

investigations. A defect reduction during the growth of the nanorods was observed, consistent with results from other scientific groups. The improvement of structural quality with length of nanorod was shown by cathodoluminescence (CL) measurements to be in good agreement with the TEM-analysis. However, some threading dislocations and nanocavities extended through the entire nanostructure from the nucleation site to the top facet. An increased quality of the mask patterning process and an improved nucleation process were found to avoid these kind of defects.

In addition to the growth of GaN nanorods, InGaN/GaN quantum wells and doped layers within the nanostructures are required for a working NanoLED device. Firstly, the incorporation of Indium at the different facets as well as the doping of position controlled nanostructures was demonstrated. The detailed analysis of photoluminescence (PL) and CL measurements enabled a deeper understanding on the growth mechanisms of InGaN quantum wells on the nanorod surface. The combination with TEM-analysis confirmed the core-shell like growth of the quantum wells. Therefore, the active area covered the entire surface of the nanostructures. Depending on the crystal facet the emission wavelength varied over a wide spectral range. In addition to the incorporation of Indium, n- and p-type conductivity of the grown nanostructures was also confirmed. The amount of n-type doping was estimated by electrical measurements at the IHT, TU Braunschweig by using very small conductive needles within a SEM setup. Moreover, the electroluminescence of coalesced nanostructures verified p-conductivity of the shell like p-side. These core-shell results are a first step for LEDs with significantly increased active area.

A multiplicity of new process steps - compared to conventional, two dimensional LED structures - are necessary to integrate nanorods within a fully working LED chip. For example, the NanoLEDs have to be embedded within a stable, passivating matrix with superior optical properties and the capability for production like processes.

In this thesis, fully stable LED operation of top-down etched NanoLEDs was achieved by the development of new chip process steps. The embedding material used showed perfect filling behaviour even for very small spaces. Based on the successful filling, all necessary process steps up to the electrical contacting were demonstrated, yielding excellent small current behaviour as well as forward voltages in the range of state-of-the-art devices. Finally, the possibility to check the functionality of single NanoLEDs within an ensemble of nearly 10000 simultaneously driven columns by  $\mu$ -electroluminescence measurements was enabled by using transparent indium-tin-oxide top contacts.

# Kurzbeschreibung

Die effiziente Erzeugung von Licht gewinnt immer mehr an Bedeutung. Nicht nur in der Allgemeinbeleuchtung steckt hier noch großes Potential, auch die Laufzeiten von mobilen Geräten, wie Notebooks oder Mobiltelefonen, können mit hocheffizienter Hinterleuchtung verbessert werden. Leuchtdioden aus dem Materialsystem AlInGaN entwickelten sich in den letzten Jahren zu einer Schlüsseltechnologie in diesen Sektoren. Die Effizienz von modernen Leuchtdioden ist bereits ausgezeichnet und es wird zunehmend schwieriger, diese weiter zu steigern.

Ein sehr vielversprechender Ansatz, diese Technologie näher an die theoretisch erreichbaren Grenzen zu bringen, ist der Übergang von einem zweidimensionalen Schichtaufbau zu dreidimensionalen NanoLEDs. Dieser technologisch aufwändige Schritt verspricht Vorteile, wie z.B. eine vergrößerte aktive Fläche, einen verbesserten Einbau von Indium und die Emission von verschiedenen Wellenlängen innerhalb eines einzelnen LED-Chips zur Erzeugung weißen Lichts ohne die Notwendigkeit einer Phosphorkonversion.

In den letzten 10 Jahren intensiver Forschung auf dem Gebiet der Halbleiter-Nanosäulen wurden zwar technologische Fortschritte für Wachstumsmethoden und Chipprozesse gezeigt, diese waren jedoch ausnahmslos auf spezielle Laborbedingungen zugeschnitten und für eine Produktanwendung nicht nutzbar.

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Verknüpfung aller zur Herstellung von neuartigen NanoLEDs erforderlichen Prozessschritte. Diese reichen von der Präparation der Wachstumssubstrate bis hin zur elektrischen Kontaktierung des vollständig prozessierten LED Bauelements.

Im Laufe dieser Dissertation ist erstmals das Wachstum von geordneten GaN-Nanosäulen in einer großvolumigen MOVPE-Produktionsanlage erreicht worden. Dabei wurde Nanoimprint-Lithographie als geeignete Methode für die Positionskontrolle der Nanosäulen identifiziert. Über den Stand der Technik hinaus wurde eine Prozessabfolge entwickelt, die dreidimensionale Nanostrukturen mit hohem Aspektverhältnis ohne die Notwendigkeit von gepulsten Gasen oder Katalysatoren ermöglicht. Als wesentliche Steuerungsparameter konnten die Trägergaskomposition, der Abstand zwischen den Nanosäulen, die Wachstumszeit, die Temperatur und die Kristallorientierung bestimmt werden. Die Morphologie, insbesondere das Oberflä-

chenverhältnis zwischen polaren, semipolaren und unpolaren Kristallfacetten kann so gezielt beeinflusst werden. Die Verknüpfung der Ergebnisse der verschiedenen Auswertungen ergab, dass dies im Wesentlichen aus einer Manipulation der Wachstumsraten durch eine Wasserstoffpassivierung von verschiedenen Kristallfacetten resultiert. Die bei den Experimenten gewonnenen Erkenntnisse konnten dazu genutzt werden, erstmals ein grundlegendes Verständnis für die Wachstumsmechanismen von GaN-Nanosäulen in einer MOVPE-Großvolumenanlage zu generieren. Die hervorragende Materialqualität der beiden semipolaren  $\{10\bar{1}\bar{1}\}$  und  $\{10\bar{1}\bar{2}\}$  Facetten konnte durch die strukturelle Transmissionselektronenmikroskop(TEM)-Analyse der Nanosäulen festgestellt werden. Dabei konnte, ebenso wie bei anderen Forschungsgruppen, eine Defektreduktion während des Nanosäulenwachstums beobachtet werden. Kathodolumineszenz(KL)-Messungen zeigten übereinstimmend mit den TEM-Analysen, dass mit Verlauf des Wachstums die bei der Nukleation entstandenen Defekte abnehmen und die Materialqualität zur Spitze der Nanosäule hin ansteigt. Allerdings treten in manchen Nanostrukturen auch Schraubenversetzungen und Nanokavitäten auf, welche die gesamte Säule vom Nukleationspunkt bis zur Spitze durchlaufen. Diese können durch eine Verbesserung der Maskenqualität und des Nukleationsprozesses deutlich reduziert werden.

Nach dem Wachstum von GaN-Nanostrukturen sind der Einbau von InGaN/GaN-Quantenfilmen und die Dotierung die nächsten notwendigen Schritte auf dem Weg zu einer funktionsfähigen NanoLED. Die wenigen bisher veröffentlichten Ergebnisse zur Integration von optisch aktiven InGaN-Schichten mit MOVPE wurden an selbstorganisiert gewachsenen Nanosäulen gezeigt. In dieser Arbeit konnte erstmals der Einbau von InGaN-Quantenfilmen auf verschiedensten Facetten positionskontrollierter Nanostrukturen realisiert werden. TEM-Analysen erbrachten den Nachweis, dass sich die aktive Schicht wie ein Mantel um die komplette Nanostruktur zieht (Core-Shell Wachstum). Die Auswertung von Photolumineszenz (PL)- und KL-Messungen zeigte eine variierende Emissionswellenlänge, je nach Orientierung der Wachstumsfacette. Zusätzlich zum Einbau von Indium konnte die n- und p-Leitfähigkeit an Nanostrukturen nachgewiesen werden. Hierbei wurde mit Hilfe des Nanonadelmessplatzes des IHT der TU Braunschweig eine grobe Abschätzung der Leitfähigkeit und der Höhe der n-Dotierung getroffen. Erste Elektrolumineszenzerggebnisse von koaleszierten Nanostrukturen demonstrierten darüber hinaus die funktionsfähige p-Leitfähigkeit. Die international erstmals auf geordneten Nanosäulen gezeigten Core-Shell Ergebnisse sind ein erster Schritt zu LEDs mit signifikant erhöhter aktiver Fläche.

Die Integration von Nanosäulen in einen LED-Chip benötigt - im Vergleich zur konventionellen, zweidimensionalen LED-Struktur - eine Vielzahl an neuen Prozessschritten. Die NanoLEDs müssen in eine stabile, passivierende Matrix gebettet werden, die neben ausgezeichneten optischen Eigenschaften auch für eine mögliche Fertigung geeignet sind. Dies

konnte in bisherigen wissenschaftlichen Berichten noch nicht für sämtliche Anforderungen übergreifend demonstriert werden.

In dieser Arbeit konnten elektrisch und optisch voll funktionsfähige NanoLEDs und die dazu erforderlichen Chipprozesse mit Hilfe von geätzten Nanosäulen demonstriert werden. Das dabei verwendete Einbettmaterial wies ausgezeichnete Verfülleigenschaften für Strukturen kleinster Größenordnungen auf. Darauf aufbauend konnten sämtliche notwendigen Prozessschritte bis hin zur Kontaktierung erfolgreich durchgeführt werden. Der elektrische Betrieb der NanoLEDs zeigte bei Nennstromdichte sehr gute Werte für die Vorwärtsspannung, die mit konventionellen LEDs vergleichbar ist. Durch das Aufdampfen eines transparenten Indiumzinnoxidkontaktes konnte mit Hilfe von  $\mu$ -Elektrolumineszenzaufnahmen in einem Ensemble von fast 10000 gleichzeitig bestromten Säulen die Funktion individueller NanoLEDs überprüft werden.