

Marco Greve

Optische Spektroskopie an ultraviolett-emittierenden GaN / AlGaN-Heterostrukturen

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2003 Diplom.de
ISBN: 9783832477448

Marco Greve

Optische Spektroskopie an ultraviolett-emittierenden GaN / AlGaN-Heterostrukturen

Marco Greve

Optische Spektroskopie an ultraviolett-emittierenden GaN / AlGaN- Heterostrukturen

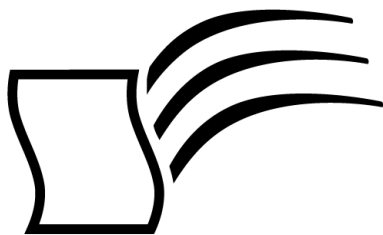
Diplomarbeit

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Fachbereich Physik und Geowissenschaften

Institut für Technische Physik

Abgabe September 2003



Diplom.de

Diplomica GmbH _____
Hermannstal 119k _____
22119 Hamburg _____

Fon: 040 / 655 99 20 _____
Fax: 040 / 655 99 222 _____

agentur@diplom.de _____
www.diplom.de _____

ID 7744

Greve, Marco: Optische Spektroskopie an ultraviolett-emittierenden GaN / AlGaIn-Heterostrukturen

Hamburg: Diplomica GmbH, 2004

Zugl.: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Technische Universität, Diplomarbeit, 2003

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH

<http://www.diplom.de>, Hamburg 2004

Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	5
1 Theoretische Grundlagen	7
1.1 Grundlegendes zu Halbleitern	7
1.1.1 Effektive Massen und Bandstruktur	7
1.1.2 Eigenleitung und Störstellenleitung	9
1.1.3 Energetische Verteilung der Ladungsträger und Zustandsdichte	10
1.1.4 Direkte und indirekte Halbleiter	11
1.2 Niederdimensionale Halbleiterheterostrukturen	13
1.2.1 Energiequantisierung und Zustandsdichte in dimensionsreduzierten Halbleiterstrukturen	13
1.2.2 Quantenfilmstrukturen unter dem Einfluss elektrischer Felder	16
1.3 Eigenschaften der Gruppe III-Nitride	17
1.3.1 Kristallstrukturen	17
1.3.2 Bandstruktur	19
1.3.3 Optische Eigenschaften	20
1.3.4 Elektrische Felder in Gruppe III-Nitriden	23
2 Optische Untersuchungsmethoden	26
2.1 Spektroskopische Ellipsometrie	26
2.1.1 Prinzip der Ellipsometrie	27
2.1.2 Ellipsometer mit rotierendem Analysator	28
2.1.3 Simulation der effektiven dielektrischen Funktion von Schichtsystemen	30
2.1.4 Experimenteller Aufbau	33
2.2 Photolumineszenz (PL)	36
2.2.1 Elektron-Loch-Paar-Erzeugung und -Rekombination	37
2.2.2 Experimenteller Aufbau	38
2.2.3 Linienformmodelle	44

3	Untersuchungen an GaN- und AlGaIn-Volumenschichten	45
3.1	Herstellung und Struktur der untersuchten Proben	45
3.2	Charakterisierung der GaN-Probe	48
3.2.1	Temperaturabhängige PL-Messungen	49
3.2.2	Ellipsometrische Messungen	52
3.3	Komposition der AlGaIn-Schichten	54
3.4	Linienbreiten exzitoner Lumineszenz	62
3.4.1	Ergebnisse der PL-Messungen	62
3.4.2	Modellierung der Halbwertsbreite	65
3.5	Lokalisierung von Exzitonen in AlGaIn	68
3.5.1	Ergebnisse der temperaturabhängigen PL-Messungen . . .	68
3.5.2	Ermittlung der Lokalisierungsenergie	70
4	Untersuchungen an GaN/AlGaIn-Quantenfilmstrukturen	74
4.1	Wachstumsparameter und Struktur der Proben	74
4.2	Lumineszenz bei tiefer Temperatur	76
4.2.1	Ergebnisse der PL-Messungen	76
4.2.2	Vergleich mit Modellrechnungen	80
4.2.3	„Störlumineszenz“ und Optimierungsversuche	86
4.3	Temperaturaufgelöste PL-Messungen	88
4.3.1	Temperaturabhängigkeit der Lumineszenzintensität	88
4.3.2	Linienpositionen in Abhängigkeit von der Temperatur . . .	90
	Zusammenfassung und Ausblick	93
	Anhang	96
	Literaturverzeichnis	98
	Danksagung	107

Einleitung

Die binären Halbleitermaterialien Aluminiumnitrid (AlN), Galliumnitrid (GaN) und Indiumnitrid (InN) bilden die Basis des Materialsystems der Gruppe III-Nitride, das ein großes Anwendungspotential insbesondere im Bereich optoelektronischer Bauelemente besitzt. Durch Legierungsbildung der binären Ausgangskomponenten lassen sich direkte Bandlücken im ausgedehnten Bereich von etwa 0.8 bis 6.1 eV bei Raumtemperatur realisieren. Dies macht die Gruppe III-Nitride zu einem vielversprechenden Kandidaten, der, im Gegensatz zu den konventionellen III-V-Halbleitern wie beispielsweise Galliumarsenid (GaAs), auch den kurzwelligen sichtbaren und den ultravioletten (UV) Spektralbereich abdeckt.

Obwohl Juza und Hahn [6] bereits 1938 erstmals die Synthese von GaN gelang, wurde die Forschung auf diesem Gebiet lange Zeit aufgrund der schlechten Probenqualität erschwert. Erst durch Anwendung der Gasphasenepitaxie mit anfänglicher Abscheidung einer Nukleationsschicht [7] gelang in den 1980er Jahren die Herstellung qualitativ höherwertiger Schichten. In den 1990er Jahren folgte dann eine rasante Entwicklung GaN-basierter elektronischer Bauelemente. Bei den schon erwähnten optoelektronischen Bauelementen wurden sowohl Leuchtdioden (LEDs) [1] als auch Laserdioden (LDs) [2] realisiert. Der Einsatz von blau statt rot-emittierenden LDs z.B. für das Auslesen optischer Speichermedien wie DVDs verspricht eine deutliche Steigerung der Speicherdichte infolge der besseren Fokussierbarkeit des kurzwelligeren Lichtes.

Neben dem Einsatz in Lichtemittern ist das Materialsystem auch für die Herstellung von UV-Detektoren interessant [3]. Eine unerwünschte Empfindlichkeit für sichtbares Licht kann hier aufgrund der realisierbaren hohen Bandlückenenergie ausgeschlossen werden, weshalb man auch von „solar-blind detectors“ spricht.

Eine große Bandlückenenergie verhindert neben ungewollter optischer auch thermische Generation von Überschussladungsträgern, was die Gruppe III-Nitride für Anwendungen im Bereich von Hochleistungs- [4] und Hochtemperaturbauelementen [5] prädestiniert.

Trotz der bemerkenswerten Erfolge bei der Herstellung GaN-basierter Bauelemente und der Vielzahl von Untersuchungen, die an diesem Materialsystem durch-

geführt wurden, sind bei weitem noch nicht alle involvierten Mechanismen und fundamentalen physikalischen Eigenschaften der Gruppe III-Nitride verstanden. Da bei den meisten Anwendungen die ternären Verbindungen eine wichtige Rolle spielen, ist ein grundlegendes Verständnis ihrer strukturellen, elektronischen und optischen Eigenschaften essentiell, um Bauelemente mit verbesserten Eigenschaften zu realisieren.

Diese Arbeit beschränkt sich dabei auf die Untersuchung des Mischungshalbleiters $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, wobei der Grenzfall $x = 0$, also reines Galliumnitrid, eingeschlossen ist. AlGaN findet insbesondere als Barrierenmaterial in Quantenfilmstrukturen Anwendung, bei denen die aktive Schicht beispielsweise aus GaN besteht. Ziel dieser Arbeit war zunächst die Charakterisierung von Volumenmaterial. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollten dann als Basis für die außerdem durchgeführten Untersuchungen an GaN/AlGaN-Quantenfilmstrukturen dienen. Die eingesetzten optischen Untersuchungsmethoden - temperatúraufgelöste Photolumineszenz (PL) und spektroskopische Ellipsometrie - bieten die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Probencharakterisierung, die insbesondere Informationen über die Bandstruktur des Halbleiters liefert. Die Ellipsometrie erlaubt zusätzlich die Ermittlung von Schichtdicken.

Die vorliegende Arbeit ist in vier Kapitel gegliedert. Das erste befasst sich mit den relevanten theoretischen Grundlagen, während das zweite die angewandten Untersuchungsmethoden sowohl prinzipiell als auch in ihrer konkreten experimentellen Realisierung erläutert. Die Ergebnisse der Messungen an GaN- und AlGaN-Volumenschichten sind Gegenstand von Kapitel 3. Der untersuchte Satz von Proben unterschiedlichen Aluminiumgehaltes lässt es dabei zu, interessante Größen wie die PL-Linienbreite oder die Lokalisierungsenergie von Exzitonen kompositionsabhängig zu betrachten. Die Arbeit schließt mit der Vorstellung der Resultate aus den Messungen an GaN/AlGaN-Quantenfilmstrukturen. Deren Lumineszenzeigenschaften werden im Hinblick auf die Quantenfilmdicke sowie auf die Wachstumsparameter bei der Herstellung der Strukturen untersucht.

Kapitel 1

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die für die vorliegende Arbeit relevanten physikalischen Grundlagen behandelt werden. Nach einigen allgemeineren Anmerkungen zu Halbleitern im ersten Abschnitt befasst sich der zweite mit den speziellen Eigenschaften niederdimensionaler Halbleiterheterostrukturen. Schließlich wird im letzten Abschnitt des Kapitels das Materialsystem der Gruppe III-Nitride vorgestellt.

1.1 Grundlegendes zu Halbleitern

1.1.1 Effektive Massen und Bandstruktur

Ein Elektron bzw. Loch im periodischen Gitterpotential wird durch eine äußere Kraft $\vec{F}$ relativ zum Gitter so beschleunigt, als wäre seine Masse gleich seiner sogenannten effektiven Masse m^* . Es gilt also die Bewegungsgleichung

$$\vec{F} = m^* \cdot \frac{d\vec{v}_g}{dt}$$

mit der Gruppengeschwindigkeit $\vec{v}_g$ der die Elektronen- bzw. Lochbewegung beschreibenden Wellenpakete. Die effektive Masse ist mit der Bandstruktur $E(\vec{k})$ über die Beziehung

$$m^* = \hbar^2 \left(\frac{d^2 E}{dk^2} \right)^{-1} \quad (1.1)$$

verknüpft. Abb. 1.1 zeigt beispielhaft den schematischen Verlauf von Valenz- und Leitungsband eines sogenannten direkten Halbleiters in der Umgebung von $k = 0$, also im Zentrum der 1. Brillouinzone. Auf die Unterscheidung zwischen direkten und indirekten Halbleitern wird in Abschnitt 1.1.4 noch näher eingegangen. Die

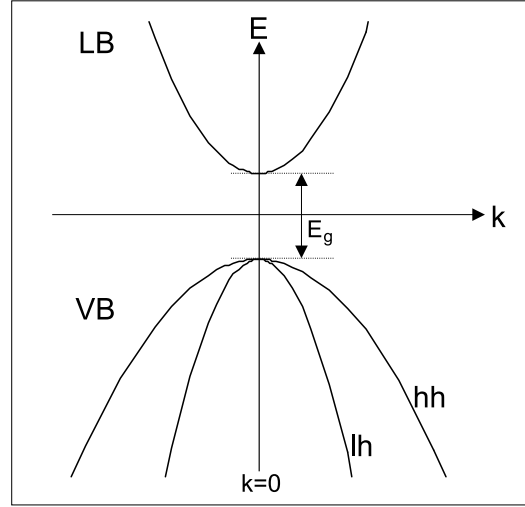


Abbildung 1.1: Schematischer Bandverlauf eines direkten Halbleiters mit der Bandlücke E_g im Bereich des Zentrums der 1. Brillouinzone.

Entartung des Valenzbandes ist aufgehoben, und man beobachtet Bänder unterschiedlicher Krümmung. Nach Gl. (1.1) ist m^* gerade umgekehrt proportional zur Bandkrümmung, was die Benennung der Valenzbänder als Schwerloch- (hh) bzw. Leichtlochband (lh) erklärt.

Im einfachsten Fall einer isotropen, parabolischen Bandstruktur gilt:

$$E(\vec{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}.$$

In diesem Fall ist m^* ein Skalar und die Flächen konstanter Energie im $\vec{k}$ -Raum sind Kugeloberflächen. Im allgemeinen jedoch ist die Bandstruktur anisotrop, d.h. die effektive Masse ist ein Tensor der Form

$$m_{ij}^* = \hbar^2 \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k_i \partial k_j} \right)^{-1}.$$

Durch Hauptachsentransformation erreicht man, dass gilt:

$$m_{xy}^* = m_{xz}^* = m_{yz}^* = 0.$$

Mit der Umbenennung $m_{xx}^* \equiv m_x^*$, $m_{yy}^* \equiv m_y^*$, $m_{zz}^* \equiv m_z^*$ erhält man für den Bandverlauf

$$E(\vec{k}) = \frac{\hbar^2}{2} \left(\frac{k_x^2}{m_x^*} + \frac{k_y^2}{m_y^*} + \frac{k_z^2}{m_z^*} \right).$$