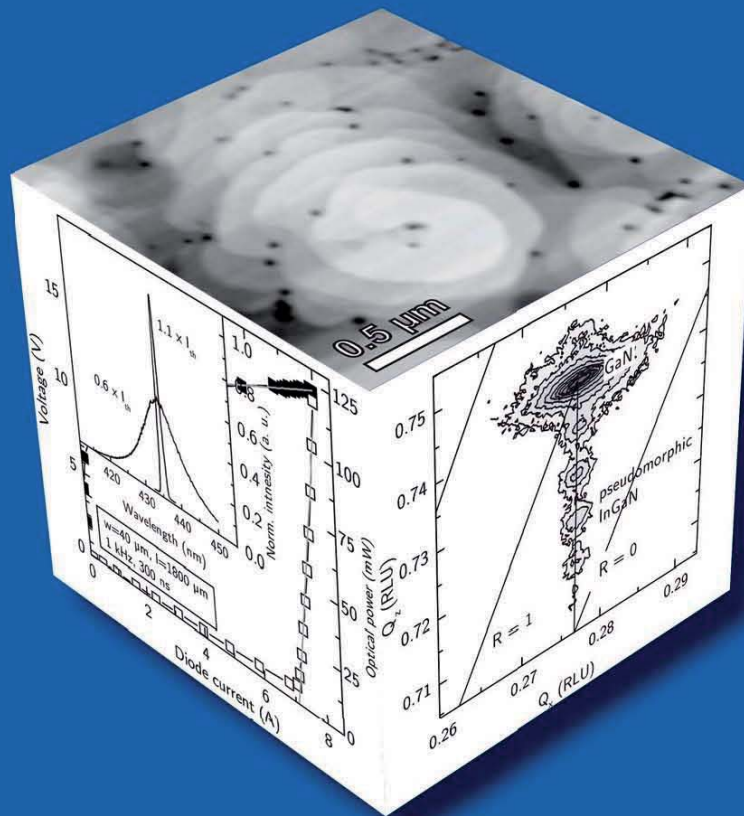


MOVPE growth and characterization
of (In,Ga)N quantum structures
for laser diodes emitting at 440 nm









aus der Reihe:

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

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

Band 19

Veit Hoffmann

MOVPE growth and characterization of (In,Ga)N quantum structures
for laser diodes emitting at 440 nm

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



Innovations with Microwaves and Light

Research Reports from the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

Preface of the Editors

Research-based ideas, developments and concepts are the foundation for progress and competitiveness, broadening the level of knowledge and technology as inventions. As innovative products and services a part of them eventually finds its way into daily routine.

Accordingly, the “*Research Reports from the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik*” series compile the institute’s latest research and developments. We would like to make these results accessible and stimulate further discussions, not least to become as many developments as possible a part of our everyday life.

The development of laser diodes in the blue and violet spectral range is interesting for numerous applications, particularly for biomedical research (e.g. fluorescence spectroscopy), 3D laser scanning, and atom spectroscopy. However, the epitaxial growth of high efficiency nitride laser diodes still represents a great challenge. This report explores the growth of InGaN quantum wells and InAlGaN separate confinement heterostructures by metal-organic vapor phase epitaxy. A thorough understanding of the group III-nitride growth processes and the control of the structural and optical properties of the active region and waveguide structure has been developed. Violet InGaN laser diodes with threshold current densities as low as 6 kA/cm^2 and first blue lasers emitting near 440 nm have been demonstrated.

We wish you an informative and inspiring reading

Prof. Dr. Günther Tränkle
Director

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich
Deputy Director

The Ferdinand-Braun-Institut

The Ferdinand-Braun-Institut researches electronic and optical components, modules and systems based on compound semiconductors. These devices are key enablers, that address the needs of today’s society in fields like communications, energy, health and mobility. Specifically, FBH develops light sources from the visible to the ultra-violet spectral range: high-power diode lasers with excellent beam quality, UV light sources and hybrid laser systems. Applications range from medical technology, high-precision metrology and sensors to optical communications in space. In the field of microwaves, FBH develops high-efficiency multi-functional power amplifiers and millimeter wave frontends targeting energy-efficient mobile communications as well as car safety systems. In addition, compact atmospheric microwave plasma sources that operate with economic low-voltage drivers are realized for use in a variety of applications, such as the treatment of skin diseases.

The FBH is a competence center for III-V compound semiconductors and has a strong international reputation. FBH competence covers the full range of capabilities, from design to fabrication to device characterization.

In close cooperation with industry, its research results lead to cutting-edge products. The institute also successfully turns innovative product ideas into spin-off companies. Thus, working in strategic partnerships with industry, FBH assures Germany’s technological excellence in microwave and optoelectronic research.



Ferdinand-Braun Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

MOVPE growth and characterization of (In,Ga)N quantum structures for laser diodes emitting at 440 nm

vorgelegt von
Diplom Physiker
Veit Hoffmann
Chemnitz

Von der Fakultät II - Mathematik und Naturwissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
Dr. rer. nat.

vorgelegte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. M. Lehmann

Gutachter: Prof. Dr. M. Kneissl

Gutachter: PD Dr. habil. A. Dadgar

Gutachter: Prof. Dr. G. Tränkle

Berlin 2011

D83



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2012

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-989-6

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012

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, 2012

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-989-6



Zusammenfassung

Die Arbeit beschreibt die Herstellung von nitrid-basierten Laserheterostrukturen im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 450 nm mittels Metallorganischer Gasphasenepitaxie. Um Bauelemente mit niedrigen Schwellstrom bzw. -leistungsdichten zu realisieren, wurden die Materialeigenschaften der Indiumgalliumnitrid (InGaN) Multi-Quantenfilme (MQW)s in der aktiven Zone untersucht und mit den Bauelementeigenschaften prozessierter optisch gepumpter Laserstrukturen und elektrisch gepumpter Laserdioden (LD)s korreliert. Weiterhin wurde untersucht, welchen Einfluss die Schichtstruktur der aktiven Zone und des umgebenden Wellenleiters auf die Materialverstärkung und die Verstärkung der Mode in der Laserstruktur hat.

Zunächst wurden 15 - 100 nm dicke InGaN Einzelschichten auf GaN/ Saphir abgeschieden und analysiert, um das InGaN Wachstum und die Entstehung von Materialdefekten zu verstehen. Das spiralförmige Winden der Wachstumsfronten um bestehende Schraubenversetzungen und die Bildung von zusätzlichen v-förmigen Oberflächendefekten wurden als hauptsächliche Ursachen für die Abnahme der kristallinen Perfektion in den InGaN Schichten identifiziert. Die Abkehr vom Stufenflusswachstum und die Bildung von stabilen Facetten mit erhöhtem Indiumeinbau führt zu einer lateralen Variation der Indiumkonzentration in den Schichten, was mittels dynamischer Elastizitätstheorie und der Untersuchung des InGaN- Wachstums auf unterschiedlich orientierten GaN/Saphir Proben erklärt wird.

Anhand von Laserstrukturen mit Emissionswellenlängen um die 400 nm wurden die Materialeigenschaften der InGaN- Quantenfilme mit den Bauelementeigenschaften korreliert: In den dünnen InGaN Quantenfilmen führt die laterale Variation der Indiumkonzentration und der InGaN- Schichtdicke aufgrund des dreidimensionalen Wachstums zu starken lateralen Variationen der Bandlücke. Systematische Untersuchungen von optisch gepumpten Laserstrukturen mit unterschiedlichen Bandkantenfluktuationen zeigten, dass mit zunehmender Variation der Bandkante die Schwellenleistungsdichte der Laser steigt. Die damit einhergehende Verbreiterung der Lumineszenzlinienbreite bei niedriger Anregungsdichte ist ein guter Indikator für die Abnahme der Materialverstärkung bei der Emissionswellenlänge. Mittels des gefundenen Zusammenhangs wurden die Wachstumsbedingungen der InGaN Quantenfilme optimiert und elektrisch gepumpte Laser mit Schwellstromdichten um 6 kA/cm^2 realisiert.

Anschließend an die Optimierung der InGaN- Wachstumsbedingungen zur Verbesserung der InGaN- Materialverstärkung wurde der Einfluss der Schichtstruktur der aktiven Zone und des GaN Wellenleiterkerns auf die modale Verstärkung des Lasers untersucht. Dafür wurden die Strukturen mit verschiedenen Lasersimulationsprogrammen modelliert und die Ergebnisse mit optischen Pumpexperimenten verglichen. Es zeigte sich, dass die Wellenleiterschichtdicke mit zunehmender Emissionswellenlänge erhöht werden muss, um die Abstrahlung der Mode insbesondere ins Substrat zu vermindern.



Neben den Anpassungen des Wellenleiters und der Optimierung der Wachstumsbedingungen erfordert die Realisierung von Lasern mit höheren Indiumgehalten in den Quantenfilmen für Emissionswellenlängen um die 440 nm eine Anpassung der Heterostruktur der aktiven Zone und einen Wechsel zu defektarmen GaN-Substraten. Mittels Messungen an optisch gepumpten Laserstrukturen und Bauelementsimulationen wird gezeigt, dass durch diese Maßnahmen die Indiumkonzentrationsfluktuationen in den Quantenfilmen reduziert, das Oszillatormoment erhöht und die Ladungsträgerinjektion in die einzelnen Quantenfilme verbessert werden kann. Eine erste elektrisch betriebene Laserstruktur, gewachsen auf GaN-Substrat mit Emission um 440 nm, zeigte eine Schwellstromdichte von $\simeq 10 \text{ kA/cm}^2$.



Contents

Zusammenfassung	iii
Contents	i
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 (Al,In,Ga)N growth challenges	2
1.3 Approach and organization of the work	4
2 Experimental	7
2.1 MOVPE growth and heterostructure layout	7
2.1.1 Sapphire-based GaN template growth	8
2.1.2 (In,Ga)N sample growth	9
2.1.3 Device heterostructure growth	10
2.2 Sample characterization methods	10
2.3 Device processing and characterization	11
2.4 Device simulation	13
3 Investigation of In incorporation in GaN	15
3.1 Sample and growth conditions variation	15
3.2 Determination of the structural properties	15
3.2.1 HR-XRD measurements	15
3.2.2 SIMS measurements	17
3.2.3 Spectrally resolved CL measurements	17
3.3 Investigation of the spatial uniformity of the material properties	19
3.3.1 Spatially resolved CL measurements	19
3.3.2 AFM and SEM measurements	20
3.4 Investigation of defects and material deterioration mechanisms	21
3.4.1 Origin of defects	22
3.4.2 Interplay between threading dislocations and spatial In mole fraction variations	22
3.5 Summary and Conclusion	25
4 Growth and characterization of InGaN quantum structures	27
4.1 Sample and growth conditions variation	27



4.2	Accurate determination of the QW properties	28
4.2.1	Experimental approach	28
4.2.2	Theoretical description of the In segregation	31
4.3	Influence of the structural properties on the luminescence	33
4.3.1	d_{QW} -dependency of the luminescence wavelength	33
4.3.2	Recombination dynamics	35
4.3.3	Investigation of lateral luminescence non-uniformities	36
4.4	Summary and conclusions	37
5	Influence of the growth parameters on InGaN material and LD device properties	39
5.1	Sample and growth conditions variation	39
5.2	Determination of the structural properties of the MQW samples	40
5.3	Characterization of the crystal perfection of the MQW samples	41
5.3.1	PL recombination dynamics	41
5.3.2	Spatial CL non-uniformities	41
5.4	Lasing of heterostructures	43
5.4.1	Gain measurements of the optical pumpable laser structures	43
5.4.2	Opto-electric characterization of the current injection LDs	43
5.5	Correlation of material properties and device characteristics	44
5.6	Summary and conclusions	45
6	Correlation of the active region material perfection with device characteristics	47
6.1	Sample and growth conditions variation	47
6.2	Investigation of the crystal perfection of the MQW samples	48
6.2.1	HR-XRD and PL characterization	48
6.2.2	AFM characterization	49
6.2.3	Correlation of morphological features with luminescence properties	50
6.3	Influence of the crystal perfection on lasing characteristics	52
6.3.1	Summary and conclusions	53
7	Extending the wavelength to 450 nm	55
7.1	Transferring the growth process from sapphire-based templates to GaN substrate	56
7.1.1	Sample variation	58
7.1.2	Determination of the wafer surface temperature	58
7.1.3	Influence of growth conditions on the wafer surface temperature	59
7.1.4	Improvement of the lateral surface temperature uniformity	60
7.1.5	Reducing the wafer curvature of GaN substrates	61
7.1.6	Summary and conclusions	63
7.2	Adjustment of waveguiding for blue LDs	63
7.2.1	Influence of cladding layer aluminum content and thickness	64
7.2.2	Adjustment of the waveguide layer	67



<i>Contents</i>	iii
7.3 Adjustment of the active region	70
7.3.1 Variation of the QW number	70
7.3.2 Adjustment of the well thickness	73
7.4 Summary	78
8 Summary and Outlook	81
Bibliography	83
List of Symbols and Abbreviations	91
List of Samples and Sample Sets	95
Danksagung	97
Lebenslauf	99
Publications	101
Refereed articles	101
Conference contributions	102