

Leuchtende Türme

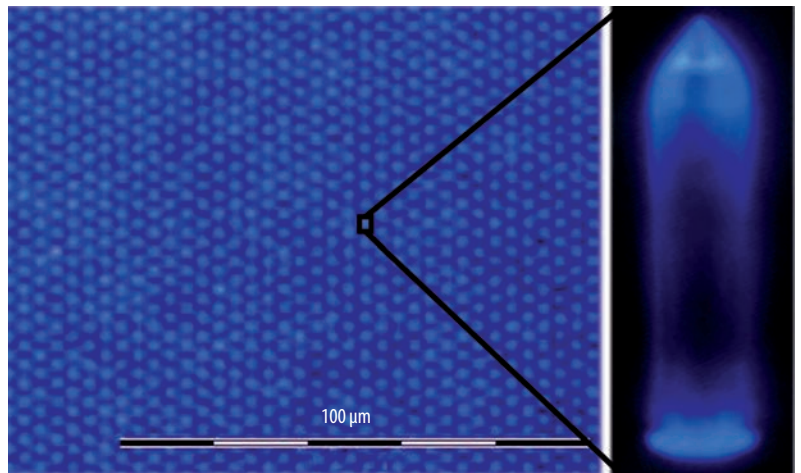
Dreidimensionale LEDs sorgen für hocheffiziente Beleuchtung.

Jana Hartmann, Andreas Waag, Adrian Avramescu und Martin Straßburg

Lichtemittierende Dioden (LEDs) haben sich als Leuchtmittel der Zukunft durchgesetzt. Sie können elektrische Energie viel effizienter in Licht umwandeln als herkömmliche Glühlampen oder Energiesparlampen. In Zukunft soll sich mit Hilfe eines dreidimensionalen Aufbaus der LEDs auf mesoskopischer Ebene der Wirkungsgrad sogar noch weiter erhöhen – bei deutlich geringeren Herstellungskosten.

Die Entwicklung von Weißlicht-LEDs ermöglichte Mitte der 90er-Jahre den Durchbruch einer völlig neuen Beleuchtungstechnologie: Solid State Lighting. Seitdem wurden LEDs aus Galliumnitrid (GaN) und Indiumgalliumnitrid (InGaN) Schritt für Schritt weiter entwickelt. Die aktive InGaN-Schicht in der LED selbst emittiert blaues Licht, das Leuchtstoffe wie Phosphor teilweise in gelbes Licht konvertieren – so entsteht weißes Licht. Dabei hatten in den späten 80er-Jahren nur wenige Forscher geglaubt, dass GaN sich als Halbleitermaterial für LEDs eignen könnte, weil es zu viele Probleme gab – von der Herstellung der Kristalle bis zur passenden Dotierung. Doch einige japanische Wissenschaftler gaben nicht auf und entwickelten die entscheidenden Prozessschritte: Sie ließen GaN kristallin auf Saphir aufwachsen und konnten es sowohl n- als auch p-dotieren. So entstand 1992 die erste blaue GaN/InGaN-LED [1]. Für diese Entwicklung erhielten Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura 2014 den Physik-Nobelpreis [2]. Nachdem sich die Forschung über ein Jahrzehnt lang vor allem auf die Steigerung der Ausgangsleistung fokussierte, entbrannte in den frühen 2000ern ein Wettrennen um Effizienzrekorde. Heutzutage erreichen kommerzielle GaN-Weißlicht-LEDs Effizienzen von über 160 lm/W, die besten Labormuster erzielen sogar über 300 lm/W [3]. Im Vergleich dazu schaffen typische Glühlampen nur 10 bis 20 lm/W: Sie benötigen für dieselbe Lichtmenge also über zehnmal mehr elektrische Energie (Infokasten „Lichtausbeute und Lichtstrom“).

Leuchtdioden für die Allgemeinbeleuchtung bestehen aus einer lichtemittierenden, sehr dünnen Schicht aus InGaN, die in einen pn-Übergang eingebettet ist. In dieser Schicht treffen freie Ladungsträger – Elektronen und Löcher – zusammen und rekombinieren vorwiegend strahlend, d. h. unter Aussendung eines Photons. Die Energie der Photonen, und damit die Farbe des Lichts, entspricht der Energie der Bandlücke



Etwa eine Million dreidimensionale Kern-Mantel-LEDs passen auf eine Fläche von einem Quadratmillimeter.

der InGaN-Schicht. Aufgrund der Quantentrog-Struktur von InGaN treten Quantisierungsenergien auf und modifizieren diesen Wert weiter. Die aktive, leuchtende Schicht besteht aus einem oder mehreren Quantentrögen, weshalb die eingepprägten Bandverläufe und die damit verbundenen Potentialverläufe sowohl Elektronen als auch Löcher lokalisieren (Abb. 1). Dieses Design ermöglicht eine sehr effiziente strahlende Rekombination, die üblicherweise im blauen Spektralbereich bei etwa 450 nm liegt.

Eine herkömmliche planare LED besteht aus einem Schichtstapel (Abb. 2a). Auf einem Substrat befindet sich die n-dotierte GaN-Schicht, darauf der InGaN-Quantentrog und die p-dotierte GaN-Schicht. Diese blau emittierenden Leuchtdioden werden mit Hilfe von Konvertern zu Weißlicht-LEDs. Die hohen Effizienzen von 160 lm/W sind allerdings aufgrund des „Efficiency Droop“ nur bei relativ geringen Stromdichten möglich

KOMPAKT

- Konventionelle zweidimensionale LEDs erreichen hohe Effizienzen nur bei geringen Stromdichten.
- Neuartige 3D-LEDs besitzen aufgrund ihrer dreidimensionalen GaN-Strukturen größere lichtemittierende Flächen und könnten höhere Lichtleistungen erzielen.
- Daneben weisen sie geringere Defektdichten auf, und strahlende Rekombination findet schneller statt.
- Weltweit arbeiten Forschergruppen daran, die 3D-LEDs herzustellen und zu analysieren.

Dipl.-Ing. Jana Hartmann und Prof. Dr. Andreas Waag, Institut für Halbleitertechnik, TU Braunschweig, Hans-Sommer-Straße 66, 38106 Braunschweig, Dr. Adrian Avramescu und Dr. Martin Straßburg, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Leibnizstr. 4, 93055 Regensburg

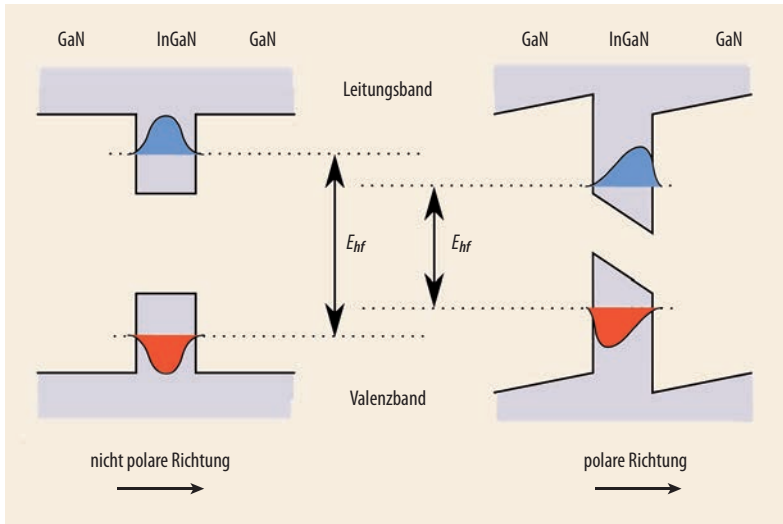


Abb. 1 Der Bandverlauf eines InGaN-Quantentrogs in GaN zeigt, dass die Bandlücke zwischen Leitungs- und

Valenzband ohne Polarisationsfelder (links) größer ist als mit Polarisationsfeldern (rechts).

(Infokasten „Efficiency Droop“). Für höhere Lichtleistungen ist es daher erforderlich, mehr Chipfläche zu investieren und damit deutlich höhere Kosten in Kauf zu nehmen. Damit ist die aus der Silizium-Technologie bekannte schrittweise Miniaturisierung als übliche Kostenreduktionsstrategie in der Elektronik für konventionelle planare LEDs nicht anwendbar.

Hier bieten dreidimensionale Leuchtdioden einen Ausweg: Sie werden nicht als planare Schichtenfolge, sondern als dreidimensionale Strukturen wie Türme aufgebaut – zum Beispiel als Nanodrähte oder mesoskopische Säulen (Abb. 2b). Auf einer maskierten ebenen Oberfläche werden 3D-Strukturen aufgewachsen. Um die als Säule gewachsenen, vertikal stehenden und n-dotierten Kerne der 3D-Strukturen werden Mantelschichten aus InGaN und p-GaN abgeschieden. Die Säulen können einen Durchmesser von 20 Nanometern bis zu einigen Mikrometern und Höhen von wenigen 100 Nanometern bis hin zu mehreren 10 Mikrometern erreichen. Ziel ist es, Säulen mit großen Aspektverhältnissen zu erzeugen, d. h. ihre Höhe ist möglichst groß im Vergleich zu ihrem Durchmesser. Typische Werte liegen in der Größenordnung von zehn, aber auch Aspektverhältnisse von über 100

ließen sich schon erreichen. Im Vergleich dazu besitzt das höchste Gebäude der Welt, der Burj Khalifa in Dubai, bei einer Höhe von 828 Metern nur ein Aspektverhältnis von ungefähr fünf. Die gesamte Oberfläche des „Halbleiter-Turms“ steht zur Verfügung, um Licht zu generieren – der größte Vorteil des 3D-Konzepts gegenüber herkömmlichen 2D-LEDs.

Konventionelle Methoden für 2D-LEDs

Die (Al,In,Ga)N-Schichtstrukturen einer planaren LED werden auf Wafern aus Saphir mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) großflächig abgeschieden. Bei der MOVPE handelt es sich um ein Wachstumsverfahren, bei dem sich einkristalline Halbleiterschichten durch die Reaktion von Molekülen aus der Gasphase auf einem beheizten Substrat abscheiden. GaN-Wafer wären qualitativ wesentlich besser als Substrat geeignet, stehen bislang jedoch nicht großflächig und kostengünstig zur Verfügung. Folglich müssen 2D-LEDs auf Substraten aus anderen Materialien aufgewachsen werden – die LEDs entstehen mittels Heteroepitaxie. Dadurch bilden sich verstärkt null- und vor allem eindimensionale Kristalldefekte (sog. Versetzungen) aus, welche die Kristallqualität und damit die Funktionsweise des Bauteils beeinträchtigen können. In heutigen konventionellen LEDs lassen sich die Defekte durch das Wachsen dickerer Pufferschichten und mittels komplexer Schichtfolgen und Wachstumsprozesse deutlich reduzieren. Die p- und n-leitenden Schichten entstehen dabei durch die Dotierung mit Magnesium bzw. Silizium. Die Dotierstoffkonzentration und somit die Leitfähigkeit sind jedoch auf Werte unterhalb der Mott-Dichte beschränkt, da zu hohe Dotierungskonzentrationen – wie auch in anderen Breitbandhalbleitern – die Kristallqualität beeinflussen. Oberhalb der Mott-Dichte wird das Coulomb-Potential der Donatoren und Akzeptoren so sehr abgeschirmt, dass für die Elektronen und Löcher keine gebundenen Zustände mehr vorliegen. Das Fermi-Niveau befindet sich dann innerhalb eines Bands, und der Halbleiter wird metallisch.

Die Kristallqualität ist für die lichtemittierende Schicht von höchster Bedeutung. Dabei wirken sich die unterschiedlichen Gitterkonstanten von InGaN und GaN, eine inhomogene Indiumverteilung im InGaN und der unerwünschte Einbau von Punktdefekten als nichtstrahlende Rekombinationszentren am negativsten auf die Effizienz aus. Auch die Polarität des Kristalls beeinflusst die Effizienz. GaN hat eine hexagonale Kristallstruktur, die polare, semipolare und nicht polare Richtungen aufweist. Meist wächst GaN auf Saphir in der polaren [0001]-Richtung, sodass hier der „Quantum-Confined Stark Effect“ auftritt: Durch unterschiedliche Gitterkonstanten von GaN und InGaN kommt es zu internen Verspannungen und somit zu einer piezoelektrischen Polarisation. An den Grenzflächen entstehen Polarisationsladungen, die ein elektrisches Feld hervorrufen, das die Bänder

LICHTAUSBEUTE UND LICHTSTROM

Die **Lichtausbeute** einer Lampe wird in Lumen pro Watt (lm/W) angegeben, was dem emittierten Lichtstrom (in Lumen, lm) pro elektrischer Leistungsaufnahme (in Watt, W) entspricht.

Der **Lichtstrom** ist ein Maß für die Menge an sichtbarem Licht. Menschen können zwar elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen zwischen 380 und 780 nm wahrnehmen, doch die Empfindlichkeit unserer Augen variiert stark innerhalb dieses Bereichs: In heller Umgebung nehmen wir Licht mit 555 nm Wellenlänge am empfindlichsten wahr, wohingegen Licht mit

380 nm bei gleicher Strahlungsleistung nur noch für einen kleinen Bruchteil dieser maximalen Helligkeitsempfindung sorgt. Aus diesem Grund muss für die Bestimmung des Lichtstroms die spektrale elektromagnetische Strahlungsleistung einer Lichtquelle mit der spektralen Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges bewertet und über alle Wellenlängen integriert werden. Multipliziert mit einem Skalierungsfaktor, dem Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents, ergibt sich der Lichtstrom.

„verbiegt“ und dazu führt, dass sich die Wellenfunktionen der Elektronen und Löcher voneinander entfernen und nicht mehr vollständig überlappen. Folglich separieren die Ladungsträger an entgegengesetzten Grenzflächen der Quantentröge (Abb. 1), wodurch die Wahrscheinlichkeit einer strahlenden Rekombination sinkt. Um die räumliche Trennung der Ladungsträger weitestgehend zu minimieren, dürfen die InGaN-Quantentröge nur wenige Nanometer schmal sein. Das wiederum reduziert jedoch das aktive Volumen der LED. Daher werden oftmals Stapel mit mehreren InGaN-Quantentrögen, sog. Multi Quantum Wells, verwendet.

Nach der metallorganischen Gasphasenepitaxie muss die beschichtete Saphir-Scheibe zu einzelnen LED-Chips weiterverarbeitet werden. Beim Dünnfilmprozess, wie er für hocheffiziente Weißlicht-LEDs bei OSRAM üblich ist, wird der Wafer zunächst mit der Oberfläche auf ein zweites, metallbeschichtetes Trägersubstrat aufgebondet [4]. Im nächsten Schritt wird mit einem Laser-Lift-Off-Verfahren das Saphir-Substrat von den aktiven GaN-Schichten abgetrennt, da es elektrisch isoliert und deshalb die weiteren Prozesse stört. Danach entstehen sowohl die Kontakte zur nun unten liegenden p-Schicht als auch die zur oben liegenden n-Schicht. Anschließend werden die großflächigen GaN-Filme in kleine LED-Chips von typischerweise 1 mm² gesägt (das „Vereinzeln“), in ein Package eingebracht

EFFICIENCY DROOP

Der **Efficiency Droop** ist ein Effekt, der die Abnahme der externen Quanteneffizienz einer LED über deren Stromdichte beschreibt. Physikalisch lässt sich diese Abnahme größtenteils durch einen erhöhten Anteil von Auger-Anregungen zwischen Elektronen innerhalb der aktiven Zone begründen, die sich mit steigender Ladungsträgerkonzentration immer stärker bemerkbar machen.

Der Efficiency Droop setzt schon bei relativ geringen Stromdichten ein, die unterhalb der nominellen Stromdichte liegen (Abb.). Eine reduzierte Stromdichte würde zwar zu einer höheren Effizienz, aber auch zu weniger Lichtemission führen. Somit wäre eine Vergrößerung der Fläche – und damit die Reduktion der Stromdichte – der einzige Ausweg, um die Effizienz weiter zu steigern. Dies ist aber für planare Schicht-LEDs, wie sie heute flächendeckend verwendet werden, aus Kostengründen nicht möglich, da die Herstellungskosten in der Halbleitertechnologie mit der prozessierten Fläche ansteigen.

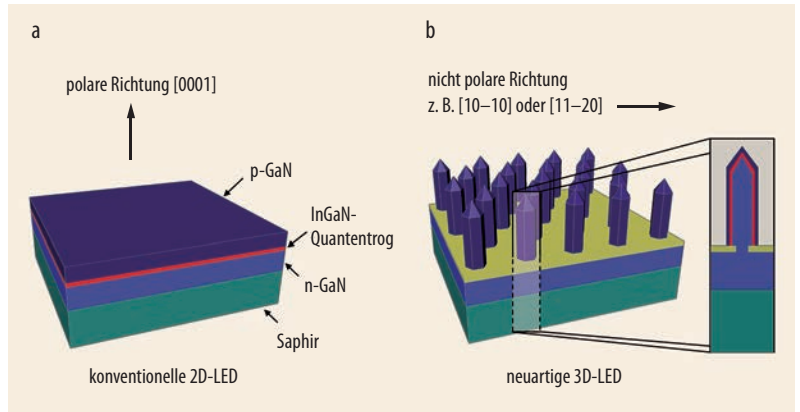
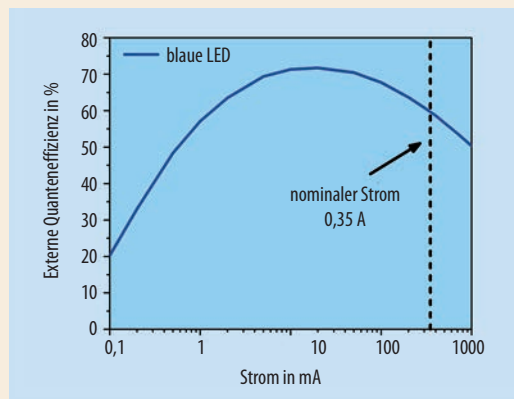


Abb. 2 Eine 2D-LED ist als planare Schichtfolge aufgebaut (a), während eine 3D-LED aus dreidimensionalen Strukturen besteht (b).

und mit einer Konverterschicht (z. B. aus Phosphor) versehen. Zum Schutz gegen Umwelteinflüsse werden die Bauelemente verkapselt und sind bereit für die weitere Verwendung wie den Verbau auf einer Leiterplatte.

Neue Prozesse für 3D-LEDs

Eine Reihe von Forschungsgruppen weltweit hat die Technologie für 3D-LEDs in den letzten Jahren entwickelt [5, 6]. Dazu passten die Forscher die Teilprozesse (Epitaxie, Chip-Prozessierung, Konverter und Packaging) entweder speziell auf 3D-LEDs an oder suchten grundlegend neue Lösungen. In diesem Jahr wurde die erste dreidimensionale Weißlicht-LED auf einer internationalen Konferenz vorgestellt [7].

Für das Wachstum von möglichst homogenen Säulen-Ensembles werden n-dotierte GaN-Schichten auf Saphir verwendet, so genannte Template. Über die GaN-Schicht wird später der n-Kontakt zu allen 3D-Strukturen hergestellt. Auf dieses Templat wird eine elektrisch isolierende Maskierungsschicht (z. B. SiO₂) aufgebracht, welche Öffnungen in geeigneter Größe und passendem Abstand aufweist. In diese werden in einer nachfolgenden metallorganischen Gasphasenepitaxie die dreidimensionalen Kernstrukturen gewachsen. Dabei war es insbesondere herausfordernd, die Parameter der metallorganischen Gasphasenepitaxie einzustellen: Die Wachstumstemperaturen, Gasflüsse und Gasdrücke waren völlig neu zu optimieren [8]. Vor allem die Silizium-Dotierung hat einen großen Einfluss, da sie – vermutlich durch die Bildung einer wachstumshemmenden Schicht auf den entstehenden Seitenwänden (Seitenwandpassivierung) – das dreidimensionale Wachstum deutlich fördert. Die hohe Silizium-Konzentration (typischerweise größer als 10²⁰ cm⁻³) ermöglicht außerdem eine gute elektrische Leitfähigkeit, sodass sich die Ladungsträger in Strukturen mit hohem Aspektverhältnis über die gesamte Höhe optimal verteilen lassen.

Nach dem 3D-Wachstum der GaN-Säulen werden mit anderen, ebenfalls optimierten Wachstumsbedingungen die InGaN-Quantentröge sowie die p-GaN-Schicht als gleichmäßiger Mantel konform auf den

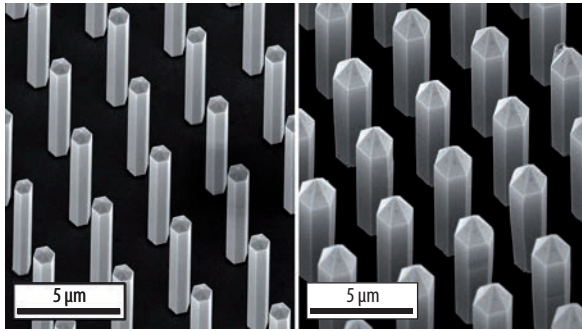


Abb. 3 Die Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop zeigen die Entwicklung von n-dotierten GaN-Kernen (links) zu vollständigen Kern-Mantel-LEDs (rechts).

Seitenflächen und der Spitze der GaN-Kerne aufgewachsen (Abb. 3).

Wenn die Epitaxie der Kern-Mantel-Strukturen abgeschlossen ist, folgt auch für 3D-LEDs die Prozessierung zum LED-Chip (Abb. 4a, b). Um die gesamte 3D-Fläche mit einem elektrischen Kontakt zu versehen, werden transparente leitfähige Oxide (TCOs) verwendet, welche die dreidimensionalen Kern-Mantel-Strukturen komplett überdecken. Somit werden die p-Kontaktschichten großflächig angeschlossen. Die p-seitige Stromaufweitung findet im TCO statt, da die Querleitfähigkeit der epitaktisch gewachsenen p-Schichten hierfür zu gering ist. Für den n-seitigen Kontakt wird die komplette Struktur an einer Stelle außerhalb des Säulenfelds bis zur n-dotierten GaN-Schicht tiefgeätzt. Auch hier wird ein Metallkontakt aufgebracht, der nun über die durchgehende GaN-Templat-Schicht alle Säulen n-seitig kontaktiert [7].

Das Aufbringen des Konverters stellte eine weitere Herausforderung dar. Übliche Konvertermaterialien haben Korngrößen von 10 bis 30 µm und passen nicht in die Zwischenräume der dreidimensionalen Strukturen (0,5 bis 2 µm). Daher wurden neuartige mikrometergroße Phosphore mit deutlich größeren Korngrößen entwickelt, deren Quanteneffizienz genauso hoch ist wie die der konventionellen (Abb. 4c). Im letzten Schritt der Prozessierung wird der Phosphor in eine Silikonmatrix eingebettet, um das Bauteil gegen Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit oder Schadgase zu schützen. Danach werden die LED-Chips vereinzelt und in einem konventionellen Package aufgebaut.

Mehr als nur Flächengewinn

Dreidimensionale Mikrosäulen-LEDs besitzen neben der größeren lichtemittierenden Fläche weitere Vorteile [9]: Die Kristalldefektdichten sind um Größenordnungen kleiner, der „Efficiency Droop“ hat geringeren Einfluss, die strahlende Rekombination läuft schneller ab, und die Phosphore sind verbessert.

Um diese Punkte etwas genauer zu erläutern, gehen wir zuerst kurz auf den Epitaxie-Prozess ein. Aufgrund der unterschiedlichen Gitterkonstanten von Saphir und GaN kommt es bei der Schichtabscheidung zu Verspannungen im GaN. Der Unterschied der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien führt zu weiteren Verspannungen während des Abkühlens nach der metallorganischen Gasphasenepitaxie, welche bei über 1000 °C stattfindet. Dabei verbiegt sich das Saphir-Substrat, was zu erheblichen Schwierigkeiten bei der nachfolgenden Chip-Prozessierung führt. In der Hetero-Epitaxie von kommerziellen LEDs ist daher die Nutzung von Substraten mit größeren Flächen nicht dafür geeignet, die Kosten zu reduzieren. Darüber hinaus kommt es zu Linienversetzungen, besonders direkt an der Grenzfläche zwischen Saphir und GaN. Setzt sich eine solche Versetzung bis in den Quantentrog fort, kann sie dort als nicht-strahlendes Rekombinationszentrum wirken: Bei der Elektronen-Loch-Rekombination entstehen dann anstatt der Photonen nur Phononen, und die Effizienz der LED verschlechtert sich.

In 2D-LEDs wird folglich eine Pufferschicht von mehreren Mikrometern Dicke gewachsen, um die Versetzungsdichte zu reduzieren. Im Gegensatz dazu gibt es bei 3D-LEDs nur eine kleine Kontaktfläche von der Säule zur defektreichen GaN-Pufferschicht. Dadurch setzen sich zum einen nur wenige Versetzungen von der Schicht in die dreidimensionalen Strukturen fort. Zum anderen knicken die Versetzungen aus energetischen Gründen zur seitlichen Oberfläche ab und verschwinden dort. Der Quantentrog wird somit auf eine defektfreie und kristallin entspannte GaN-Oberfläche aufgebracht und besitzt deutlich weniger nicht-strahlende Rekombinationszentren.

Neben der geringen Defektdichte ist vor allem die größere Oberfläche ein Vorteil von Kern-Mantel-

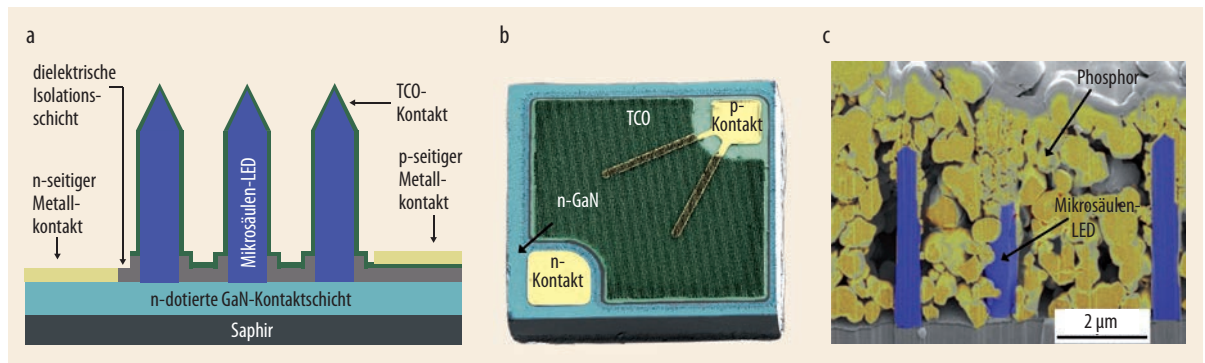


Abb. 4 Aus den 3D-Strukturen entstehen in mehreren Schritten LED-Chips. Die Darstellung zeigt die kontaktierten

Mikrosäulen-LEDs (a). Im Rasterelektronenmikroskop sieht man die Strukturen beim Blick auf den Chip von oben (b,

eingefärbt). Der Querschnitt zeigt, wie die Phosphor-Körner die LED-Strukturen umschließen (c).

LEDs. Die lichtemittierende Fläche einer herkömmlichen 2D-LED entspricht maximal der Fläche des Saphir-Substrats. Im Vergleich dazu lässt sich die lichtemittierende Fläche der 3D-LEDs leicht mehr als eine Größenordnung erhöhen, wenn der Abstand der Säulen zueinander klein und das Aspektverhältnis der einzelnen Säulen groß ist. Dies wirkt sich direkt auf die Kosten aus: Die Substratfläche pro Prozess ist begrenzt. Wenn jedoch die lichtemittierende Fläche bei gleichbleibender Substratfläche wächst, sinken die Kosten pro Photon bzw. pro Lumen. Nicht nur die Epitaxiezeit pro LED-Chip verringert sich, sondern auch der Verbrauch von hochreinen und teuren Quellenmaterialien sowie der gesamte nachfolgende Prozessierungsaufwand. Somit könnten die Herstellungskosten von 3D-LEDs deutlich unter denen der konventionellen LEDs liegen.

Der Flächengewinn ist auch aus anderen Gründen interessant. Bei vergleichbarem Gesamtstrom eines Chips zeigen 3D-LEDs in der aktiven Zone geringere Stromdichten als 2D-LEDs, da sich die Fläche der aktiven Schichten deutlich erhöht. Verringerte Stromdichten wiederum sorgen für eine höhere externe Quanteneffizienz, da sich der Einfluss des „Efficiency Droop“ verringert.

Der nächste Vorteil der 3D-Technologie resultiert aus der Wurtzit-Kristallstruktur des GaN: Bei kommerziell erfolgreichen LEDs kann der Quantentrog nur auf der polaren [0001]-Ebene (auch c-Ebene), gewachsen werden. Bei 3D-LEDs liegt der Quantentrog jedoch größtenteils auf einer nicht polaren Ebene – entweder [10-10] oder [11-20] –, die auch m- bzw. a-Ebene genannt werden (Abb. 2). Daher tritt bei Mikrosäulen-LEDs der „Quantum-Confined Stark Effect“ nicht auf. Ohne interne elektrische Felder aufgrund der Polarisation ist die örtliche Überlappung der Elektronen und Löcher größer und die strahlende Rekombination schneller. Dadurch sinkt auch die Wahrscheinlichkeit für nicht-strahlende Verluste.

Zu guter Letzt erhöht die Positionierung der Phosphorpartikel in die Zwischenräume der Mikrosäulen die Gesamteffizienz der LEDs: Zum einen verbessert sich die Lichtextraktion, zum anderen lässt sich die Wärme des Phosphors über die GaN-Strukturen effektiver ableiten und führt somit zu einer höheren Lebensdauer des Konverters. Zusätzlich verringern

sich die Reabsorptionsverluste des emittierten blauen Lichts in den Halbleitersäulen.

Analyse dreidimensionaler Strukturen

Etablierte Halbleiter-Analysemethoden (z. B. SIMS, Hall-Messungen, XRD) eignen sich oft nicht für die Untersuchung dreidimensionaler Strukturen. Neuartige Methoden zu entwickeln war und ist deshalb notwendig, um Aufschluss über die Struktur, die Kristallqualität, die Materialzusammensetzung, die Effizienz oder die Dotierung einzelner Bereiche der μm -großen LEDs in drei Dimensionen zu bekommen.

Um die Epitaxieprozesse zu optimieren, bestimmt man die Morphologie der Säulen. Da die Auflösung optischer Mikroskope nicht ausreicht, sind dafür Rasterelektronenmikroskope (REM) erforderlich. Deren Auflösung beträgt wenige Nanometer, sodass die mikrometergroßen Säulen detailreich zu erkennen sind (Abb. 3 und 5). Mit Hilfe dieser morphologischen Analyse sind Aussagen über Wachstumsraten, Oberflächenrauheiten und Kristallebenen möglich.

Der fokussierte Elektronenstrahl des REM generiert weitere Informationen: Das Auftreffen des Strahls auf die Probe erzeugt Elektronen-Loch-Paare, die wiederum materialspezifisch rekombinieren. Die dabei erzeugten Photonen werden spektral analysiert. Diese Kathodolumineszenz liefert Aussagen über die Kristallqualität und die Materialzusammensetzung der Probe, und zwar mit hoher örtlicher Auflösung. So lässt sich die räumliche Verteilung der Indiumkonzentration eines Quantentrogs darstellen (Abb. 5b).

Eine weitere Modifikation des REM-Aufbaus erlaubt es, auch elektrooptische Eigenschaften einzelner Mikrosäulen zu untersuchen. Dabei werden einzelne Säulen mittels nanoskaliger Metallspitzen, die über Piezomotoren ansteuerbar sind, elektrisch kontaktiert. Speist man über diese Nadeln einen Strom in Vorwärtsrichtung ein, generiert eine einzelne Säule Elektrolumineszenz, die sich analysieren lässt. Mit temperaturabhängigen Messungen ermittelt man die externe Quanteneffizienz mit hoher Ortsauflösung.

Alternativ ist es möglich, an die Metallspitzen eine Rückwärtsspannung über die LED anzulegen. Nun wird mit dem Elektronenstrahl über die Probe ge-

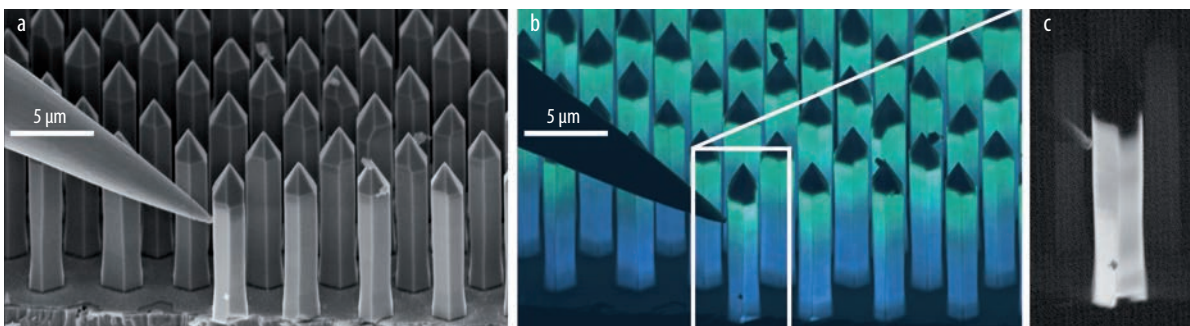


Abb. 5 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen zeigen die Geometrie (a)

und die Kathodolumineszenz (b) des Quantentrogs der 3D-LEDs sowie den

pn-Übergang (c) einer mittels Wolfram-Messspitze kontaktierten LED-Säule.

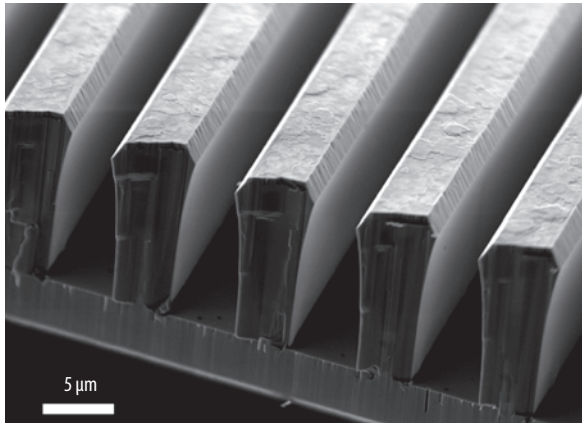


Abb. 6 Der Blick durch das Rasterelektronenmikroskop zeigt Fin-LEDs mit nicht polaren Seitenwänden im Querschnitt.

rastert und im Fall eines pn-Übergangs ein Stromfluss ähnlich wie bei einer Solarzelle detektiert. So lassen sich qualitative Aussagen zur Dotierung machen [10]. Mit Hilfe der Raman-Spektroskopie lässt sich die Ladungsträgerkonzentration quantitativ bestimmen, d. h. der absolute Wert und der Gradient liegen in μm -Auflösung für einzelne Säulen vor [11].

Die LEDs von (über-)morgen

Für 3D-Halbleiterstrukturen war es nötig, über die letzten Jahre verschiedene Analysemethoden zu entwickeln oder anzupassen. Mittlerweile gibt es viele Ansätze, die mit Hilfe hoher Ortsauflösung wertvolle Informationen liefern. Um das integrale Verhalten der Bauteile bestimmen zu können, muss man allerdings über alle einzelnen dreidimensionalen Strukturen rastern und mitteln. Das bedeutet einen hohen zeitlichen Aufwand. Um die Homogenität ganzer 3D-LED-Ensembles zukünftig schneller analysieren zu können, ist daher die Entwicklung weiterer Untersuchungsmethoden unabdingbar. Derzeit befindet sich die 3D-LED-Technologie noch im Forschungsstadium. Aufgrund ihrer faszinierenden Eigenschaften können dreidimensionale LEDs einen zusätzlichen Effizienzsprung und eine beträchtliche Kostenreduktion gegenüber konventionellen planaren LEDs ermöglichen. Dabei lassen sich alle heutigen Einsatzgebiete von LEDs adressieren. Allerdings müssen dafür die interne Quanteneffizienz, die Lichtextraktion und die elektrische Kontaktierung weiter verbessert werden.

Mikrosäulen sind nur eine von vielen möglichen dreidimensionalen Architekturen für Nanostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen. So werden derzeit auch alternative dreidimensionale Geometrien wie GaN-Wände (Fin-LED) erforscht (Abb. 6). Diese erlauben u. a. eine flexiblere Analytik der internen Eigenschaften sowie eine vereinfachte Prozessierung [12]. Zum anderen gibt es seit einigen Jahren immer mehr Anwendungsfelder für 3D-GaN-Strukturen. Außer für LEDs werden derartige defektfreie Strukturen mittlerweile auch als Grundstruktur für Bauelemente

der Leistungselektronik wie Feldeffekttransistoren erforscht. Neben der Defektfreiheit sind hier die möglichen vertikalen Architekturen besonders vorteilhaft [13]. Aufgrund der großen Oberfläche eignen sie sich sehr gut für Sensorik-Anwendungen. Hier ist insbesondere die Kombination von LED-Technologie und Nanosensorik interessant. So lassen sich Gassensoren energieeffizient durch Beleuchtung aktivieren, ohne das sonst übliche elektrische Heizen der Struktur [14].

Das Gebiet der 3D-Nitride wird sich stark weiterentwickeln, da es die bisher einzige Möglichkeit bietet, großflächig versetzungsfreies GaN-Ausgangsmaterial herzustellen. So sind in Zukunft noch viele weitere interessante Anwendungen von 3D-GaN-Architekturen zu erwarten.

Literatur

- [1] S. Nakamura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, L8 (1993)
- [2] H. Riechert, *Physik Journal*, Dezember 2014, S. 28
- [3] www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier
- [4] B. Hahn et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 100208 (2014)
- [5] F. Qian et al., *Nano Lett.* **4**, 1975 (2004)
- [6] M. Mandl et al., *Phys. Status Solidi RRL* **7**, 800 (2013)
- [7] T. Schimpke et al., *Proc. SPIE* **9768**, 97680T (2016)
- [8] X. Wang et al., *Cryst. Growth Des.* **13**, 3475 (2013)
- [9] S. Li and A. Waag, *J. Appl. Phys.* **111**, 071101 (2012)
- [10] J. Ledig et al., *Phys. Status Solidi A* **213**, 11 (2016)
- [11] M. S. Mohajerani et al., *Appl. Phys. Lett.* **108**, 091112 (2016)
- [12] J. Hartmann et al., *Cryst. Growth Des.* **16**, 1458 (2016)
- [13] F. Yu et al., *Appl. Phys. Lett.* **108**, 213503 (2016)
- [14] J. D. Prades et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **11**, 10881 (2009)

DIE AUTOREN

Jana Hartmann studierte Elektrotechnik an der TU Braunschweig und promoviert derzeit am Institut für Halbleitertechnik im Bereich der Epitaxie von dreidimensionalen Halbleiterstrukturen.

Andreas Waag (FV Halbleiterphysik) studierte Physik in Würzburg. Nach Stationen an der Purdue University, USA, und der U Ulm ist er seit 2003 Leiter des Instituts für Halbleitertechnik der TU Braunschweig. Seine Arbeitsgruppe beschäftigt sich u. a. mit der GaN-Technologie und hier besonders mit weiterführenden 3D-Konzepten.

Adrian Avramescu studierte Physik an der Universität Bukarest und promovierte an der Hokkaido-Universität in Sapporo, Japan. Seit 2003 arbeitet er bei der OSRAM Opto Semiconductors GmbH auf dem Gebiet der InGaN-Epitaxie an LEDs und Laserdioden.

Martin Straßburg (FV Halbleiterphysik) studierte Physik an der TU Berlin. Nach der Promotion war er von 2003 bis 2005 als Humboldt-Stipendiat am Georgia Institute of Technology und an der Georgia State University in Atlanta. Seit 2005 arbeitet er bei der OSRAM Opto Semiconductors GmbH und konzentriert sich auf das Entwickeln zukünftiger LEDs.

