

**Strahlende und strahlungslose Rekombinationsprozesse
in Gruppe-III-Nitrid-Quantenfilmen**

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigte Dissertation

von Torsten Langer

aus Karl-Marx-Stadt (heute Chemnitz)

eingereicht am: 02.07.2014

Disputation am: 03.11.2014

1. Referent: Prof. Dr. A. Hangleiter
2. Referent: Prof. Dr. P. Michler

Druckjahr 2015

**Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik**

Berichte aus der Physik

Torsten Langer

**Strahlende und strahlungslose
Rekombinationsprozesse in
Gruppe-III-Nitrid-Quantenfilmen**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3482-0

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorveröffentlichungen der Dissertation

Einige Ergebnisse dieser Arbeit wurden bereits mit Genehmigung der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik, vertreten durch den Mentor dieser Arbeit, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

Publikationen:

- T. Langer, H. G. Pietscher, F. A. Ketzer, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, D. Menzel, and A. Hangleiter, *S shape in polar GaInN/GaN quantum wells: Piezoelectric-field-induced blue shift driven by onset of nonradiative recombination*, Phys. Rev. B **90**, 205302 (2014).
- T. Langer, A. Chernikov, D. Kalincev, M. Gerhard, H. Bremers, U. Rossow, M. Koch, and A. Hangleiter, *Room temperature excitonic recombination in GaInN/GaN quantum wells*, Appl. Phys. Lett. **103**, 202106 (2013).
- T. Langer, A. Kruse, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Strain-induced defects as nonradiative recombination centers in green-emitting GaInN/GaN quantum well structures*, Appl. Phys. Lett. **103**, 022108 (2013).
- T. Langer, H. G. Pietscher, H. Bremers, U. Rossow, D. Menzel, and A. Hangleiter, *Nonradiative recombination due to point defects in GaInN/GaN quantum wells induced by Ar implantation*, Proc. SPIE **8625**, 862522 (2013).
- T. Langer, A. Kruse, F. A. Ketzer, A. Schwiegel, L. Hoffmann, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Origin of the “green gap”: Increasing nonradiative recombination in indium-rich GaInN/GaN quantum well structures*, Phys. Status Solidi C **8**, 2170 (2011).
- T. Langer, H. Jönen, D. Fuhrmann, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Recombination of free excitons in polar and nonpolar nitride quantum wells*, J. Phys. Conf. **210**, 012056 (2010).

Tagungsbeiträge:

- T. Langer, H. G. Pietscher, F. A. Ketzer, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, D. Menzel, and A. Hangleiter, “*S-shape*” in *GaInN/GaN quantum wells: Piezoelectric-field-induced blue-shift driven by nonradiative recombination* (Vortrag), International Symposium on Compound Semiconductor, Montpellier (2014).
- T. Langer, A. Chernikov, H. Bremers, U. Rossow, D. Menzel, M. Koch, and A. Hangleiter, *Recombination rates in GaInN/GaN quantum wells: Beyond the ABC model* (Vortrag), DPG Frühjahrstagung, Dresden (2014).
- T. Langer, A. Chernikov, D. Kalincev, M. Gerhard, U. Rossow, M. Koch, and A. Hangleiter, *Radiative and nonradiative recombination in GaInN/GaN quantum wells from low to high carrier density – implications for the validity of ABC models* (Vortrag), International Conference on Nitride Semiconductors, Washington (2013).
- T. Langer, H. G. Pietscher, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, D. Menzel, and A. Hangleiter, *Nonradiative recombination due to Ar implantation induced point defects in GaInN/GaN quantum wells* (Vortrag), DPG Frühjahrstagung, Regensburg (2013).
- T. Langer, A. Kruse, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Evidence for strain-induced defects as nonradiative recombination centers in green-emitting GaInN/GaN quantum wells* (Poster), International Workshop on Nitride Semiconductors, Sapporo (2012).
- T. Langer, M. Göthlich, A. Kruse, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Evidence for strain-induced defects as dominant nonradiative recombination centers in green-emitting GaInN/GaN quantum wells* (Vortrag), DPG Frühjahrstagung, Berling (2012).
- T. Langer, A. Kruse, M. Göthlich, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Nonradiative recombination in polar and non-polar GaInN/GaN quantum wells* (Vortrag), E-MRS Spring Meeting, Nizza (2011).
- T. Langer, A. Kruse, M. Göthlich, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Nonradiative recombination in polar, nonpolar and semipolar GaInN/GaN quantum wells* (Vortrag), International Conference on Nitride Semiconductors, Glasgow (2011).
- T. Langer, A. Kruse, M. Göthlich, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Systematics of nonradiative recombination in blue and green emitting GaInN/GaN quantum wells* (Vortrag), DPG Frühjahrstagung, Dresden (2011).

-
- T. Langer, A. Kruse, F. A. Ketzer, A. Schwiegel, L. Hoffmann, H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Origin of the “green gap”: Increasing nonradiative recombination in indium rich GaInN/GaN quantum well structures* (Vortrag), International Workshop on Nitride Semiconductors, Tampa (2010).
 - T. Langer, A. D. Dräger, H. Jönen, D. Fuhrmann, H. Bremers, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Exciton enhancement of recombination mechanisms in GaInN/GaN quantum well structures* (Vortrag), DPG Frühjahrstagung, Regensburg (2010).
 - T. Langer, H. Jönen, D. Fuhrmann, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Radiative recombination of free excitons in GaInN quantum wells* (Poster), International Conference on Nitride Semiconductors, Seogwipo (2009).
 - T. Langer, H. Jönen, D. Fuhrmann, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Recombination of free excitons in polar and nonpolar nitride quantum wells* (Poster), Optics of Excitons in Confined Systems, International Conference, Madrid (2009).
 - T. Langer, H. Jönen, C. Netzel, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Radiative recombination in GaInN quantum wells investigated via time-resolved photoluminescence* (Vortrag), DPG Frühjahrstagung, Dresden (2009).
 - T. Langer, H. Jönen, L. Hoffmann, A. D. Dräger, H. Bremers, D. Fuhrmann, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Untersuchung von relaxierten und nicht-relaxierten InGaN Quantenfilmen mit Photolumineszenz und Röntgenbeugung* (Poster), DPG Frühjahrstagung, Berlin (2008).

sonstige Veröffentlichungen:

- U. Rossow, A. Kruse, H. Jönen, L. Hoffmann, F. A. Ketzer, T. Langer, E. R. Buß, H. Bremers, T. Mehrrens, M. Schowalter, A. Rosenauer, and A. Hangleiter, *Optimizing the growth process of the active zone in GaN based laser structures for the long wavelength region*, J. Cryst. Growth **370**, 105 (2013).
- J. K. Mishra, T. Langer, U. Rossow, S. Shvarkov, A. Wieck, and A. Hangleiter, *Strong enhancement of Eu^{+3} luminescence in europium-implanted GaN by Si and Mg codoping*, Appl. Phys. Lett. **102**, 061115 (2013).
- H. Jönen, H. Bremers, T. Langer, U. Rossow, and A. Hangleiter, *Large optical polarization anisotropy due to anisotropic in-plane strain in m-plane GaInN quantum well structures grown on m-plane 6H-SiC*, Appl. Phys. Lett. **100**, 151905 (2012).
- H. Jönen, H. Bremers, U. Rossow, T. Langer, A. Kruse, L. Hoffmann, J. Thalmeier, J. Zweck, S. Schwaiger, F. Scholz, and A. Hangleiter, *Analysis of indium incorporation in non- and semipolar GaInN QW structures: comparing x-ray diffraction and optical properties*, Semicond. Sci. Tech. **27**, 024013 (2012).
- U. Rossow, H. Jönen, M. Brendel, A. D. Dräger, T. Langer, L. Hoffmann, H. Bremers, and A. Hangleiter, *Growth of the active zone in nitride based long-wavelength laser structures*, J. Cryst. Growth **315**, 250 (2011).
- H. Jönen, U. Rossow, T. Langer, A. D. Dräger, L. Hoffmann, H. Bremers, F. Bertram, S. Metzner, J. Christen, and A. Hangleiter, *Growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ QW structures with high indium concentration on c-plane and m-plane surfaces by MOVPE*, J. Cryst. Growth **310**, 4987 (2008).

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	5
1 Einleitung	9
2 Einführung in die Mechanismen der strahlenden und der strahlungslosen Rekombination	13
2.1 Strahlende Band-Band-Übergänge	13
2.2 Strahlende Rekombination in GaInN/GaN-Quantenfilmen	16
2.2.1 Einfluss interner Felder	18
2.2.2 Lösung des Exzitonenproblems im feldbehafteten Quantenfilm . . .	20
2.2.3 Exzitonisches Massenwirkungsgesetz	22
2.3 Auger-Rekombination	24
2.4 Rekombination über tiefe Störstellen	25
2.4.1 Shockley-Read-Hall-Rekombination	26
2.4.2 Einfangprozesse	28
2.5 Rekombination ununterscheidbarer Ladungsträger	31
3 Experimentelle Details	33
3.1 Herstellung von GaInN/GaN Quantenfilmstrukturen	33
3.2 Optische Charakterisierung mittels zeitaufgelöster Photolumineszenzspektroskopie	34
3.2.1 Messaufbau zur zeitaufgelösten Photolumineszenzspektroskopie . .	35
3.2.2 Auswertung der Intensitätstransienten	38
4 Effizienzlimitierende Mechanismen bei niedrigen Trägerdichten	45
4.1 Verlustmechanismen grün emittierender GaInN/GaN Quantenfilme	46
4.2 Verspannungsinduzierte Defekterzeugung	50
4.2.1 Bestimmung der Verspannungsenergiegedichte	55
4.2.2 Quantitative Betrachtung des Verspannungsabbaus	56
4.2.3 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	61

4.3	Nichtstrahlende Rekombination an bewusst erzeugten Defekten	64
4.4	Fazit	72
5	Dichteabhängigkeit strahlender und nichtstrahlender Rekombinationsmechanismen	75
5.1	Experiment	75
5.1.1	Untersuchte Proben	76
5.1.2	Dichteabhängige Messung der Rekombinationsprozesse	78
5.1.3	Bestimmung der generierten Ladungsträgerdichte	79
5.2	Bestimmung der Dichteabhängigkeit strahlender und nichtstrahlender Lebensdauern	83
5.3	Nichtstrahlende Rekombination bei niedrigen Trägerdichten	87
5.4	Dichteabhängigkeit der strahlenden Rekombination	91
5.4.1	Exzitronische Verstärkung der strahlenden Rekombination	92
5.4.2	Einfluss der Abschirmung des piezoelektrischen Felds	97
5.5	Verlustprozesse bei hohen Dichten	98
5.6	Kinetik der Rekombinationsprozesse	102
6	Merkmale struktureller Inhomogenitäten im Abklingverhalten der Photolumineszenz	107
6.1	Temperaturabhängigkeit der Lumineszenz in inhomogenen Quantenfilmstrukturen	107
6.2	Spektrale Verschiebung während des Abklingens der Lumineszenz	112
6.2.1	Quasistationärer Abklingprozess	112
6.2.2	Abklingprozesse in realen Systemen	113
6.2.3	Spektraler Abklingzeitgradient bei tiefen Temperaturen	121
6.2.4	Thermisch aktivierte Auslöschung des spektralen Abklingzeitgradienten	131
6.3	Blauverschiebung bei einsetzender nichtstrahlende Rekombination	134
6.3.1	Manipulation des S-shapes via künstlich erzeugter Defekte	140
6.4	Einfluss von Inhomogenitäten auf die Lebensdauerbestimmung	146
6.5	Fazit	150
	Literaturverzeichnis	151