



**Projekt-Abschlussbericht**

**Projekt FBH 9224**

**Deep-UV LEDs**

Projekttitel:

**Epitaxie, Herstellung, und Charakterisierung von III-N  
basierenden Deep-UV LEDs mit Schwerpunkt auf dem  
UV-B bis UV-C**

Auftraggeber:	BMBF
Projektnummer:	13N9934
Projektlaufzeit:	01.07.2008 bis 30.09.2011

Freigabe:

Projektleitung:	Dr. M. Weyers
Institutsleiter:	Prof. Dr. G. Tränkle



## Teilvorhaben

# Epitaxie, Herstellung, und Charakterisierung von III-N basierenden Deep-UV LEDs mit Schwerpunkt auf dem UV-B bis UV-C

## Im Verbundvorhaben

### „Deep-UV“ LEDs auf der Basis von (AlGaIn)N/AlGaIn Quantenfilmen für den UV-A, UV-B und UV-C Wellenlängenbereich

Förderkennzeichen: 13N9934  
Laufzeit: 01.07.2008 - 30.09.2011  
Berichtszeitraum: 01.07.2008 – 30.09.2011

## Zwischenbericht

Institutsleiter: Prof. Dr. G. Tränkle

Projektleiter: Dr. M. Weyers

Bearbeiter:  
Dr. A. Knauer  
Dr. Sven Einfeldt  
Dr. Hernan Rodriguez  
Prof. Dr. M. Kneissl  
V. Küller  
T. Tessaro  
T. Petzke

## Anlage 1: Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Innerhalb des Projekts „**Epitaxie, Herstellung, und Charakterisierung von III-N basierenden Deep-UV LEDs mit Schwerpunkt auf dem UV-B bis UV-C**“ wurden folgende wichtige Ergebnisse erzielt:

Es wurden aktive Zonen für 320 nm LEDs entwickelt und in Hinblick auf die Zahl der Quantengraben und deren Dicke optimiert. Basierend auf 5xQWs wurde die p-AlGaIn Elektronensperrschicht optimiert, so dass langwellige Emission von der p-Seite unterdrückt wird.

Auf AlN-Templates des FBH wurden an der TUB LED-Heterostrukturen bei 325 nm realisiert, mit denen 0,23 mW mit 20 mA und maximale Ausgangsleistungen (begrenzt durch thermisches Überrollen) von 1 mW (bei 200 mA) erreicht wurden. Bei 300 nm konnten sogar 2,5 mW (bei 240 mA) erzielt werden. Bei on-wafer-Messungen wurden 0,55 mW bei 20 mA erzielt. Die sich daraus ergebende externe Quantenausbeute von 0,68% stellt derzeit einen internationalen Bestwert dar.

Im Rahmen einer Kooperation mit PARC (Palo Alto Research Center) wurden LEDs bei 325 nm realisiert. Dabei wurde der AlN-Puffer aus dem FBH an der TUB mit AlGaIn-Puffer ergänzt und bei PARC zur LED-Struktur komplettiert bzw. dort auf den ELO-AlN Templates des FBHs eine vollständige Struktur gewachsen. Letztere erzielten eine nochmalige Leistungssteigerung auf 0,68 mW bei 20 mA und ca. 4 mW bei 100 mA.

Es wurde eine Technologie für Mikro-LED-Arrays, die eine bessere Entwärmung des aktiven Bereichs sowie eine homogenere Strominjektion ermöglichen, entwickelt. Ebenso wurde eine Technologie für Nanopixel-LEDs entwickelt, die eine verbesserte Lichtauskopplung durch den Einsatz von Al als Reflektor ermöglicht. Anhand von Chips auf Submount montiert auf TO-Sockel wurde die komplette Technologiekette bis zum montierten Bauelement demonstriert.

Insgesamt liegt damit die komplette Prozesskette von der Simulation (schwerpunktmäßig beim Partner TU Berlin) über Epitaxie von defektreduzierten Basisstrukturen und kompletten LEDs (FBH und TU Berlin), Prozessierung und Montage (FBH) für die gezielte Entwicklung von UV-LEDs im Wellenlängenbereich um 300 nm vor.

**Veröffentlichungen in Zeitschriften und Konferenzbeiträge****Referierte Zeitschriften:**

- [1] T. Kolbe, T. Sembdner, A. Knauer, V. Küller, H. Rodriguez S. Einfeldt, P. Vogt, M. Weyers and M. Kneissl, *Carrier injection in InAlGaN single and multi-quantum-well ultraviolet light emitting diodes*, phys. stat. sol. (c) **7**, 2196-2198 (2010).
- [2] T. Kolbe, T. Sembdner, A. Knauer, V. Küller, H. Rodriguez S. Einfeldt, P. Vogt, M. Weyers and M. Kneissl, *(In)AlGaN deep ultraviolet light emitting diodes with optimized quantum well width*, phys. stat. sol. (a) **207**, 2198-2200 (2010).
- [3] T. Kolbe, A. Knauer, C. Chua, Z. Yang, H. Rodrigues, S. Einfeldt, P. Vogt, N.M. Johnson, M. Weyers and M. Kneissl, *Optical polarization characteristics of ultraviolet (In)(Al)GaN multiple quantum well light emitting diodes*, Appl. Phys. Lett. **97**, 171105 (2010).
- [4] N. Lobo, H. Rodriguez, A. Knauer, M. Hoppe, S. Einfeldt, P. Vogt, M. Weyers and M. Kneissl, *Enhancement of light extraction in UV LEDs using nanopixel contact design with Al reflector*, Appl. Phys. Lett. **96**, 081109 (2010)
- [5] H. Rodriguez, N. Lobo, S. Einfeldt, A. Knauer, M. Weyers and M. Kneissl, *GaN-based Ultraviolet Light-Emitting Diodes with Multifinger Contacts*, phys. stat. sol. (a) **207**, 2585 (2010).
- [6] V. Kueller, A. Knauer, F. Brunner, U. Zeimer, H. Rodriguez, M. Kneissl, and M. Weyers, *Growth of AlGaN and AlN on patterned AlN/sapphire templates*, J. Crystal Growth **315**, 200–203 (2011).
- [7] V. Kueller, A. Knauer, U. Zeimer, H. Rodriguez, A. Mogilatenko, M. Kneissl, and M. Weyers, *(Al,Ga)N overgrowth over AlN ridges oriented in [1120] and [1100] direction*, phys. stat. sol. (c, **8**, vol. 7-8, pp. 2022-2024 (2011)
- [8] M. Kneissl, T. Kolbe, C. Chua, V. Kueller, N. Lobo, J. Stellmach, A. Knauer, H. Rodriguez, S. Einfeldt, Z. Yang, N.M. Johnson and M. Weyers *Advances in group III-nitride-based deep UV light-emitting diode technology*, Semicond. Sci. Technol. **26**, no. 014036 (2011)
- [9] T. Kolbe, A. Knauer, C. Chua, Z. Yang, V. Küller, S. Einfeldt, P. Vogt, N.N. Johnson, M. Weyers and M. Kneissl, *Effect of temperature and strain on the optical polarization of (In)(Al)GaN ultraviolet light emitting diodes*, Appl. Phys. Lett. **99**, 261105 (2011)

**Nicht referierte Zeitschriften:**

- [1] A. Knauer, F. Brunner, T. Kolbe, V. Küller, H. Rodriguez, S. Einfeldt, M. Weyers, M. Kneissl, *MOVPE growth for UV-LEDs*, Proc. SPIE **7231-15** (2009)  
eingeladener Vortrag Photonics West, Jan. (2009).
- [2] M. Kneissl, T. Kolbe, N. Lobo, J. Stellmach, A. Knauer, V. Küller, H. Rodriguez, S. Einfeldt, and M. Weyers, *Deep UV nitride-based light emitting diodes – application and challenges*, Proc. of 6<sup>th</sup> China Int. Forum on Solid State Lighting (2009).
- [3] M. Kneissl, T. Kolbe, N. Lobo, J. Stellmach, A. Knauer, V. Küller, H. Rodriguez, S. Einfeldt, M. Weyers, *Advances in InAlGaN-based deep UV light emitting diode technologies*, Proc. LS12-WhiteLED 2010, 265 -268 (2010).
- [4] T. Kolbe, A. Knauer, J. Stellmach, C. Chua, Z. Yang, H. Rodrigues, S. Einfeldt, P. Vogt, N.M. Johnson, M. Weyers and M. Kneissl, *Optical polarization of UV-A and UV-B (In)(Al)GaN multiple quantum well light emitting diodes*, Proc. SPIE **7939-1G**, (2011)
- [5] M. Kneissl, T. Kolbe, J. Schlegel, J. Stellmach, C.L. Chua, Z. Yang, A. Knauer, V. Kueller, M. Weyers, and N. Johnson, *AlGaN-based Ultraviolet Lasers - Applications and Materials Challenges*  
Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2011), Baltimore, USA, May 01-06, paper JTub1 (2011)

**Patenteinreichungen:**

- [1] M. Kneissl, M. Weyers S. Einfeldt, H. Rodriguez, *p-Kontakt und Leuchtdiode für den ultravioletten Spektralbereich*, PCT/EP2010/060333 (2010)
- [2] M. Kneissl, N. Lobo, *Light emitting diode*, EP11 186 646.3 (2011)

---

## Fachlicher Bericht "Epitaxie, Herstellung, und Charakterisierung von III-N basierenden Deep-UV LEDs mit Schwerpunkt auf dem UV-B bis UV-C"

Zeitraum 01.07.2008 - 30.09.2011

A. Knauer, S. Einfeldt

---

Die Arbeiten am FBH wurden in enger Kooperation mit denen an der TU Berlin durchgeführt. Dabei lag der Schwerpunkt am FBH auf der Entwicklung von Epitaxieprozessen sowie der gesamten Prozesskette zur Realisierung von montierbaren Deep-UV LEDs. Die TUB beschäftigte sich mit Epitaxieprozessen insbesondere für AlGaIn-Pufferschichten aber auch von kompletten LED-Strukturen, der Simulation und dem Bauelementdesign sowie der Entwicklung technologischer Teilschritte wie Verbesserung der Lichtauskopplung durch Oberflächenstrukturierung. Die Bauelementcharakterisierung wurde von beiden Partnern gemeinsam betrieben.

Es wurden aktive Zonen für 320 nm LEDs entwickelt und in Hinblick auf die Zahl der Quantengraben und deren Dicke optimiert. Basierend auf 5xQWs wurde die p-AlGaIn Elektronensperrschicht optimiert, so dass langwellige Emission von der p-Seite unterdrückt wird.

Auf AlN-Templates des FBH wurden an der TUB LED-Heterostrukturen bei 320 nm realisiert, mit denen 0,23 mW mit 20 mA und maximale Ausgangsleistungen (begrenzt durch thermisches Überrollen) von 1 mW (bei 200 mA) erreicht wurden. Bei 300 nm konnten sogar 2,5 mW (bei 240 mA) erzielt werden. Bei on-wafer-Messungen wurden 0,55 mW bei 20 mA erzielt. Die sich daraus ergebende externe Quantenausbeute von 0,68% stellt derzeit einen internationalen Bestwert dar.

Im Rahmen einer Kooperation mit PARC (Palo Alto Research Center) wurden LEDs bei 325 nm realisiert. Dabei wurde der AlN-Puffer aus dem FBH an der TUB mit AlGaIn-Puffer ergänzt und bei PARC zur LED-Struktur komplettiert bzw. dort auf den ELO-AlN Templates des FBHs eine vollständige Struktur gewachsen. Letztere erzielten eine nochmalige Leistungssteigerung auf 0,68 mW bei 20 mA und ca. 4 mW bei 100 mA.

Es wurde eine Technologie für Mikro-LED-Arrays, die eine bessere Entwärmung des aktiven Bereichs sowie eine homogenere Strominjektion ermöglichen, entwickelt. Ebenso wurde eine Technologie für Nanopixel-LEDs entwickelt, die eine verbesserte Lichtauskopplung durch den Einsatz von Al als Reflektor erreicht. Anhand von Chips auf Submount montiert auf TO-Sockel wurde die komplette Technologiekette bis zum montierten Bauelement demonstriert.

### Epitaxieentwicklung

Die Epitaxieentwicklung am FBH wurde für die AlN-Templates und AlGaIn-Pufferschichten auf einem Mehrscheiben-Reaktor AIX2600G3-HT durchgeführt. Die Entwicklung von kompletten LED-Strukturen auf solchen Pufferschichten wurde auf einem Einzelscheibenreaktor begonnen. Damit wurde basierend auf den Simulationsrechnungen des Partners TUB die Heterostruktur entwickelt und Untersuchungen zur Zahl der Quantengraben und deren optimaler Dicke durchgeführt (siehe Bericht TUB). Das Wachstum der Komplettstrukturen sollte dann auf den Mehrscheibenreaktor überführt werden. Diese Überführung war innerhalb der Projektlaufzeit auf Grund des erheblich über den Planungen liegenden Aufwands für die Entwicklung defektarmer Templates nicht mehr vollständig möglich. Die defektreduzierten Templates bildeten die Grundlage für die Epitaxieentwicklung beim Partner TUB und wurden auch erfolgreich bei PARC für LED-Strukturen eingesetzt.

### Defektreduzierte Templates

Als Voraussetzung für effiziente Lichtemitter sind Defektdichten kleiner  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  in der aktiven Zone nötig, um interne Quanteneffizienzen größer 20% zu erzielen (siehe Veröffentlichung 8). Die zentrale Bedeutung der Defektdichte im Puffer nicht nur für die interne Quanteneffizienz sondern auch für die ausreichende Leitfähigkeit von n-dotierten Schichten mit hohem Al-Gehalt ist eine wichtige Erkenntnis des Vorhabens. Daher wurde ein erheblich höherer Aufwand in die Entwicklung defektreduzierter, löcherfreier, Al-polarer, glatter AlN – Schichten auf Saphir als Template für die folgenden aktiven Schichten investiert, als dies die ursprüngliche Projektplanung vorsah.

Auf Grund der großen Fehlanpassung der Gitterkonstanten von AlN und Saphir und der geringen Beweglichkeit der Al-Adatome auf der wachsenden Oberfläche beträgt die typische Defektdichte in AlN auf Saphir ca.  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . Durch Untersuchungen zur Abhängigkeit der Defektdichte von den Reaktorkonditionierungsbedingungen und der Einschaltsequenz der Gase gelang es in einem für hohe Temperaturen speziell ausgelegten MOVPE-Reaktor bei  $1500^\circ\text{C}$  Al-polares AlN bis zu einer kritischen Schichtdicke für Rissbildung von ca.  $1 \mu\text{m}$  mit Versetzungsdichten von  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$  abzuscheiden. Durch Optimierungen des V/III Verhältnisses konnte die Abscheidungstemperatur auf  $1400^\circ\text{C}$  abgesenkt werden. Dies verringert die thermisch induzierte Spannung beim Abkühlen der Probe und reduziert die Verkrümmung der Wafer, was nicht nur entscheidend für die Prozessierbarkeit sondern auch für die maximal mögliche rissfreie Dicke der darauf abzuschneidenden aktiven LED-Struktur ist. Die AlN-Templates dienten als Basis der Schichtstrukturentwicklung im FBH und an der TU Berlin.

Die mit planaren AlN-Templates erzielten Defektdichten erwiesen sich jedoch im Laufe des Projekts als noch zu hoch für effiziente Bauelemente. Es wurden daher verschiedene Ansätze zur weiteren Reduktion der Defektdichte untersucht.

Übergitterstrukturen aus (Al,Ga)N/(Al,Ga)N wurden beim Partner TUB erfolgreich eingesetzt. Auf solchen Übergittern konnten (Al,Ga)N-Pufferschichten mit bis zu  $8 \mu\text{m}$  Dicke rissfrei realisiert und damit Defektdichten von  $(2 \text{ bis } 5) \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  erreicht werden. Dieses Ergebnis konnte jedoch nicht auf die Reaktoren anderer Bauart am FBH übertragen werden. (Al,Ga)N-Übergitter mit 1 bis 9 nm dicken alternierenden (Al,Ga)N-Schichten mit unterschiedlicher Zusammensetzung führen im besten Fall zu einer Reduktion der Fehlanpassung des  $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{N}$ -Puffers durch Abknicken von Versetzungen in die Grenzfläche (Abb. 1) und eröffnen somit die Möglichkeit, dickere, rissfreie AlGaN-Schichten zu wachsen. Allerdings wurde die Defektdichte nicht reduziert. Durch die vielen Grenzflächen kam es im Gegenteil oft zu einer Vervielfältigung der Versetzungen.

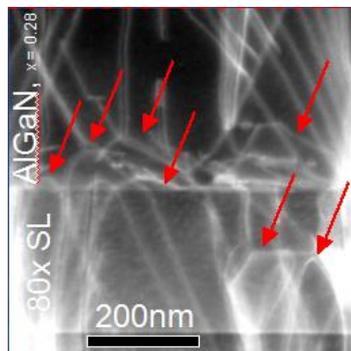
Der Ansatz, durch eine dreidimensionale (Al,Ga)N-Nukleation eine Defektreduktion zu erreichen, war erfolgreich, und es konnte in Einzelfällen eine Reduktion der Versetzungsdichte bis auf ca.  $3 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  erreicht werden. Allerdings erwies sich der Prozess als sehr stark abhängig vom Zustand des Reaktors und nicht ausreichend reproduzierbar. Die Schichten waren nur für Wellenlängen größer  $330 \text{ nm}$  transparent. Damit wurde auch dieser Ansatz verworfen.

Die geringsten Defektdichten und eine ausreichende Reproduzierbarkeit des Prozesses wurde mit dem „epitaxial lateral overgrowth“ (ELO) von AlN auf strukturierter Unterlage erzielt. Dazu wird zuerst eine AlN-Schicht von  $500 - 700 \text{ nm}$  Dicke (erlaubt rissfreie, planare AlN-Schichten auf Saphir) abgeschieden, die dann anschließend lithographisch und mit Plasmaätzen strukturiert wird. Dabei wird bis in das Saphirsubstrat hinein geätzt. Die Streifen sind in  $\langle 1100 \rangle$  ausgerichtet, da sich für Streifen in  $\langle 1120 \rangle$  eine sägezahnförmige AlN-Schichtoberfläche bildet und diese Richtung sich damit bereits bei den ersten Versuchen als ungeeignet erwiesen hat.

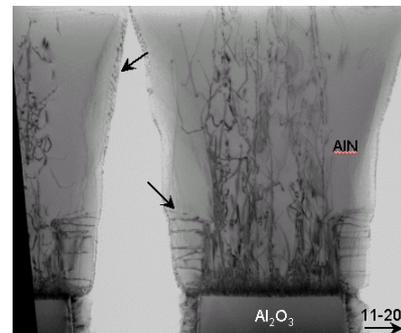
Für Streifen in  $\langle 1100 \rangle$  wurde die Koaleszenz der von den Stegen aus wachsenden AlN-Lamellen untersucht. Koaleszenz wird für hohe Wachstumstemperaturen ( $> 1400^\circ\text{C}$ ) und

geringe V/III-Verhältnisse erzielt, während zu niedrige Temperaturen zu Säulenwachstum ohne Koaleszenz führen. Über diese Parameter kann die Schichtdicke bis zur Koaleszenz gesteuert werden. Sowohl eine hohe Temperatur als auch ein kleines V/III-Verhältnis führen zu einer erhöhten Al-Mobilität auf der wachsenden c-Oberfläche und fördern damit das laterale Wachstum. Bei 1,5  $\mu\text{m}$  breiten Stegen und 1,5  $\mu\text{m}$  breiten Gräben wird bei einem V/III-Verhältnis von 190 bei 1400°C Koaleszenz nach 5  $\mu\text{m}$  und bei 1420°C bereits nach 3  $\mu\text{m}$  erreicht. Durch entsprechende Prozessführung kann eine späte Koaleszenz und damit eine hohe rissfreie Schichtdicke bis über 10  $\mu\text{m}$  erreicht werden.

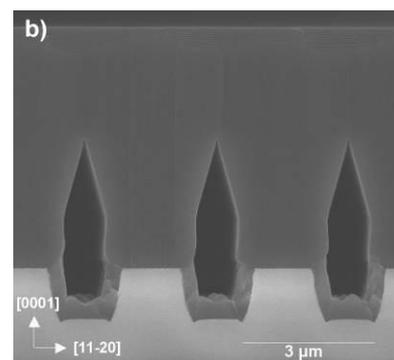
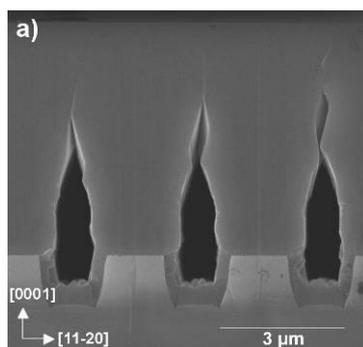
TEM-Aufnahmen illustrieren die Mechanismen der Versetzungsreduktion über gegenseitiges Anihilieren von geneigten Versetzungen mit steigender Schichtdicke des AlN sowie das Abknicken von Versetzungen im lateral wachsenden Bereich über den Gräben. Die Versetzungsdichte reduzierte sich von  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$  auf  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  (Abb. 2). Eine weitere Verringerung der Defektdichte, abgeschätzt aus den Halbwertsbreiten der Röntgen-Omega-Scans von 125 arc sec in (002) bzw. 325 arc sec in (302) Reflektion, bis auf wenige  $10^8 \text{ cm}^{-2}$  wird durch eine frühere Koaleszenz erreicht.



**Abb. 1:** TEM-Querschnittsaufnahme einer AlGaIn-Pufferschicht auf AlN/GaN short-period superlattice. Versetzungen, die abknicken, sind mit Pfeilen markiert.



**Abb. 2:** TEM-Querschnittsaufnahme von ELO-AlN auf 1,5  $\mu\text{m}$  breiten Saphirstegen. Das Abknicken von Versetzungen zur Seitenfläche ist gut zu erkennen.



**Abb. 3:** REM-Querschnittsaufnahmen von ELO-AlN gewachsen auf  
a) a-verkipptem Saphir,  
b) m-verkipptem Saphir

Neben der Streifenorientierung und den Wachstumsparametern hat sich auch die Fehlorientierung des Saphirsubstrats als wichtig herausgestellt. Auf zur m-Fläche verkippten Substraten laufen die Wachstumsstufen parallel zu den Stegen. Bei Koaleszenz entstehen dadurch Stufen von ca. 15 nm Höhe mit einer Periode von 3  $\mu\text{m}$  (Stegperiode). Beim Überwachsen mit AlGaIn bilden sich dann Facetten mit reduziertem Al-Einbau aus. Eine Verkipfung zur a-Fläche führt zu glatteren Oberflächen, da die Stufen jetzt senkrecht zu den Stegen laufen. Allerdings erfolgt in diesem Fall die Koaleszenz sehr unregelmäßig

und es bilden sich teilweise Löcher (Abb. 3). Die m-Verkippung wurde daher standardmäßig eingesetzt, um geschlossene Schichten zu erhalten. Die dadurch hervorgerufenen Gebiete mit erhöhtem Ga-Gehalt müssen beim Design der Schichtstruktur berücksichtigt werden.

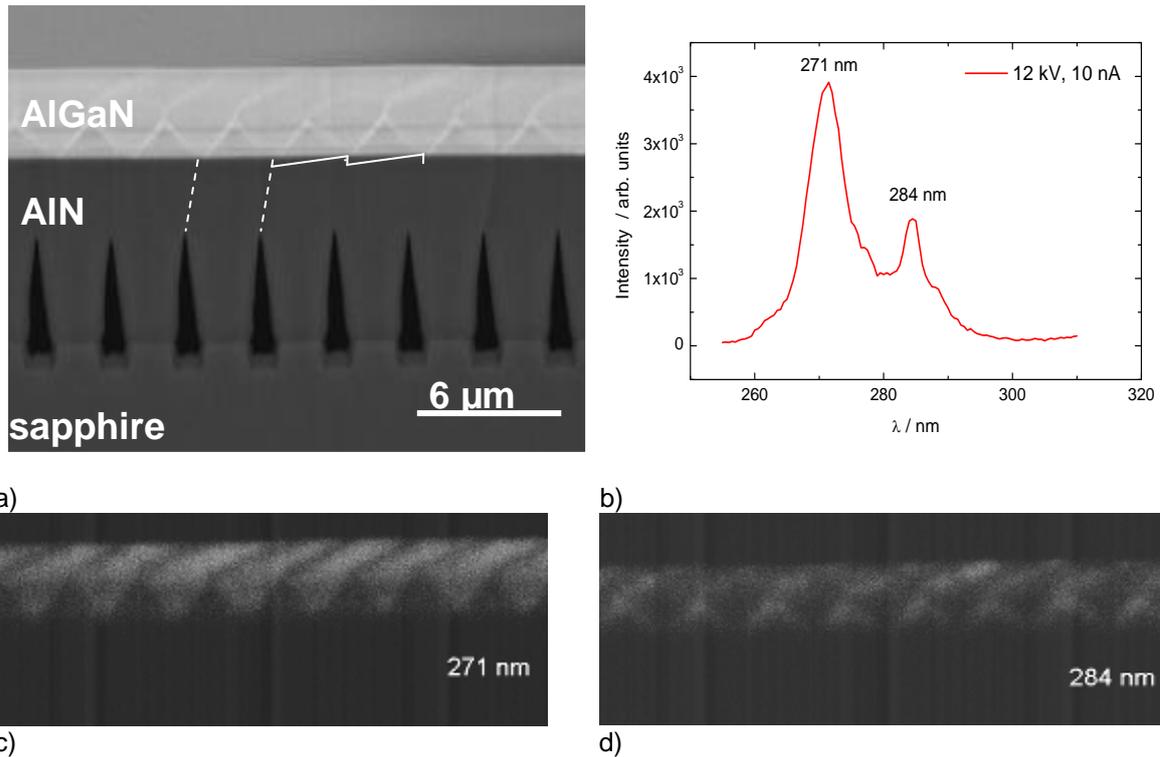
Als wichtig haben sich auch die Abmessungen der Streifen erwiesen. Eine große Grabenbreite hilft bei der Versetzungsreduktion, schwächt aber die Verbindung zwischen Schicht und Substrat. Dies kann zur Ablösung der Schicht beim späteren Wachstum der aktiven LED-Struktur führen. Bewährt hat sich ein Aspektverhältnis von 1 mit ca. 1,5 µm breiten Gräben und 1,5 µm breiten Stegen.

Insgesamt konnte im Rahmen des Vorhabens ein ELO-Prozess entwickelt werden, der eine Reduktion der Defektdichten bis in den für effiziente Bauelemente nötigen Bereich von  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  und teilweise sogar darunter erlaubt. Solche ELO-Templates wurden am FBH, an der TUB und im Rahmen einer Kooperation auch beim Palo Alto Research Center (PARC) für die Herstellung von LED-Strukturen eingesetzt.

### **n-Mantelschicht und Eignung ELO-AIN Template für 320 nm LED**

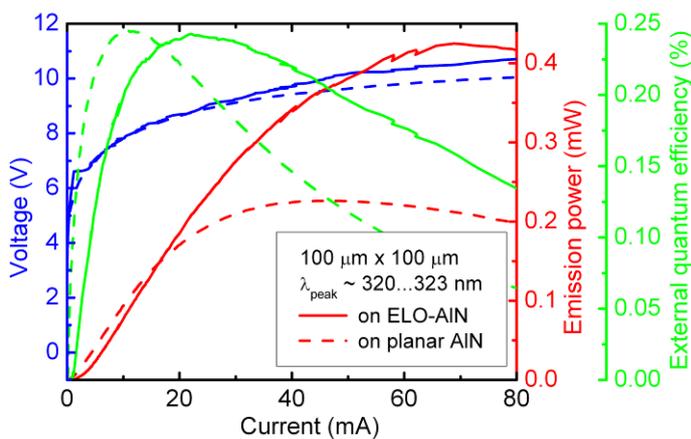
Die n-Leitfähigkeit der unteren  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Kontaktschicht wurde durch Dotierung mit Silizium erzielt. Eine freie Ladungsträgerkonzentration von  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  für  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$  ( $\mu \sim 80 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) konnte erreicht werden. Voraussetzung dafür war aber eine ausreichend geringe Defektdichte. Hohe Defektdichten führen bei gleicher Si-Konzentration zu deutlich hochohmigeren Schichten. Eine n-Dotierung im Bereich von  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  hat aber auch Einfluss auf die Kristalleigenschaften und führt zu starker Zugspannung im AlGaN, welche die kritische Schichtdicke auf planarem AlN/Saphir stark herabsetzt. Rissfrei konnten darauf nur Dicken bis ca. 1 µm abgeschieden werden. Unter Nutzung der ELO-AIN Templates können größere Schichtdicken von einigen µm Dicke rissfrei realisiert werden.

Wie bereits erwähnt, hat die Oberflächenmorphologie des ELO-AIN Templates Einfluss auf den Al-Einbau in der nachfolgenden n-AlGaN Pufferschicht. AlGaN-Schichten mit ca. 50% Al-Gehalt wurden auf glattem AlN und auf AlN mit 10 nm hohen Stufen mit 3 µm Periode abgeschieden. In den in-situ Reflexionsmessungen während der Abscheidung der Schichten zeigt sich, dass die Schichten auf den atomar glatten Templates kontinuierlich aufrauen. Auf den Oberflächen mit Stufen hingegen rauhen die Schichten bis ca. 0,7 µm Dicke stark auf und glätten mit weiterem Wachstum wieder aus. AFM-Untersuchungen zeigen eine Zunahme der Stufenhöhe auf 70 nm bei einer Schichtdicke von 0,7 µm. Das Kathodolumineszenzspektrum der Schicht zeigt zwei Peaks, die räumlich aufgelöst mit den Stufen bzw. Stufenkanten korrelieren. Auf den Stufenkanten kommt es zu facettiertem Wachstum und einem erhöhten Ga-Einbau, was einer langwelligeren Emission entspricht. Mit weiterem Schichtwachstum auf 3,5 µm Dicke reduziert sich die Stufenhöhe auf 2 bis 4 nm und die durch das ELO-Muster aufgeprägte Stufenstruktur löst sich auf. Mit Abnahme der Stufenhöhe ist der erhöhte Ga-Einbau an den Stufen geringer ausgeprägt, der spektrale Abstand der beiden CL-Peaks wird kleiner und die Zusammensetzung homogener. REM-Aufnahmen von der Spaltkante (Abb. 4a) zeigen als Helligkeitskontrast der unterschiedlichen Zusammensetzungen des AlGaN wie im Verlauf des Wachstums die Facettierung zu einer sägezahnartigen Ga-Anreicherung über den Stufen des ELO-AIN führt und an der Oberflächen als Streifen zum Vorschein kommt. Diese Ga-Anreicherung führt zu Linien mit längerwelliger Emission (Abb. 4d). Für die Emission der aktiven Zone von 310 – 350 nm ist die AlGaN-Schicht aber transparent und die Leitfähigkeit ist nicht beeinträchtigt. Diese Inhomogenität in der Zusammensetzung wirkt sich also nicht negativ auf die Bauelemente aus.



**Abb. 4:** 3,5  $\mu\text{m}$  dicke AlGaIn-Schicht auf ELO-AlN a) Rückstreuelektronenbild: gestrichelt: Verlauf der Wachstumsfront im AlN, hell: Ga-reiche Facette in AlGaIn; b) CL-Spektrum; c, d) monochromatische Abbildung bei 271 nm und 284 nm.

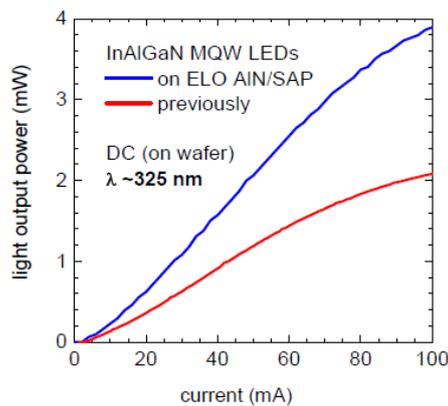
Ein Vergleich von LED-Strukturen mit Emission bei 320 nm auf planarem und defektreduziertem ELO-AlN (Epitaxie der LED-Struktur bei Partner TU Berlin) ergab eine Verdoppelung der Ausgangsleistung und der Effizienz bei hohen Strömen (Abb. 5). Durch weitere Optimierung konnte die Leistung auf 0,7 mW bei 100 mA weiter erhöht werden. Bei 302 nm wurde mit auf Templates aus dem FBH beim Partner TUB abgeschiedenen Strukturen 2,4 mW cw-Ausgangsleistung (bei 240 mA, on wafer) erreicht.



**Abb. 5:** Optische Leistung, Spannung und externe Quanteneffizienz über dem Strom von 320 nm LED-Strukturen abgeschieden auf planarem AlN und ELO-AlN, ( $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  p-Kontakt, on wafer). (LED-Heterostruktur bei Partner TU Berlin auf Unterlagen aus dem FBH aufgewachsen)

In Kooperation mit der TUB und PARC wurden LED-Strukturen für 320 nm auf einem niedriger versetzten AlN-Template mit dickem n- Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N-Puffer auf einem (Al,Ga)N-Übergitter (TDD ~ 5x10<sup>9</sup> cm<sup>-2</sup>) sowie auf strukturiertem und überwachsenem ELO-AlN abgeschieden und on-wafer ohne Maßnahmen zur Verbesserung der Lichtauskopplung vermessen. Dabei wurden mit einer LED-Struktur ähnlich der am FBH benutzten auf dem Template mit dickem AlGa<sub>0.3</sub>N-Puffer 340 µW bei 320 nm bei 20 mA cw erreicht (5fach AlInGa<sub>0.3</sub>N-MQW, on-wafer, 250 µm p-Kontaktdurchmesser). Der Einsatz des strukturierten AlN-Template als Unterlage führte nochmals zu einer deutlichen Leistungssteigerung auf 600 µW bei 325 nm bei 20 mA cw und fast 4 mW bei 100 mA (Abb. 6).

Damit sind diese Strukturen für Leistungs-LEDs geeignet.



**Abb. 6:** Lichtleistung vs. Strom von 325 nm LEDs, on wafer, cw, RT

### p-Mantelschicht und p-Kontaktschicht

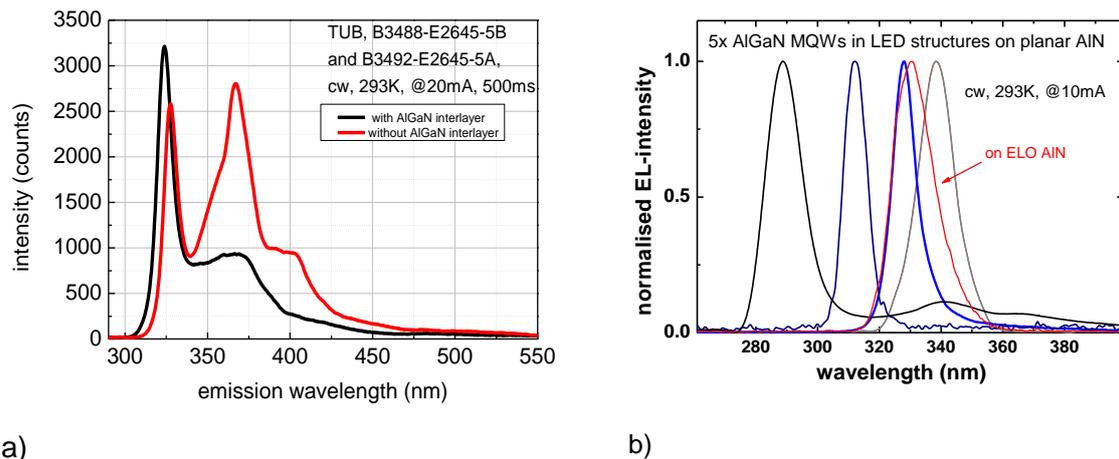
Die p-Seite der LED besteht aus einer (Al,Ga)N-Elektronenbarriere (EBL) und einem kurzperiodigen GaN/(Al,Ga)N-Übergitter sowie einer dünnen p-GaN-Kontaktschicht. Die p-Dotierung wurde durch Mg-Einbau von einigen 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> in die (Al,Ga)N-Schichten realisiert und mittels C-V, Hall-Effekt und SIMS untersucht. Der erreichte minimale Schichtwiderstand des GaN von 1 Ωcm für Mg-Konzentrationen von (1 - 4)x10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> entspricht international üblichen Werten. Die freie Ladungsträgerkonzentration bei RT beträgt ca. 5x10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>.

Bei für AlGa<sub>0.3</sub>N üblichen Abscheidungsbedingungen konnte bei Übertragung von Strukturen von der Einzelscheiben-Anlage auf die Mehrscheiben-Anlage zunächst keine p-Leitfähigkeit gemessen werden. Als Ursache dafür konnte ein erhöhter Kohlenstoffeinbau bei den für die p-Dotierung eingesetzten niedrigen Wachstumstemperaturen ermittelt werden. Nach Optimierung der Züchtungsbedingungen zur Absenkung der C-Konzentration auf ca. 1x10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> konnte p-Leitfähigkeit in Al<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.94</sub>N mit einer freien Ladungsträgerkonzentration von ca. 1x10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> gemessen werden. Untersuchungen an der Einzelscheiben-Anlage sowie beim Partner TUB zeigten, dass ein steil einsetzendes Mg-Profil zu Beginn des EBL-Wachstums entscheidend für die Löcherinjektion und somit für die Effizienz der LEDs ist. Die Übertragung der optimierten Profile auf die Mehrscheiben-Anlage konnte während der Projektlaufzeit nicht abgeschlossen werden.

Es wurden Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-Zusammensetzungen für die Elektronensperrschicht bis ca. x = 0.8 bei Züchtungsbedingungen für die p-Dotierung für LED-Strukturen mit Emissionen von 300 bis 380 nm eingefahren.

### Aktive Zonen und Kompletstrukturen

Kompletstrukturen mit  $\text{In}_{0.03}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.77}\text{N}$  /  $\text{In}_{0.03}\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.65}\text{N}$  5fach MQWs auf planarem hochversetzten AlN/Saphir-Templates und einer p-  $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.54}\text{N}$ -Elektronensperrschicht wurden auf der Einzelscheiben-Anlage abgeschieden. Es wurde die Anzahl der QWs (1-5) sowie deren Dicke (1,5 nm - 3 nm) variiert und mit Simulationsrechnungen der TUB verglichen (siehe ausführlich im Bericht der TUB). Dabei stellte sich ein Optimum für SQWs mit ca. 2 nm Dicke heraus. Zusätzlich wurde die Al-Konzentration der Elektronensperrschicht variiert und der Einfluss einer vorgelagerten ~1 nm dünnen  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ -Zwischenschicht auf die Leck-/Injektionsströme und das LED Spektrum untersucht. Eine p- $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.54}\text{N}$ -Elektronensperrschicht verringerte den Elektronenleckstrom zum p-Übergitter und erlaubte eine hinreichende p-Injektion in die QWs. Auf den defektreichen Templates bildete sich ein Zusatzpeak aus, dessen Wellenlänge mit der Bandkante des p-SL korrelierte. Dieser konnte durch die zusätzliche vorgelagerte dünne  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ -Barriere unterdrückt werden (Abb. 7a). Mit weiterer Optimierung der Zusammensetzung der Elektronensperrschicht und des Dotierprofils kann der Elektronenleckstrom über die Sperrschicht minimiert und die Löcherinjektion verbessert werden. Damit können dann LED-Strukturen bis ca. 300 nm mit Emission nur aus dem QW und nicht aus dem p-Gebiet auch ohne eine zusätzliche Zwischenschicht realisiert werden (Abb. 7b).



**Abb. 7:** EL-Spektren von unprozessierten LED Strukturen (cw on wafer) auf planarem AlN  
a) mit bzw. ohne AlGaIn interlayer zwischen MQW und EBL  
b) mit optimiertem EBL ohne AlGaIn-Zwischenschicht

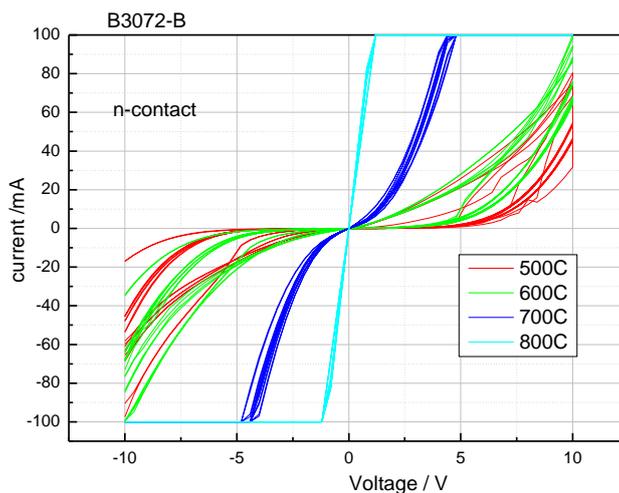
In der Mehrscheiben-Anlage wurden zunächst  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  /  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$  Fünffach-QWs für Emissionswellenlängen um 300 nm entwickelt und der Einfluss von n-Dotierung in den Barrieren untersucht. Die Emissionsleistung dieser 320 nm AlGaIn/AlGaIn MQW-Kompletstrukturen auf den hochversetzten AlN-Templates (TDD  $\sim 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ) betrug jedoch nur 40  $\mu\text{W}$  bei 20 mA cw (on wafer,  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ). EL-Spektren von unprozessierten LED Strukturen auf diesen Templates sind in Abb. 7b dargestellt. Die Zugabe von In ermöglicht hier eine deutliche Erhöhung der Ausgangsleistung, erfordert jedoch vollkommen andere Wachstumsbedingungen. InAlGaIn MQWs mit Emission bei 300 nm, die auf planaren AlN-Templates (TDD ca.  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ) beim Partner TUB abgeschieden wurden, erreichten Ausgangsleistungen von 0.23 mW @ 20 mA und maximale Ausgangsleistungen on-wafer von 1 mW.

## Entwicklung Chiptechnologie

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Chiptechnologievarianten entwickelt. Die erste Variante ist ein sogenannter Antestprozess, bei dem über eine einfache Prozessführung Bottom-Emitter-LEDs hergestellt werden, die für On-Wafer-Messungen über Nadelkontaktierung geeignet sind. Die zweite Variante ist ein sogenannter Chipprozess, mit dem Bottom-Emitter-LEDs als Einzelchips hergestellt und in Flip-Chip-Konfiguration auf strukturierte Submounts montiert werden können. Während der erste Prozess der Heterostrukturentwicklung und der Optimierung des epitaktischen Wachstums diente, wurde der zweite Prozess zur Realisierung einzelner gehäuseter LEDs verwendet. Beide Prozessvarianten beinhalten eine Mesastrukturierung und die Herstellung metallischer Kontakte auf der p- und n-Seite der Diode, so dass die Ergebnisse der entsprechenden Arbeitspakete auch bei beiden Varianten genutzt wurden.

### Mesastrukturierung und n-Kontakte

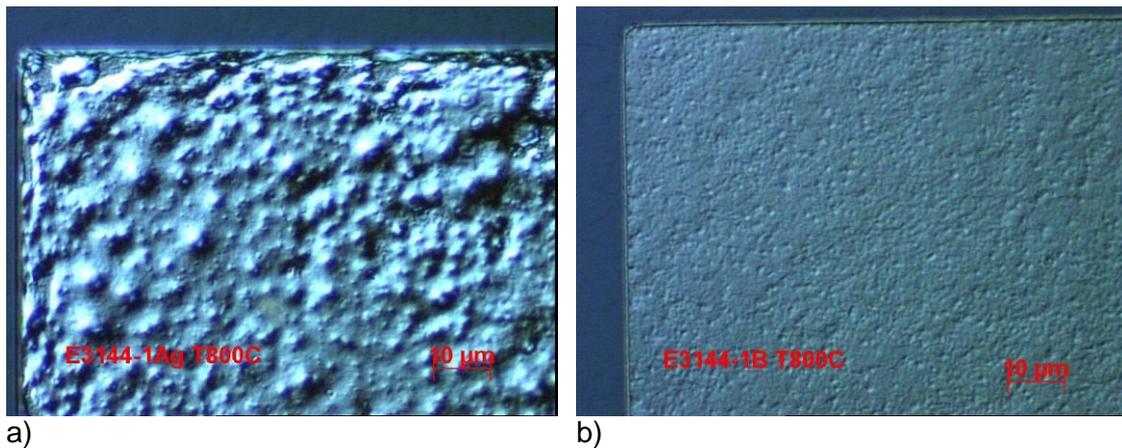
Ausgangspunkt der Optimierungen der n-Kontakte war ein Ti/Al/Mo/Au-Schichtsystem, wie es vorher für UV-A-LEDs mit einer dicken n-leitfähigen GaN-Pufferschicht verwendet wurde. In diesem Projekt wurde die Eignung dieses Kontaktsystems auf n-AlGaIn untersucht. Abbildung 8 zeigt, dass ohmsche Kontakte bei Al-Gehalten  $\leq 0.3$  möglich sind, diese aber Formierungstemperaturen von mind. 800 °C erfordern.



**Abb. 8:** U-I-Kennlinien eines Ti/Al/Mo/Au-Kontakts auf n-Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>N:Si nach Formierung bei unterschiedlichen Temperaturen.

Wie später erläutert, wurde in dem Chipprozess das Löt-pad für den p-Kontakt über dem n-Kontakt zum Halbleiter angeordnet und war nur durch eine Isolatorschicht von diesem getrennt. Damit die Isolation zuverlässig funktioniert, sind möglichst glatte n-Kontakt-Oberflächen vorteilhaft. Der oben beschriebene Ti/Al/Mo/Au-Kontakt raut durch die Formierung jedoch stark auf, wie in Abb. 9a) gezeigt. Es wurden deshalb diverse alternative Metallisierungssysteme getestet. Ohne Abstriche beim Kontaktwiderstand wurden Metallschichtfolgen mit Ni- und/oder Pt-Schichten entwickelt, deren Oberfläche deutlich glatter ist (vergleiche Abb. 9b)).

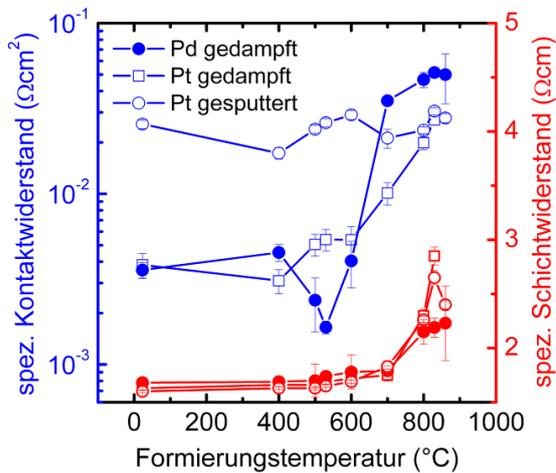
Die auf n-AlGaIn mit Al-Gehalten  $\geq 0.4$  hergestellten Kontakte zeigten selbst bei hohen Formierungstemperaturen von  $>800$  °C noch ein Schottky-Verhalten. Mit dem Ziel, den n-Kontaktwiderstand zu reduzieren, wurden Experimente zur Ionenimplantation des n-AlGaIn mit Silizium, Indium, Aluminium und Arsen vor der Kontaktmetallisierung durchgeführt. Des Weiteren wurden das Aufspütern und das Aufdampfen der Kontaktmetalle Titan und Aluminium verglichen. Diese Wege haben sich nicht als vorteilhaft erweisen, da entweder keine Reduktion des Kontaktwiderstandes beobachtet wurde oder entsprechende Kontakte bei der Formierung extrem stark aufrauen.



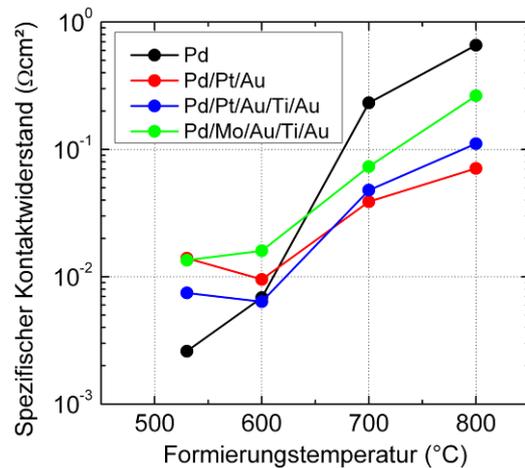
**Abb. 9:** Oberflächentopologie zweier verschiedener n-Kontakte auf  $Al_{0.4}Ga_{0.6}N:Si$  nach Formierung bei 800°C: a) Ti/Al/Mo/Au und b) Ti/Al/Mo/Ti/Ni/Au/Ti/Pt.

### p-Kontakte

Der Widerstand des p-Kontaktes hängt empfindlich von der Stöchiometrie, der kristallinen Perfektion und der Sauberkeit der p-GaN-Oberfläche ab. Technologisch ist es deshalb vorteilhaft, den p-Kontakt gleich zu Beginn der LED-Prozessierung auf die noch jungfräuliche Epitaxieoberfläche aufzubringen. Während der typischerweise verwendete Ti/Al-Kontakt auf der n-Seite eine Formierungstemperatur von  $\geq 800^\circ C$  erfordert, liegt die optimale Formierungstemperatur des Pd-Kontakts auf der p-Seite bei ca.  $530^\circ C$ . Es wurde deshalb untersucht, wie stark die Kontaktwiderstände verschiedener p-Kontakte durch die hohen Formierungstemperaturen des n-Kontaktes zunehmen. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen, dass reine Pt-Kontakte sowie Pd/Pt/Au-Kontakte bei hohen Temperaturen gegenüber Pd von Vorteil sind.



**Abb. 10:** Spezifischer Kontakt- und Schichtwiderstand von Pd- und Pt-Kontakten auf p-GaN in Abhängigkeit der Formierungstemperatur.

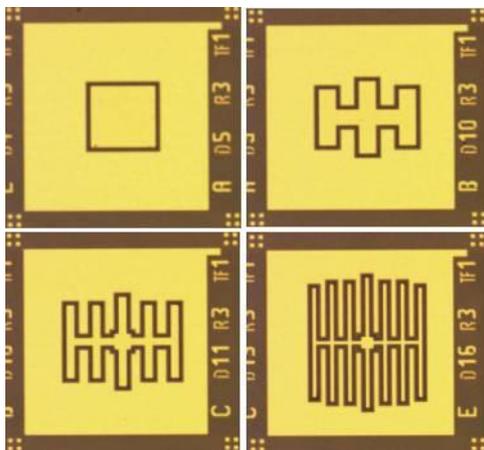


**Abb. 11:** Abhängigkeit des spezifischen Kontaktwiderstands verschiedener Metallkontakte auf p-GaN in Abhängigkeit von der Formierungstemperatur.

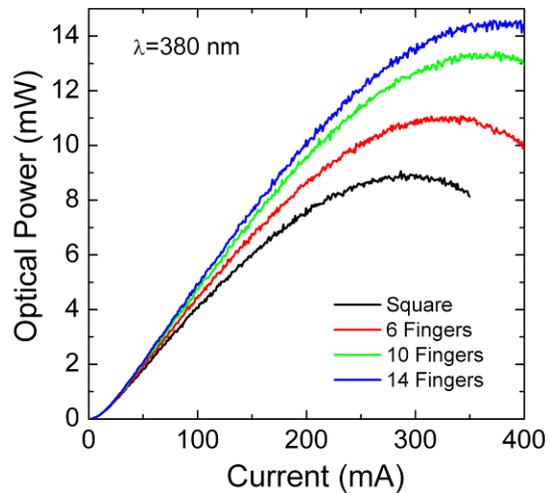
### Chipherstellung

Die Fläche des p-Kontaktes sowie dessen geometrische Form bestimmen maßgeblich die Effizienz der LED bei einem bestimmten Arbeitsstrom. Dies resultiert aus unterschiedlichen Stromdichten unterhalb des p-Kontaktes bzw. unterschiedlichen Strompfaden auf der n-Seite der Diode, die wiederum mit der Absättigung parasitärer Strompfade am p-n-Übergang, der Eigenerwärmung der LED, der Abschirmung elektrischer Felder in der akti-

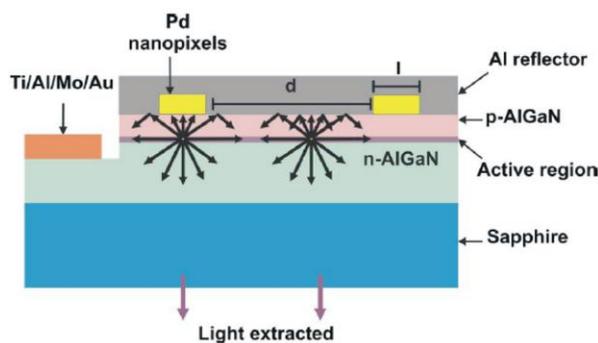
ven Zone sowie dem Überströmen von Elektronen auf die p-Seite der Diode verbunden sind. Es wurden deshalb verschiedene Geometrien des p-Kontaktes verglichen, die in Abbildung 12 gezeigt sind. Nach Abbildung 13 führen Fingerstrukturen mit reduzierter Breite zu einer höheren differentiellen Effizienz der LED im linearen Bereich der L-I-Kennlinie und zu einem thermischen Überrollen der Leistung bei höheren Strömen. In Übereinstimmung mit Simulationsrechnungen sowie ortsaufgelösten Temperaturmessungen auf solchen Strukturen resultiert dies aus der verbesserten Homogenität der Elektroneninjektion auf Grund der kürzeren Transportwege unter schmalen Fingern sowie aus einer effizienteren Abführung der Verlustwärme. Mit der Entwicklung von Matrizen aus Mikro-LEDs wurde das Konzept der strukturierten Kontakte noch weiter entwickelt. Hier wurde der p-Kontakt segmentiert, so dass eine Matrix aus LEDs mit jeweils kleiner p-Kontaktfläche entsteht, die parallel geschaltet sind.



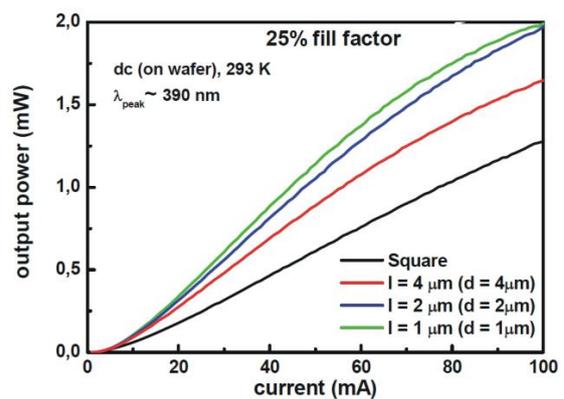
**Abb. 12:** Chiplayout mit unterschiedlich gefingerten p-Kontaktgeometrien, wobei die Gesamt-p-Kontaktfläche konstant ist.



**Abb. 13:** Leistungs-Strom-Kennlinien für verschiedenen Kontaktgeometrien mit jeweils  $0,01 \text{ mm}^2$  p-Kontaktfläche.



**Abb. 14:** Prinzip einer LED mit Nanopixel-Kontakten.

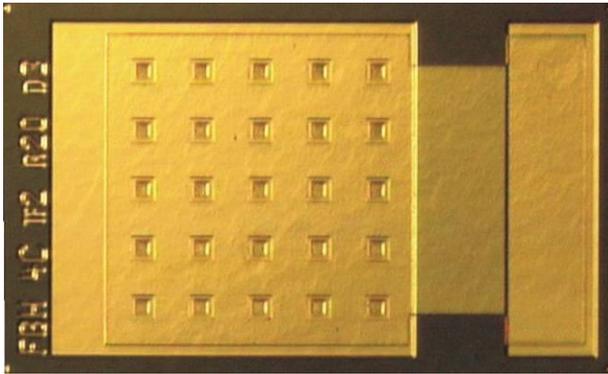


**Abb. 15:** Leistungs-Strom-Kennlinien von LEDs mit Nanopixelkontakten unterschiedlicher Pixelgröße ( $d$ ) und Pixelabstand ( $l$ ).

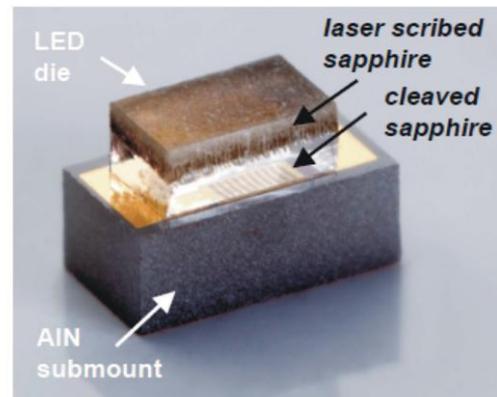
Um die Auskoppelleffizienz der UV-Strahlung aus der LED zu erhöhen wurde ein neues Konzept sogenannter Nanopixel-Kontakte entwickelt. Dabei erfolgt die Strominjektion über periodisch angeordnete Pd-Kontaktflächen und die Zwischenräume zwischen diesen „Nanopixeln“ sind mit einem Aluminiumreflektor aufgefüllt. Wenn der Strompfad signifikant in den Zwischenraum der Nanopixel aufweitet, kann die dort nach oben abgestrahlte UV-

Strahlung durch den Aluminiumreflektor zurückreflektiert und über die Rückseite des Saphirs ausgekoppelt werden (Abb. 14). Abbildung 15 zeigt Kennlinien von 390-nm-LEDs mit Nanopixelkontakten unterschiedlicher Geometrie. In Übereinstimmung mit den an der TUB durchgeführten Simulationen wurde mit abnehmenden Pixelgrößen und –abständen eine Erhöhung der Lichtausgangsleistung um 90 % gegenüber der konventionellen Geometrie mit quadratischem Kontakt erreicht.

Die im Rahmen des Projekts hergestellten LED-Chips sind für eine Flip-Chip-Montage auf strukturierte AlN-Submounts entworfen. Abb. 16 zeigt einen solchen Chip in der Draufsicht. Die p-Kontakte der Mikro-LED-Matrix sind von dem n-Kontakt umgeben. Die gesamte Matrix ist großflächig durch das p-Lötpad abgedeckt, welches vom darunter liegenden n-Kontakt durch eine Isolatorschicht getrennt ist. Das entwickelte Chipdesign ermöglicht eine großflächige und damit effiziente Abfuhr der vor allem unter dem p-Kontakt entstehenden Wärme. Zur Chipvereinzlung wurde ein Laserritzprozess entwickelt, bei dem von der Saphirrückseite ca. 200 µm tiefe Gräben geritzt werden. Das Spalten erfolgt anschließend auf einem automatisierten Scriber-Breaker. Abbildung zeigt einen entsprechenden Chip nach Flip-Chip-Montage auf einem AlN-Submount. Die Präzision der Chipvereinzlung lag bei <20 µm.



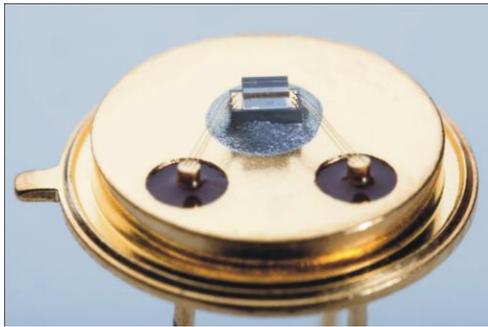
**Abb. 16:** 320-nm-LED-Chip in der Draufsicht (Größe 1000 µm x 600 µm). Der p-Kontakt ist als Matrix aus 5x5 Mikro-LEDs ausgelegt. Das p-Lötpad liegt links über dem emittierenden Bereich, das n-Lötpad rechts.



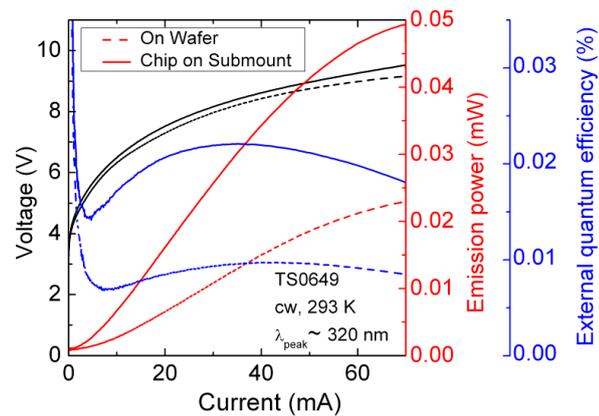
**Abb. 17:** Einzelner 320-nm-LED-Chip (Größe 1000 µm x 600 µm) flip-chip gelötet auf einem AlN-Submount (Größe 1600 x 800 µm).

### Aufbautechnik sowie Charakterisierung gehäuster Deep-UV LEDs

Als Montage auf strukturierten AlN-Submounts wurde ein Hartlötprozess mit Au-Sn entwickelt. Die Justage bei der Flip-Chip-Montage erfolgt dabei über die transparenten Seitenkanten des Saphirchips. Die Submounts wurden dann zum Zwecke des Vermessens auf TO-Sockel geklebt und anschließend drahtgebondet, wie Abb. 18 zeigt. Abbildung 19 zeigt Kennlinien einer 320-nm-LED vor der Wafervereinzlung, d. h. On-Wafer-Messungen, im Vergleich zum montierten Zustand nach der Wafervereinzlung und Flip-Chip-Montage. Durch die erhöhte Extraktionseffizienz der UV-Strahlung über die Seitenflächen des Chips steigt die Emissionsleistung an. Die Heterostruktur entspricht dabei noch nicht dem zu Projektende vorliegenden Stand, so dass die mit diesen Chips erzielten Leistungen ca. eine Größenordnung unter denen der zu Projektende (unmontiert) vorliegenden Chips liegt.



**Abb. 18:** UV-LED-Chip in Flip-Chip-Montage auf AlN-Submount und Lötung auf TO-Sockel.



**Abb. 19:** Kennlinien von 320-nm-LED-Chips gemessen On-Wafer und nach Flip-Chip-Montage auf Submount.

An entsprechenden Aufbauten wurden je nach Chipdesign thermische Widerstände im Bereich 15-40 k/W gemessen. Diese Werte stimmen gut mit Finite-Elemente-Simulationen der Temperaturverteilung überein.

Insgesamt liegt damit die komplette Prozesskette von der Simulation (schwerpunktmäßig beim Partner TU Berlin) über Epitaxie von defektreduzierten Basisstrukturen und kompletten LEDs (FBH und TU Berlin), Prozessierung und Montage (FBH) für die gezielte Entwicklung von UV-LEDs im Wellenlängenbereich um 300 nm vor.