

Rosige Aussichten für grünes Licht

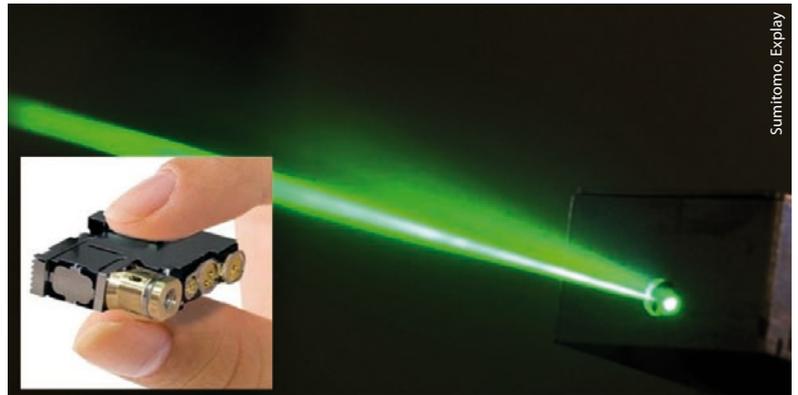
Semipolare Gruppe-III-Nitride versprechen hocheffiziente grüne LEDs und Laserdioden.

Ulrich T. Schwarz und Ferdinand Scholz

Derzeit erleben wir eine Revolution im Beleuchtungsmarkt: Weiße Leuchtdioden, die auf der Konversion von blauem Licht beruhen, erobern zahlreiche Anwendungen im Sturm. Projektoren benötigen aber Lichtquellen für alle drei Grundfarben. Während intensive und hocheffiziente Laserdioden für blau und rot schon länger existieren, ist dies im grünen Spektralbereich bislang nicht der Fall.

In den vergangenen fünfzig Jahren haben Leuchtdioden (LEDs) und Laserdioden (LDs) eine stürmische Entwicklung genommen. Grundlage dafür waren und sind weiterhin Verbindungshalbleiter von Elementen der dritten und fünften Hauptgruppe unseres Periodensystems – die III-V-Halbleiter. In den ersten Jahrzehnten ermöglichten die Gruppe-III-Arsenide und -Phosphide wie AlGaAs oder AlGaInP große Fortschritte im gelb-roten bis infraroten Spektralbereich. Aber erst als es in den 1990er-Jahren gelang, Gruppe-III-Nitride wie GaN, AlN, InN und deren Mischverbindungen in hoher Qualität herzustellen, erschloss dies auch den kürzerwelligen sichtbaren und nahen ultravioletten Spektralbereich [1]. Diese Nitride haben inzwischen Galliumarsenid als technologisch wichtigsten Halbleiter neben Silizium abgelöst, vor allem deshalb, weil sich damit hocheffiziente Leuchtdioden für den sichtbaren Spektralbereich herstellen lassen (Abb. 1).

Das kurzwellige Licht dieser Bauteile lässt sich durch geeignete Farbstoffe – ganz ähnlich wie in Leuchtstoffröhren und Energiesparlampen – in längerwelliges Licht konvertieren: Nach diesem Prinzip funktionieren hocheffiziente weiße LEDs. Die japanische Firma Nichia hat jüngst eine blaue LED entwickelt, die einen Leistungs-Wirkungsgrad – im Jargon der Ingenieure Steckdosenwirkungsgrad – von 85 Prozent erreicht [2]. In Kombination mit einem effizienten Phosphorkonverter gelang es damit, aus einem Watt elektrischer Leistung einen Lichtstrom von 249 Lumen weißen Lichts zu erzeugen. Moderne Energiesparlampen erreichen hingegen nur rund 80 lm/W. Diese Bauteile bieten also ein enormes Energiesparpotenzial und revolutionieren sicher in naher Zukunft den Beleuchtungsmarkt. Im Alltag fallen uns heute weiße Hochleistungs-LEDs als Perlenketten in Frontscheinwerfern von Autos ins Auge. Sie sind aber auch als LCD-Hintergrundbeleuchtung in Handys und Displays allgegenwärtig und verändern gerade radikal den Markt von großen



Sumitomo, Explay

Flachbildschirmen, da sie es bei hoher Helligkeit und geringstem Stromverbrauch ermöglichen, die Dicke dieser Geräte drastisch zu reduzieren.

Zurzeit kommen erste Mikroprojektoren auf den Markt, die ein Video- oder Computerbild mit hoher Auflösung auf eine beliebige weiße Fläche projizieren können. Mit drei Laserdioden in den Grundfarben Rot, Grün und Blau als Lichtquelle könnten diese Geräte künftig in ein Handy passen. Geeignete rote und blaue Laserdioden existieren bereits. Gerade im grünen Spektralbereich, in dem unser Auge am empfindlichsten ist, fehlen aber Laserdioden mit ausreichender Ausgangsleistung, Energieeffizienz und Lebensdauer (Abb. 2).

So ist einerseits die Bandlücke der Phosphide AlGaInP begrenzt, sodass man mit diesen von Rot und Gelb aus keine deutlich kürzeren Wellenlängen erreicht. Ohnehin ist Aluminium ein chemisch-technologisch sehr widerspenstiges Element. Andererseits können Legierungen aus GaN und InN potenziell den gesamten sichtbaren Spektralbereich abdecken, jedoch bestehen auch hier grundlegende technologische

Grüne Laserdioden sind bislang die Schwachstelle von Mikroprojektoren (Inset).

KOMPAKT

- Die Effizienz von LEDs und Laserdioden bricht im grünen Spektralbereich zwischen den beiden Materialsystemen GaInN (blau) und AlGaInP (gelb, rot) stark ein.
- Die Ursache dafür sind Verspannungen und damit einhergehende elektrische Felder in Quantenfilm-Strukturen aus dem favorisierten GaInN.
- Einen Ausweg versprechen Strukturen, in denen die Verspannung nicht in der kristallographischen Hauptrichtung anliegt. Bei diesen nicht- oder semipolaren Leucht- und Laserdioden wurden in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt.

Prof. Dr. Ulrich T. Schwarz, Institut für Mikrosystemtechnik, Universität Freiburg, Georges-Köhler-Allee 103, 79110 Freiburg; **Prof. Dr. Ferdinand Scholz**, Institut für Optoelektronik, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 45, 89081 Ulm

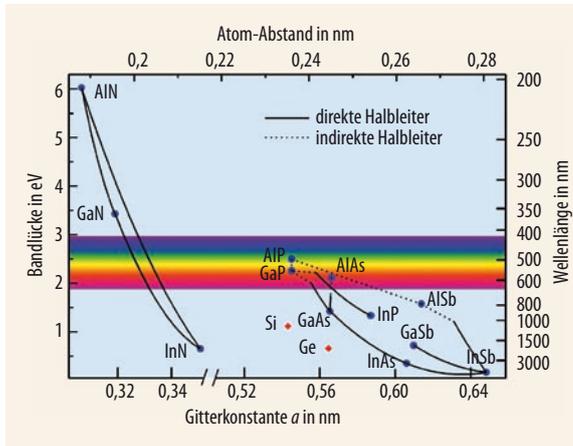


Abb. 1 Die fundamentale Bandlücke (bei 300 K) hängt generell mit der Gitterkonstante zusammen und bestimmt die Wellenlänge (rechte Achse) der emittierten Photonen. Die Linien zwischen den binären Halbleitern stehen für ternäre Legierungen wie GaInN oder AlGaAs.

Probleme: GaN und InN lassen sich nicht beliebig mischen, sodass bisher hohe Dichten an Kristalldefekten unumgänglich sind. Hinzu kommt ein fundamentales materialphysikalisches Problem, die polare Natur der nitridischen Kristalle, worauf dieser Artikel vor allem eingeht. Diese Probleme haben bisher auch effiziente, langlebige grüne Laserdioden verhindert.

Strukturelle Schwierigkeiten

Die klassischen III-V-Halbleiter wie GaAs, InP und ihre mehrkomponentigen Verbindungen bilden ebenso wie die Elementhalbleiter Silizium und Germanium eine kubische Kristallstruktur aus – bei den Verbindungshalbleitern Zinkblendestruktur genannt. Im Gegensatz hierzu kristallisieren die Nitride in der hexagonalen Wurtzitstruktur, in der die Bindungen wegen des kleinen Ionenradius von Stickstoff einen vergleichsweise hohen ionischen Anteil besitzen. Deshalb sind die Tetraeder, die wie im Diamant- und Zinkblendegitter die Basis des Kristalls bilden (**Abb. 3**), bei den Nitriden nicht ganz symmetrisch. Vielmehr unterscheidet sich die Bindungslänge zum nächsten Atom entlang der Haupt-Symmetrieachse des hexagonalen Kristalls – der c-Richtung – von der Länge zu den drei anderen Nachbaratomen. Dies führt grundsätzlich zu einem spontanen Polarisationsfeld des Kristalls, das Oberflächenladungen beim Volumenkristall allerdings abschirmen.¹⁾ Bei Temperaturänderungen macht sich das Feld aber als Pyroelektrizität bemerkbar. Ebenso „verbiegt“ es die Leitungs- und Valenzbandkanten insbesondere an inneren Heterogrenzflächen. An diesen Flächen stoßen Materialien mit zwar gleicher Kristallstruktur, aber unterschiedlichen Polarisierungen aneinander. Die Kristalle sind außerdem piezoelektrisch, d. h. durch mechanische Verspannungen entstehen ebenfalls innere elektrische Felder. Bei Nitriden ist dies besonders ausgeprägt bei uniaxialer Verspannung entlang der c-Richtung bzw. biaxialer Verspannung (**Infokasten**) in der Ebene senkrecht dazu (c-Fläche). Dies tritt zwar auch

1) Im hexagonalen Kristallgitter gibt es noch einen gleich großen Beitrag der übernächsten Nachbarn zur spontanen Polarisierung.

2) Punkte und Rechtecke: 1 mm² Chips von Osram OS bei einem Strom von 350 mA. Rauten und Dreiecke: Philips Lumileds, aus [3].

3) vgl. Physik Journal, Januar 2010, S. 23

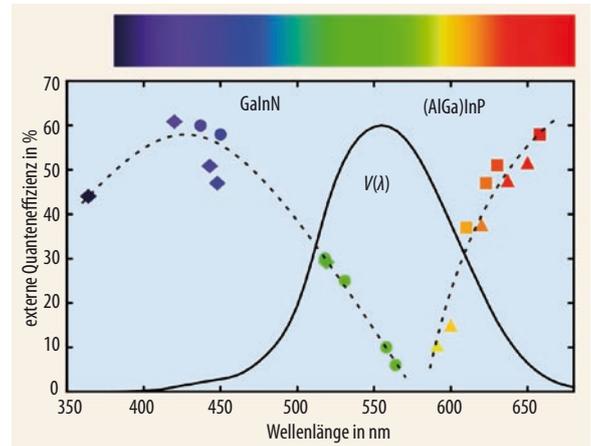


Abb. 2 Die externe Quanteneffizienz von Hochleistungs-LEDs bricht im grünen Spektralbereich zwischen den beiden Materialsystemen GaInN und AlGaInP ein „green gap“. Gerade dort ist die Augenempfindlichkeit $V(\lambda)$ aber am höchsten. Die gestrichelten Linien verdeutlichen den Trend.²⁾

bei GaAs entlang der diagonalen (111)-Richtung auf, allerdings sind die piezoelektrischen Koeffizienten von GaN sechsmal größer. Sie kommen damit schon fast in die Größenordnung von ferroelektrischen Materialien, sodass innere elektrische Felder von einigen MV/cm entstehen können.

Die Polarisationsfelder sind in vielen Bauelementen wie hoch leitfähigen Feldeffekttransistoren von Nutzen. Da deren immens hohe Ladungsträgerkonzentration von ca. 10^{13} cm^{-2} allein von den Gradienten in der spontanen und piezoelektrischen Polarisation herrührt, ist keine zusätzliche Dotierung erforderlich. Solche Bauteile werden zukünftig das Rückgrat der Hochleistungs-Hochfrequenztechnik bilden und helfen, den Stromverbrauch in Basisstationen für den Mobilfunk deutlich zu senken. Die starke Piezoelektrizität ermöglicht auch sehr sensitive elektromechanische Sensoren und Aktuatoren. Dagegen sind solche Felder für optoelektronische Anwendungen unerwünscht, da sie – wie wir gleich sehen – die strahlende Rekombination unterdrücken.

Die lichtemittierende Schicht einer modernen Leucht- oder Laserdiode besteht praktisch immer aus einem oder mehreren Quantenfilmen.³⁾ Dort sammeln sich die Ladungsträger, d. h. die Elektronen im Leitungsband und die Löcher im Valenzband, bevor sie mit hoher Effizienz unter Aussendung eines Photons rekombinieren.

Für Lichtemission im sichtbaren Spektralbereich muss der In-Gehalt x der $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Quantenfilme zwischen 10 und 30 Prozent liegen, um die Bandlücke für den blauen bis grünen Bereich genügend zu reduzieren (**Abb. 1**), während die Barrieren ebenso wie die Grundstruktur im Wesentlichen aus GaN bestehen. Pro 10 Prozent Indium beträgt der Unterschied der Gitterkonstanten, die Gitterfehlpassung, ca. ein Prozent. Während für den blauen Spektralbereich die Verspannung und die resultierenden inneren Felder (**Infokasten**) bei moderaten Indiumkonzentrationen um 10 bis 15 Prozent noch tolerierbar sind, wird die Situation immer ungünstiger, je höher der Gehalt und damit die Emissionswellenlänge ist. Die Elektronen bewegen sich

mehr und mehr entgegen dem elektrischen Feld an die eine Heterogrenzfläche, während die Löcher sich entlang des Feldes an der anderen Grenzfläche sammeln. Als Resultat sinkt der Überlapp der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und die Wahrscheinlichkeit für strahlende Rekombination: Nur noch räumlich indirekte Rekombinationsprozesse sind möglich.⁴⁾ Die entstehenden piezoelektrischen Felder betragen einige MV/cm senkrecht zum Quantenfilm und verursachen eine Potentialdifferenz von einigen 100 meV über einen 2 bis 3 nm dicken Quantenfilm. Im Wettbewerb zwischen strahlender und nichtstrahlender Rekombination gewinnt letztere und reduziert damit die Effizienz der LED oder LD. Verspannte Quantenfilme, die noch breiter sind, sind deswegen im Regelfall sehr „dunkel“, d. h. ineffizient. Immerhin verschiebt eine Variante des Stark-Effekts (QCSE, Infokasten) die Emission in den gewünschten langwelligen Bereich.

Wie könnte ein Ausweg aussehen? Offenbar bestimmt die Richtung der Verspannung entscheidend das piezoelektrische Feld. Deshalb spielt dieser Effekt in konventionellen optoelektronischen Bauelementen aus Arseniden und Phosphiden keine Rolle, da in den auf nichtpolaren (001)-Ebenen abgeschiedenen Quantenfilmen selbst bei erheblichen Verspannungen keine piezoelektrischen Felder entstehen.

Auch bei Nitriden spielt die Kristallrichtung eine herausragende Rolle. Wird die Hauptrichtung der Verspannung aus der c-Richtung in Gedanken herausgedreht (Abb. 3), verringert sich die piezoelektrische Polarisation drastisch, ja sie wechselt sogar das Vorzeichen, um bei einer Verkipfung von 90° erneut komplett zu verschwinden – was aus Symmetriegründen notwendig ist (Abb. 4). In gleichem Maße nimmt die strahlende Übergangswahrscheinlichkeit zu. Alle Orientierungen

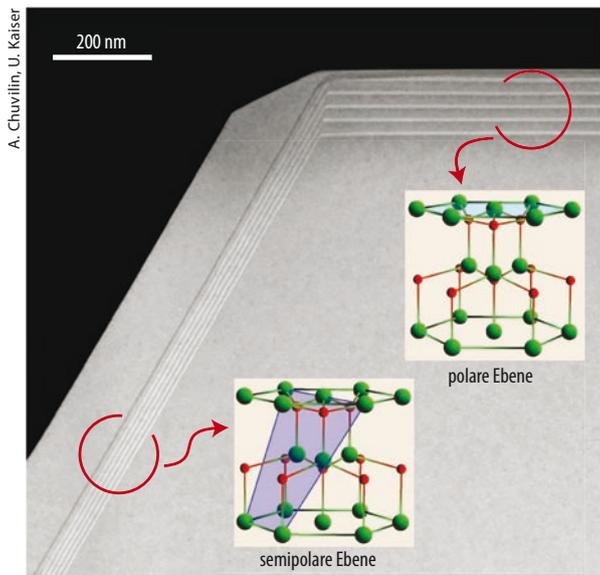


Abb. 3 Aufgrund der hexagonalen Wurtzitstruktur von GaN (grün: Ga, rot: N) entstehen innere Polarisationsfelder, die mit polaren oder semipolaren Kristallebenen, {0001} bzw. {1-101}, einhergehen. Das TEM-Bild zeigt einen GaN-Streifen mit trapezförmigem Querschnitt (sozusagen ein unvollendetes Dreieck, siehe Abb. 6) mit einer polaren bzw. semipolaren Fläche, auf denen fünf GaInN-Quantenfilme abgeschieden wurden.

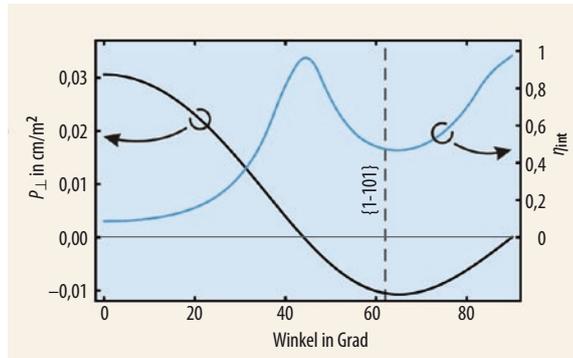


Abb. 4 Die piezoelektrische Polarisation P_{\perp} senkrecht zu einem 3 nm dicken $\text{Ga}_{0,75}\text{In}_{0,25}\text{N}$ -Quantenfilm zwischen GaN-Barrieren hängt ebenso wie die strahlende Übergangswahrscheinlichkeit η_{int} stark von der Orientierung der Verspannung ab. Die Rechnung wurde für eine Ladungsträgerdichte von 10^{11} cm^{-2} durchgeführt, die für LEDs typisch ist. Die gestrichelte Linie bei 62° entspricht der {1-101} Ebene als Beispiel.

zwischen der polaren c-Richtung und den um 90° gekippten nichtpolaren Richtungen werden als „semipolar“ bezeichnet.

Bei nicht- und semipolaren Nitriden überlappen sich Elektron- und Loch-Wellenfunktion in verspannten Quantenfilmen also deutlich stärker, und die strahlende Übergangswahrscheinlichkeit nimmt zu. Allerdings nimmt auch die Rotverschiebung durch den QCSE ab. Somit ist ein höherer Indium-Gehalt im Quantenfilm nötig, um die gleiche langwellige Emission wie bei polaren c-Flächen-Bauelementen zu erhalten. Dies verschärft die Material-Problematik bei GaInN-Schichten mit hohem Indiumanteil und erschwert es, hocheffiziente Bauelemente mit langwelliger Emission herzustellen.

Dennoch stellt sich die Frage: Warum werden heute LEDs und LD nicht einfach auf solchen nichtpolaren Oberflächen hergestellt? Patrick Waltereit und Mitarbeiter vom Paul-Drude-Institut in Berlin haben vor zehn Jahren die erste nichtpolare (Al,In,Ga)N-LED auf LiAlO_2 vorgestellt, einem Substrat, auf dem sich GaN in nichtpolare m-Richtung epitaxieren lässt [4]. Inzwischen untersuchen viele Forschergruppen weltweit Strukturen mit nicht- oder semipolaren Nitriden. Dennoch gelang es nicht, die elektro-optischen Effizienzen gegenüber Bauteilen auf der „konventionellen“ c-Fläche zu steigern, ja sie blieben sogar meist weit hinter diesen zurück.

Ein Grund hierfür ist sicherlich, dass sich GaN wegen seines extrem hohen Gleichgewichtsdampfdrucks nicht wie Silizium oder GaAs aus der Schmelze ziehen lässt. Vielmehr werden großflächige GaN-Substrate nach wie vor meist epitaktisch auf Fremdsubstraten (z. B. Saphir oder GaAs) abgeschieden. Die Hydrid-Gasphasen-Epitaxie (HVPE) erlaubt eine Wachstumsgeschwindigkeit von deutlich mehr als $100 \mu\text{m}$ pro Stunde und damit Einkristalle mit Durchmessern von 5 bis 10 cm und Dicken von mehreren Millimetern mit recht geringen Defektdichten (Abb. 5). Diese Schichten werden dann in dünne Wafer geschnitten, poliert und als Substrate z. B. für die Epitaxie von AlGaInN-Laserdioden eingesetzt. Diese Methode funktioniert

4) Dies ist nicht zu verwechseln mit Übergängen, die im Impuls-Raum indirekt ablaufen, also die Beteiligung eines Phonons erfordern.

A. Chuvpilo, U. Kaiser

bisher nur in der bevorzugten c-Wachstumsrichtung, die Wafer sind also polar. Zudem entstehen spätestens ab Dicken von 5 bis 10 mm makroskopische Defekte (Abb. 5).

Polare GaN-Scheiben mit ähnlichen Abmessungen lassen sich seit kurzem auch mit einem Prozess erzielen, der am kritischen Punkt Ammoniak als Lösungsmittel verwendet („ammonothermal“). Trotz vergleichsweise geringen Wachstumsraten und deshalb extrem langen Prozessdauern von mehreren Wochen ließen sich bereits Einkristalle mit überaus beeindruckender Kristallqualität herstellen [5].

Um semi- und nicht-polare Substrate zu erhalten, schneidet man solche dicken Scheiben einfach in der gewünschten Richtung und poliert sie. Sie haben eine sehr geringe Versetzungsdichte und erlauben prinzipiell das Wachstum von polarisationsreduzierten Schichten sehr guter Qualität. Problematisch sind die geringe Verfügbarkeit, der dadurch extrem hohe Preis sowie die sehr kleine Wafer-Fläche wegen der begrenzten Dicke des Ausgangsmaterials. Erschwerend kommt hinzu, dass bei der Epitaxie meist eine Randzone des Substrats verworfen werden muss.

Mit solchen Substraten gelang es vor kurzem erstmals, effiziente LEDs in semipolarer Richtung herzustellen (z. B. [6]). Nach wie vor sinkt allerdings die Effizienz bei Annäherung an die grünen Wellenlängen um 500 nm. Steigt der In-Anteil in nicht- oder semipolaren Quantenfilmen, um zu größeren Wellenlängen

zu kommen, entstehen wieder Defekte und Stapelfehler an den Grenzflächen der Quantenfilme. Auch die schlechte Mischbarkeit von GaN und InN schlägt erneut zu.

Kommerzielle GaN-Leuchtdioden verwenden nach wie vor hauptsächlich großflächige Fremdsubstrate wie Saphir oder Siliziumkarbid. Daher bieten sich auch für nicht- oder semipolares GaN Fremdsubstrate mit geeigneter Kristall-Orientierung an. So lässt sich auf einer speziellen Saphir-Orientierung – mit der sog. „r-plane“ als Oberfläche – unpolares GaN (a-plane) abscheiden. Analog dazu wächst unpolares GaN (m-plane) auf SiC-Wafern oder eben auf (100)-LiAlO₂ [4].

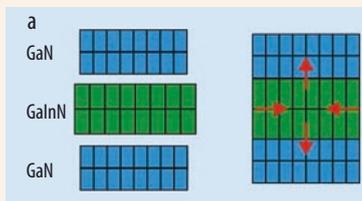
Beim heteroepitaktischen Wachstum entstehen aber immer wegen der nicht exakten Gitteranpassung und unterschiedlicher thermischer Ausdehnung viele Kristalldefekte, vor allem Versetzungen. Bei nicht-polaren Schichten kommt eine hohe Dichte an Stapelfehlern hinzu, die sich wegen der verkippten Kristallebenen bis zum Bauelement an der Oberfläche fortsetzen. An solchen Stapelfehlern können die Elektronen und Löcher zusätzlich nichtstrahlend rekombinieren.

Offenbar eignet sich die c-Richtung als Hauptrichtung des hexagonalen Kristalls besonders gut, um defektarme Epitaxieschichten herzustellen. Lässt sich dies auch für nicht- oder semipolare Strukturen nutzen? Zwei Möglichkeiten, die wir und einige andere Gruppen derzeit erforschen, seien hier kurz angesprochen.

VERSPANNUNG UND QUANTUM CONFINED STARK EFFECT (QCSE)

Leuchtdioden verwenden heute fast nur noch Quantenfilm-Strukturen als aktive, lichtemittierende Schichten, da diese die Ladungsträger besser einschließen. Bei Ga_{1-x}In_xN-Quantenfilmen lässt sich die Bandlücke und damit die Wellenlänge des emittierten Lichts über den Indium-Gehalt x einstellen. Da die Einheitszelle von GaInN deutlich größer ist als die von GaN, wird bei der Epitaxie von dünnen Quantenfilmen die laterale Gitterkonstante gegenüber dem Gleichgewichtszustand verkleinert, sodass die Schicht mit einer Vergrößerung der vertikalen Gitterkonstante reagiert (rote Pfeile in Abb. a). Erst bei dickeren Schichten – jenseits der kritischen Schichtdicke – wird diese biaxiale Verspannung durch Versetzungen abgebaut.

Wegen der Piezoelektrizität der Nitride entsteht im verspannten Quantenfilm ein elektrisches Feld, d. h. ein Gradient im Verlauf von Leitungs- und Valenzband (LB, VB in Abb. b). Da der Bandabstand unverändert bleibt, sinkt die Differenz zwischen Leitungsband-Minimum (bei z ~ -1,5 nm) und Valenzband-Maximum (z ~ +1,5 nm), was auch den Abstand der Quantisierungsniveaus von Elektronen und Löchern verringert. Dieser „Quantum confined Stark effect“ (QCSE) wird z. B. für elek-

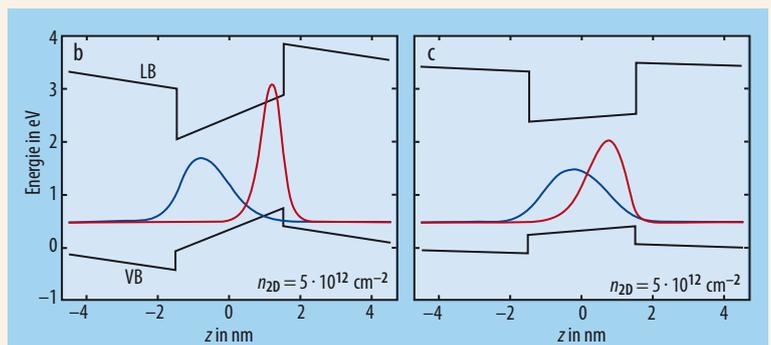


tro-optische Modulatoren aus GaAs oder InP genutzt: Ein extern angelegtes elektrisches Feld verändert darin die effektive Bandlücke und damit die Absorptionskante des Halbleiters.

In einem polaren GaInN-Quantenfilm mit 35 % Indium werden die Maxima der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Elektronen (blau in Abb. b) und Löchern (rot) durch den veränderten Potential-

Verlauf räumlich so stark gegeneinander verschoben, dass der Überlapp der Wellenfunktionen nur noch 7 % beträgt – entsprechend geht auch die Rate für strahlende Rekombination zurück.

Für einen Quantenfilm in einer anderen Richtung verringert sich selbst bei gleicher Verspannung das innere Feld. Abb. c zeigt den Potentialverlauf der Bänder und die Elektron- und Loch-Wellenfunktion für einen semipolaren Quantenfilm mit {11-22}-Orientierung (Verkipfung gegenüber der polaren c-Fläche ca. 60°). Der Überlapp zwischen Elektron- und Loch-Wellenfunktion beträgt nun 70 %. Die Übergangsenergie ist größer, weil die Rot-Verschiebung durch den QCSE geringer ist.



F. Lipski

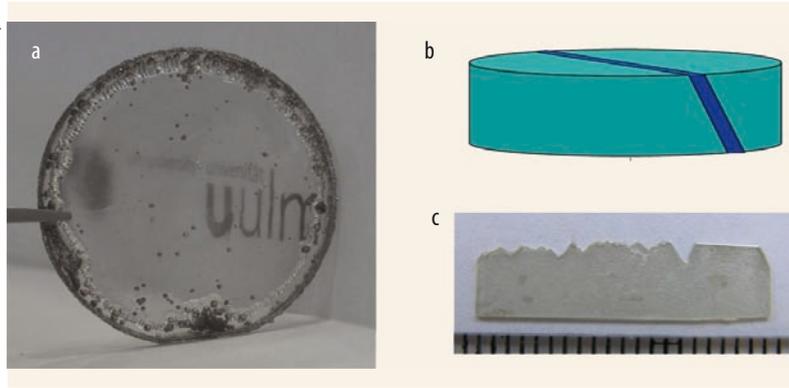


Abb. 5 Die Hydrid-Gasphasen-Epitaxie ermöglicht GaN-Einkristalle mit 5 cm Durchmesser und einer Dicke in c-Richtung von rund 1,5 mm (a), aus denen sich semi- und nichtpolare Waferstücke herauslösen lassen (b). Ein nichtpolares GaN-„Bulk“-Substrat der Mitsubishi Chemical Corporation weist V-förmige Kerben an der oberen Kante auf (c). Diese makroskopischen Defekte treten beim Wachstum solcher dicker Wafer an der Oberfläche bisher immer auf.

Rippen und Gräben

Das erste Verfahren nutzt die Selektivität des Epitaxie-Prozesses auf maskierten Substraten aus: SiO₂-Streifen mit Perioden von einigen Mikrometern auf einer GaN-Schicht dienen dabei als Masken, aus deren Öffnungen – unter geeigneten Bedingungen – GaN-Streifen mit dreieckigem Querschnitt epitaktisch wachsen (Abb. 6). Je nach Streifenrichtung bildet sich die (11-22)- oder die (10-11)-Facette aus, die beide einen Winkel von ca. 60° zur c-Fläche aufweisen. Diese Rippen dienen als Substrat für hochwertige LED-Strukturen mit bereits ansehnlichen Elektrolumineszenz-Wirkungsgraden im Blauen und Grünen – jeweils einige 100 μW Ausgangsleistung bei 20 mA [7]. Wir haben zudem den semipolaren Charakter dieser Facetten direkt bestätigt und die Abhängigkeit des In-Einbaus und der Quantenfilm-Homogenität von Kristallorientierung und Streifengeometrie untersucht [8]. Gegen planare, prozesstechnisch viel einfachere LEDs haben diese komplexen Strukturen aber wohl nur eine Chance, wenn sich zusätzliche Vorteile nutzen lassen. So sollten z. B. eine sehr breitbandige Emission und damit weiße LEDs ohne Konverter durch unterschiedlichen In-Einbau auf den verschiedenen Streifen-Facetten möglich sein. Man könnte die Streifen auch direkt als Laser-Wellenleiter oder bei drastisch reduzierter Periode als aktives Bragg-Gitter in einem DFB-Laser (Distributed Feedback) mit semipolaren Quantenfilmen nutzen. Durch zweidimensionale Strukturierung der Oberfläche wären auch einfache photonische Kristalle möglich.

Für kommerzielle Leucht- und Laserdioden werden sich vermutlich aber nur Lösungen mit großflächig geschlossener homogener semi- oder nichtpolare Oberfläche durchsetzen, wie sie ein anderer Ansatz verspricht: Wenn für eine am Ende semipolare Oberfläche die bewährte c-Richtung in GaN als Haupt-Epitaxierichtung dienen soll, ist ein Wafer nötig, der die c-Richtung in dem geeigneten Winkel zur Verfügung stellt. Für die semipolare GaN-(10-11)-Oberfläche eignet sich sehr gut ein Saphir-Wafer mit n-Oberfläche (d. h. einer (11-23)-Oberfläche). In diese Oberfläche können wir Gräben ätzen, deren Seitenflächen bei geeigneter Orientierung weitgehend c-Flächen-Charakter haben, die als Startflächen für die Epitaxie dienen (Abb. 7). Unsere ersten Ergebnisse sind bereits sehr vielversprechend:

Mit diesem Verfahren lässt sich die Stapelfehlerdichte geschlossener semipolarer GaN-Schichten deutlich senken [9]. Ein ähnlicher Ansatz mit Si-Wafern wurde bereits vor einigen Jahren vorgestellt [10].

Kürzlich hat der Substrathersteller Sumitomo den Durchbruch mit einer grünen semipolaren Laserdiode bei 531 nm geschafft und damit auch bestätigt, wie wichtig der Zugang zu exzellenten Substraten ist [11]. Die vielen möglichen Kristallebenen erschweren allerdings eine systematische Studie. Offensichtlich hat jede Ebene ihren eigenen Charakter bezüglich In-Einbau, Verspannung sowie der Frage, wie Defekte entstehen und sich ausbreiten. Nicht zuletzt Arbeiten aus der Gruppe um Shuji Nakamura, Steven DenBaars und James Speck in Santa Barbara weisen auf die große Bedeutung von semipolaren Richtungen und deren Vorteile auch gegenüber den nichtpolaren Hauptrichtungen hin. So ist z. B. der In-Einbau auf einigen semipolaren Flächen sehr viel effizienter, und an semipolaren Hetero-Grenzflächen scheinen weniger verspannungsbedingte Defekte zu entstehen [12]. Wahrscheinlich sind auch dickere und homogenere Schichten möglich als auf polaren Oberflächen.

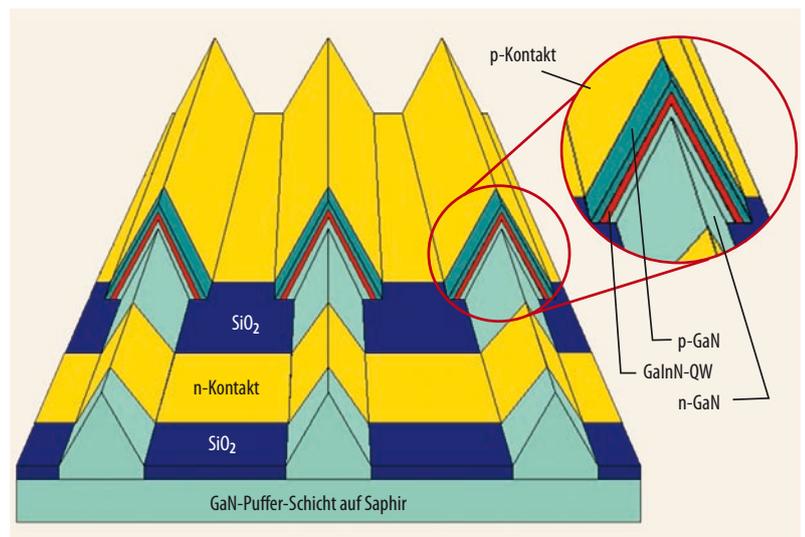
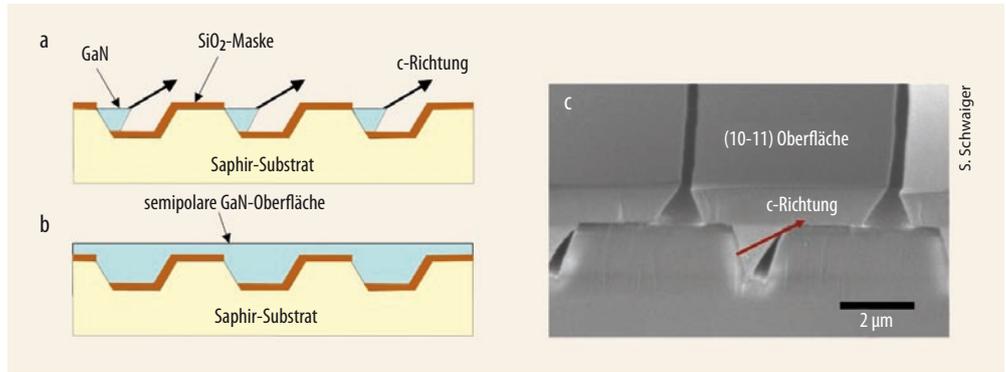


Abb. 6 Nach der Epitaxie einer ersten GaN-Schicht und Maskierung mit SiO₂ wachsen im zweiten Schritt aus den streifenförmigen Maskenöffnungen GaN-Rippen mit dreieckigem Querschnitt, also semipolaren Seitenfacetten heraus. Hierauf lässt sich eine komplette

LED-Struktur abscheiden. Auf die oberste p-dotierte GaN-Schicht wird der p-Kontakt aufgedampft, ein lokaler Trockenätzprozess macht das tieferliegende n-GaN für das n-Kontakt-Metall zugänglich.

Abb. 7 Beim epitaktischen Wachstum von GaN auf strukturiertem Saphir wachsen Streifen in c-Richtung aus den Gräben heraus (a), die eine geschlossene, semipolare Oberfläche bilden (b). Das Rasterelektronenmikroskopie-Bild zeigt eine noch nicht zusammengewachsene semipolare Schicht (c).



Wenn die Substratfrage erst mal geklärt ist, tauchen allerdings noch weitere wichtige Gesichtspunkte auf: Nicht- und semipolare Leuchtdioden strahlen – im Gegensatz zu normalen polaren LEDs – mehr oder weniger stark polarisiertes Licht ab. Dies lässt sich für die Hinterleuchtung von LCD-Displays nutzen, bei der bislang die halbe Leistung wegen der notwendigen Polarisierung verloren geht. Auch die Wellenleitereigenschaften von Laser-Resonatoren ändern sich entsprechend. Außerdem ist GaN aufgrund seiner Symmetrie nicht nur piezoelektrisch, sondern auch doppelbrechend. Beides hat direkte Konsequenzen für die Simulation und Interpretation der optischen Verstärkung semipolarer Laserdioden und somit fürs Bauelement-Design, weil jetzt die Verstärkung für ordentlich und außerordentlich polarisierte Moden unterschiedlich ist und zudem von der Orientierung des Wellenleiters abhängt [13, 14].

Doch auch auf der polaren c-Fläche ist die Entwicklung nicht stehen geblieben. Die erste elektrisch betriebene grüne Laserdiode mit einer Wellenlänge von 500 nm hat Osram OS 2009 mit solchen c-Flächen-Wafern entwickelt [15], inzwischen wurden 524 nm mit einer Ausgangsleistung von 50 mW erreicht [16]. Auch Nichia hat den Durchbruch zur polaren grünen LD geschafft [17]. Die Frage der optimalen Orientierung der Wafer ist also weiterhin offen.

Ob sich semipolare grüne LEDs und Laserdioden durchsetzen werden, hängt neben den technischen Vorteilen vor allem vom Preis und damit vom Substrat ab. Sobald die Epitaxie von semi- und nichtpolaren Gruppe-III-Nitriden so weit beherrscht wird, dass Quantenfilme mit niedriger Defektdichte, glatter Morphologie der Grenzflächen und geringen Indium-Fluktuationen möglich sind, stehen neue Fragen an: Lässt sich wie erwartet die Effizienz deutlich steigern? Wie ändert sich der Ladungsträgertransport in solchen Quantenfilmen? Ist das piezoelektrische Feld in polaren Gruppe-III-Nitriden notwendig für deren hohe Effizienz? Wie ist die mikroskopische Ordnung und Morphologie in diesem System? Lassen sich nun deutlich breitere Quantenfilme nutzen, die vorteilhaft hinsichtlich Ladungsträgerdichte in LEDs und Überlapp mit der optischen Mode in Laserdioden wären? Zu diesen Themen ist mehr Grundlagenforschung auf den Gebieten der Halbleiterphysik und Optoelektronik notwendig – jede Menge Aufgaben für junge Wissenschaftler. Die genannten Anwendungen im Bereich

der Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik sind sicher die wichtigsten Triebfedern für dieses Forschungsgebiet. Andere wichtige Einsatzgebiete z. B. in der Biophotonik, Materialbearbeitung und Spektroskopie werden hinzukommen, sobald effiziente Lichtemitter und Laserdioden im gesamten sichtbaren Spektralbereich verfügbar sind.

Literatur

- [1] S. Nakamura und G. Fasol, *The Blue Laser Diode*, Springer, Berlin (2000)
- [2] Y. Narukawa et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 354002 (2010)
- [3] J. M. Phillips et al., *Laser & Photon. Rev.* **1**, 307 (2007)
- [4] P. Waltereit et al., *Nature* **406**, 865 (2000)
- [5] R. Dwilinski et al., *J. Crystal Growth* **310**, 3911 (2008)
- [6] Y. Zhao et al., *Appl. Phys. Express* **3**, 102101 (2010)
- [7] B. Neubert et al., *J. Crystal Growth* **298**, 706 (2007)
- [8] T. Wunderer et al., *Appl. Phys. Lett.* **90**, 171123 (2007)
- [9] S. Schwaiger et al., *Appl. Phys. Lett.* **96**, 231905 (2010)
- [10] Y. Honda et al., *J. Cryst. Growth* **242**, 82–86 (2002)
- [11] Y. Enya et al., *Appl. Phys. Express* **2**, 082101 (2009)
- [12] A. Tyagi et al., *Appl. Phys. Lett.* **95**, 251905 (2009)
- [13] W. G. Scheibenzuber et al., *Phys. Rev. B* **80**, 115320 (2009)
- [14] J. Rass, T. Wernicke et al., *Phys. Stat. Solidi RRL* **4**, 1 (2010)
- [15] D. Queren et al., *Appl. Phys. Lett.* **94**, 081119 (2009)
- [16] A. Avramescu et al., *Appl. Phys. Express* **3**, 061003 (2010)
- [17] T. Miyoshi et al., *Appl. Phys. Express* **2**, 062201 (2009).

DIE AUTOREN

Ulrich Schwarz (FV Halbleiterphysik) studierte und promovierte im Fach Physik an der Universität Regensburg. Nach Auslandsaufenthalten an der Cornell University (USA) und in Kyoto (Japan) nahm er 2009 einen Ruf auf die Professur für Optoelektronik am Institut für Mikrosystemtechnik an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg an. Gleichzeitig leitet er eine Gruppe am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik.



Ferdinand Scholz (FV Halbleiterphysik) hat in Stuttgart Physik studiert und dort 1986 promoviert. 2003 nahm er den Ruf auf die Professur „GaN-Elektronik und -Optoelektronik“ an der Universität Ulm an, wo er stellvertretender Leiter des Instituts für Optoelektronik ist. Seit über 15 Jahren beschäftigt er sich mit der Epitaxie und Charakterisierung von nitridischen Halbleiterstrukturen. Er koordiniert derzeit die überregionale DFG-Forschergemeinschaft „PolarCoN“, deren Ergebnisse in diesen Artikel eingeflossen sind.

