB, \dots$ aus den Doppellagen aA bzw. bB , die wiederum aus Kationen (a bzw. b) und Anionen (A bzw. B) aufgebaut sind. Insgesamt sind die Positionen der übernächsten Nachbarn entlang der c -Achse damit nicht inversionssymmetrisch und es liegt je nach Blickrichtung eine unterschiedliche Polarität vor: Al- bzw. Ga-polar entlang der c -Achse und N-polar in entgegengesetzter Richtung ($-c$). In dieser Arbeit wird ausschließlich Ga- bzw. Al-polares Material untersucht.