

OPTOELEKTRONIK AUF SILIZIUM – EINE HERAUSFORDERUNG FÜR DIE HALBLEITERPHYSIK

Alois Krost, Armin Dadgar

Derzeit vollzieht sich, noch nahezu unbemerkt, eine Revolution auf dem Beleuchtungssektor – die Ablösung der Glühlampe durch lichtemittierende (optoelektronische) Halbleiterbauelemente, die weißen Leuchtdioden (LEDs) auf der Basis von Galliumnitrid (GaN). Galliumnitrid wird bisher entweder auf Saphir- oder auf Siliziumkarbid-Substraten hergestellt. Beide Substratarten haben jedoch einige unerwünschte physikalische Eigenschaften und sind relativ teuer. Daher ist man seit Ende der 80er Jahre auf der Suche nach alternativen Substraten wie Silizium (Si). Auf Silizium ließe sich Galliumnitrid nicht nur großflächig und kostengünstig herstellen, es böte sich auch erstmals die faszinierende Möglichkeit der optoelektronischen Integration auf Silizium. In diesem Artikel berichten wir über die Forschungsaktivitäten der Abteilung Halbleiterpitaxie am Institut für Experimentelle Physik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg auf diesem Gebiet, die bereits nach kurzer Zeit zu bauelementreifen Prototypen von blauen LEDs und Transistoren auf Silizium geführt haben.

Die Entwicklung zur modernen Informationsgesellschaft von heute basierte im wesentlichen auf zwei Materialien: den beiden Halbleitern Silizium und Galliumarsenid (GaAs). Silizium als Elementhalbleiter aus der IV. Gruppe des Periodensystems ist heutzutage mit über 95 % das in der Halbleiterindustrie meist eingesetzte Material. In den 60er Jahren schien es lange so, dass Germanium dieses Rennen machen würde. Ausschlaggebend für Silizium war schließlich, dass Silizium ein überaus beständiges, natürliches Oxid bildet, welches hervorragende Isoliereigenschaften besitzt, so dass

man leitendes und isolierendes Material für MOS-Transistoren (metal oxide semiconductor) erzeugen konnte. Darauf beruht heute die gesamte CMOS-Technologie. Silizium ist für elektronische Anwendungen prädestiniert, hat jedoch den Nachteil, dass es ein so genannter indirekter Halbleiter ist, das heißt, die Minima der mit Elektronen besetzten Valenzbänder und die Maxima der mit Elektronenfehlstellen – so genannten Löchern – besetzten Leitungsbander liegen nicht direkt übereinander, wenn man die Energie über dem Impuls aufträgt, sondern sind voneinander getrennt (Abb. 1, rechts). Prinzipiell kann ein Photon mit einer Energie, die dem energetischen Abstand der Elektronen- und der Löcherpotentiale entspricht, durch die Rekombination eines Elektrons mit einem Loch entstehen. Dazu müssen der Energie- und der Impulssatz erfüllt sein. Photonen besitzen nur einen sehr kleinen Impuls und die Trennung der Elektronen und Löcher verhindert daher eine direkte Rekombination. Möglich wird dies nur durch ein drittes Teilchen, welches den fehlenden Impuls liefert. Dies sind meist Gitterschwingungen (Phononen), und da drei Teilchen an diesem Prozess beteiligt sind (Elektron-Loch-Phonon), ist er sehr ineffizient. Dies ist der physikalische Grund dafür, dass Silizium nicht als optoelektronisches Material, z. B. für effiziente Lichtemitter, dienen kann. Lichtemittierende Halbleiter, allen voran das am weitesten entwickelte Galliumarsenid als Grundsubstanz, ein III-V-Verbindungshalbleiter¹⁾, sind heutzutage aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Man denke nur an den Scanner an der Supermarktkasse, den Laser im CD-Player oder die Mobiltelefone, welche größtenteils Galliumarsenid-basierte Sender und Empfänger enthalten. Galliumarsenid ist, anders als Silizium, ein direkter Halbleiter. Hier liegen die erwähnten Maxima und Minima direkt übereinander (Abb. 1, links), so dass eine effiziente

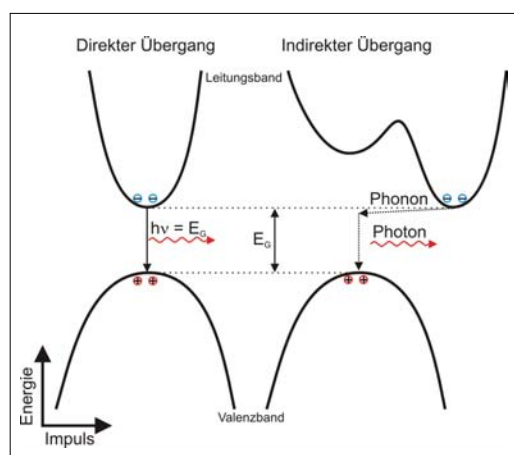


Abb. 1
Energie-Impuls-Relation für Ladungsträger in direkten und indirekten Halbleitern. Im direkten Halbleiter rekombinieren Elektronen mit Löchern unter Aussendung eines Photons der Energie der Bandlücke E_G . Da Photonen nur einen sehr kleinen Impuls besitzen, ist der Übergang in der Energie-Impuls-Darstellung senkrecht. Im indirekten Halbleiter ist der Übergang nur über ein drittes Teilchen (Phonon), das den notwendigen Impuls liefert, möglich und daher weniger wahrscheinlich.

CMOS-Technologie
(Complementary Metal Oxide Semiconductor)
ist die wichtigste Halbleitertechnologie für Mikroprozessoren und Speicherbausteine

1)
III-V-Halbleiter sind Halbleiter, die zu jeweils 50 % aus Elementen der III. und V. Hauptgruppe des Periodensystems aufgebaut sind.

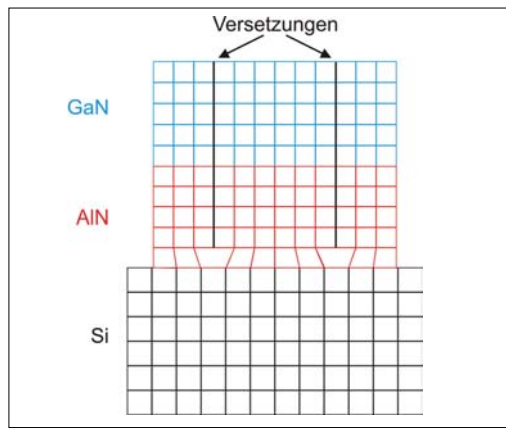


Abb. 2
Galliumnitrid bzw. Aluminiumnitrid (AlN) besitzen zu Saphir (Al₂O₃), Siliziumkarbid (SiC) und Silizium eine große Gitterfehlanpassung von 3.5 bis 17 %. Dies führt zu Versetzungsdichten von etwa 10¹² cm⁻² im Galliumnitrid. Hier im Beispiel ist vereinfacht die Versetzungsentstehung an der Silizium-Aluminiumnitrid-Grenzfläche gezeigt. Die Kästchen repräsentieren den Abstand der Atome im Kristallgitter. Zusätzliche Gitterebenen „bauen“ sich aufgrund der hohen Verspannung in der Aluminiumnitrid-Schicht ein und sorgen so für eine teilweise Entspannung des Aluminiumnitrid-Gitters, aber auch für einen Fehler im Aufbau. Ein solcher Kristallbaufehler (Versetzung) kann bis an die Oberfläche vordringen, wenn er nicht vorher ausgelöscht werden kann. Dies kann z. B. durch den Einbau von geeigneten Zwischenschichten erfolgen.

Rekombination von Elektronen aus dem Leitungsband zu unbesetzten Zuständen im Valenzband, den so genannten Löchern, stattfinden kann.

Ziel der Forscher ist es seit über 20 Jahren, die III-V-Halbleiter und Silizium miteinander zu verknüpfen, das heißt, einkristalline Schichten der III-V-Halbleiter auf Silizium abzuschneiden, um damit letztendlich die Vision einer integrierten Optoelektronik auf Silizium zu verwirklichen. Das Wachstum der III-V-Halbleiter auf Silizium, die so genannte Heteroepitaxie, brachte jedoch ungeahnte Schwierigkeiten mit sich. Aufgrund der unterschiedlichen Gitterparameter und Kristallsymmetrien bildet sich an der Grenzfläche eine ungeheuer große Anzahl (> 10¹² cm⁻²) von Kristallbaufehlern, misfit-Versetzungen genannt, aus (Abb. 2). Diese pflanzen sich zum großen Teil in die wachsende Schicht fort und sind auch später, beim fertigen Bauelement, unter dem Einfluss von thermischer Belastung beweglich. Dies ist der Grund, warum sich bis heute diese Technologie nicht durchsetzen konnte.

Die meisten Lichtemitter auf Halbleiterbasis sind einfache Dioden aus einem Löcher-(p)-lei-

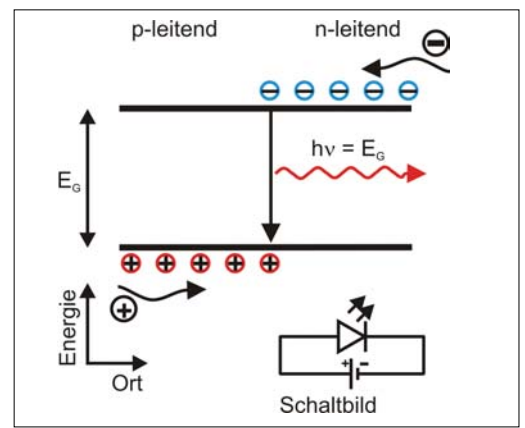


Abb. 3
Vereinfachtes Funktionsprinzip einer Licht Emittierenden Diode und Schaltbild. Die LED wird in Durchlassrichtung betrieben, wodurch Elektronen mit Löchern im Grenzbereich des p- und n-leitenden Halbleiters rekombinieren und dabei Licht mit der Energie der Energielücke (E_G) emittieren.

tendem und einem Elektronen-(n)-leitendem Material (Abb. 3). Dies kann man durch die Zugabe von Fremdatomen (Dotierstoffen) in Mengen von ca. einem millionstel Fremdatom pro Gitterbaustein gezielt einstellen. Elektronen aus dem n-leitendem Gebiet treffen am Übergang des n- und p-leitenden Bereichs auf Löcher aus dem p-leitendem Gebiet und rekombinieren dort unter Aussendung eines Photons. Die Energielücke E_G des Halbleiters bestimmt dabei die Frequenz ν und damit die Farbe des Lichts²⁾ (E_G = hν, h = Planck'sches Wirkungsquantum).

GALLIUMNITRID – EIN BESONDERER III-V-HALBLEITER

Die meisten auf III-V-Halbleitern wie Galliumphosphid (GaP), Galliumarsenid (GaAs) oder Indiumphosphid (InP) basierenden Leuchtdioden können nur Licht im infraroten bis zum gelb-grünen Wellenlängenbereich erzeugen (Abb. 4). Geeignete Materialien für die effiziente

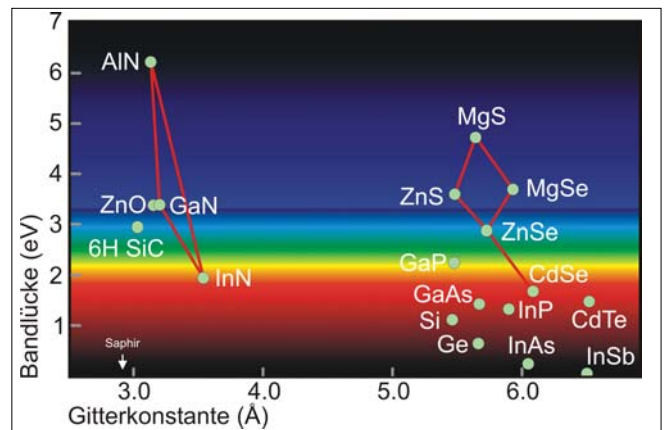


Abb. 4
Energielücke (Farbe) von Halbleitern über der Gitterkonstanten. Nur Halbleiter mit identischen Gitterkonstanten lassen sich fehlerfrei aufeinander abscheiden³⁾.

2)
Das sichtbare Lichtspektrum umfasst den Energiebereich von ca. 1.4 eV (rot) bis 3.4 eV (violett) $\hat{=}$ Regenbogenfarben. Weißes Licht ergibt sich aus einer Mischung dieser Anteile. 1 eV = 1.602 x 10⁻¹⁹ Joule (eV: Elektronenvolt)

3)
Hochverspannte Systeme lassen sich nur im Bereich von Monolagen fehlerfrei abscheiden. Dies kann für neuartige Bauelemente, z. B. Quantenpunktlaser gezielt ausgenutzt werden.

Erzeugung von blauem Licht⁴⁾ standen lange nicht zur Verfügung. Zwar bot sich der III-V-Halbleiter Galliumnitrid und die Legierung Indiumgalliumnitrid an, um Lichtemitter im blauen bis orangen Wellenlängenbereich herzustellen, aber diese Materialien ließen sich nicht p-leitend herstellen.

Die Situation änderte sich Ende der 80er Jahre, als in Japan erstmals Löcherleitfähigkeit von Galliumnitrid (p-GaN) demonstriert wurde. Damit waren die für ein optoelektronisches Bauelement erforderlichen Voraussetzungen erfüllt, was zur rasanten Entwicklung der Galliumnitrid-basierten blauen Leuchtdiode und des blauen Lasers führte. Auf der Basis von Galliumnitrid, das eine weitaus größere Bandlücke (3.4 eV) als Galliumarsenid (1.4 eV) besitzt, lässt sich durch Beimischungen von Indium und Aluminium die Energielücke und damit die Farbe des ausgesandten Lichtes in weiten Bereichen einstellen: von Ultraviolett (UV) über Violett, Blau, Grün, Gelb bis fast ins Rote (Abb. 4). Geeignete Farbmischungen führen wiederum zu weißem Licht. Weiße LEDs sind bereits kommerziell mit höherer Lichtausbeute als herkömmliche Glühlampen und Halogenlampen erhältlich. Technologisch lässt sich das beispielsweise mit einer Aluminiumreichen UV-LED realisieren, analog zum Prozess in Leuchtstoffröhren⁵⁾. Mittels Phosphoren wird das UV-Licht in die niederenergetischen Farben konvertiert. Das Verfahren wurde zeitgleich in Japan und am Fraunhofer-Institut in Freiburg entwickelt (Abb. 5).

Das Anwendungspotential der weißen LEDs wird vor allem in der Beleuchtungstechnik gesehen. Bedenkt man, dass z. B. 21 % des gesamten Energiebedarfs der USA für Beleuchtungszwecke verwendet wird, davon ca. 15 % durch herkömmliche Glühlampen mit einer Leistung von 252 Terra-Watt-Stunden pro Jahr /1/, so kann man sich das ungeheure Energiesparpotential vorstellen, denn die LEDs verbrauchen nur etwa $\frac{1}{10}$ der elektrischen Energie bei gleicher Lichtausbeute. Bereits jetzt sind in Kalifornien nahezu alle Verkehrsampeln mit LEDs ausgestattet. Diese haben nicht nur den viel geringeren Energieverbrauch, sondern auch noch eine 20fach höhere Lebensdauer als Glühlampen, so dass die Wartungskosten entfallen und sich die Umrüstung bereits innerhalb eines Jahres amortisiert hat.

Die lange Lebensdauer war auch ausschlaggebend für den Einbau der LEDs in die Armaturen von Autos, z. B. findet man blaue LEDs in allen neuen VW-Fahrzeugen. Derzeit wird intensiv daran gearbeitet, die Lichtleistung der weißen LEDs soweit zu erhöhen, dass man sie für Autoscheinwerfer einsetzen kann. In der Dritten Welt könnte mit weißen LEDs in Kombination mit Solarzellen eine kostengünstige Grundversorgung der Bevölkerung mit Licht aufgebaut werden. Mit UV-LEDs in Verbindung mit Titanoxid-Katalysatoren beispielsweise lässt sich effizient die Luft

reinigen oder Wasser entkeimen. In Japan gibt es bereits solche Luftreiniger, die den Nikotingehalt im Auto effizient und schnell beseitigen, zu kaufen.

Die Weiterentwicklung der LEDs führte zu den UV- und blauen Lasern, welche mittlerweile schon mit Wellenlängen von 366 nm (UV) bis 480 nm (fast grün) funktionieren. Mit kurzwelligen Lasern lässt sich die Speicherdichte für DVDs drastisch erhöhen. Die neue DVD-Generation (Blue Ray Disc, BRD), die voraussichtlich in einem Jahr auf den Markt kommt, kann pro Seite 27 Gigabyte Daten speichern (aktuelle DVDs: 4.7 Gigabyte); dies reicht für mehr als elf Stunden Videos. UV-Laser können aber auch für spektroskopische Zwecke in der Forschung, für die Umweltanalytik (Messung der Luftverschmutzung) oder medizinische Anwendungen eingesetzt werden. Für Projektionszwecke wie z. B. beim Laserfernsehen werden kompakte und effiziente Laser im Blauen benötigt. Bei sinkenden Preisen für solche Laser, die derzeit weit über 1 000 Euro kosten, erwartet man den Durchbruch der Laserprojektionstechniken im Massenmarkt.

Galliumnitrid ist aber nicht nur für optoelektronische, sondern auch für elektronische Anwendungen interessant. Aufgrund einer extrem hohen Temperaturbeständigkeit lassen sich z. B. Transistoren bauen, welche noch bei 600 °C funktionieren. Derartige Elemente werden z. B. im Automobilbau zur besseren Motorüberwachung benötigt. Aufgrund seiner chemischen Resistenz ist es dabei auch noch für den Einsatz in aggressiven Medien geeignet. Tageslichtunempfindliche UV-Detektoren (solar blind detectors) sollen vor allem Einsatz bei Verbrennungsvorgängen finden. Aufgrund seines hohen Piezoeffizienten (eine mechanische Verformung erzeugt eine elektrische Spannung) ist Galliumnitrid auch als Sensormaterial zur Messung von Spannungen und Drücken geeignet. Extrem günstige Hochfrequenzeigenschaften prädestinieren es darüber hinaus für Radaranwendungen.

Dazu kommt die Eigenschaft, dass es sich im Gegensatz zu den herkömmlichen III-V-Halbleitern überaus gutmütig hinsichtlich der Versetzungen verhält. Selbst bei hoher Versetzungsdichte um 10^{10} cm^{-2} lassen sich noch langlebige Bauelemente, wie die blauen Leuchtdioden, herstellen. Der Grund dafür ist die hohe Aktivierungsenergie zur Bewegung einer Versetzung; einmal gebildet, wandern die Versetzungen auch bei hoher thermischer Belastung nicht mehr durch den Kristall.

GALLIUMNITRID AUF SILIZIUM

Damit eröffnete sich erstmals eine realistische Möglichkeit zur Verwirklichung von Galliumnitrid-basierten Bauelementen auf Silizium. Im Fall des Galliumnitrid besitzt Silizium noch einige andere Vorteile. Mangels fehlender Galliumnitrid-Kristalle – diese lassen sich nur mit ungeheuer



Abb. 5
Zum 50-jährigen Jubiläum der Fraunhofer-Gesellschaft wurde von der Post eine Briefmarke mit LEDs in den drei Grundfarben blau, grün, rot und einer weißen LED herausgebracht.

4)
In den 80er Jahren wurden blaue Leuchtdioden auf der Basis von Siliziumkarbid (SiC) entwickelt, die aufgrund der indirekten Bandlücke des SiC nur sehr ineffizient leuchten.

5)
Hier wird eine Quecksilberentladung, die Licht im Ultraviolettbereich erzeugt, genutzt, um die Phosphore zum Leuchten anzuregen.

rem Aufwand züchten – ist man bei Galliumnitrid-Bauelementen immer auf Fremdkristalle wie Saphir (Al_2O_3) und Siliziumkarbid (SiC) als Wachstumsunterlage (Substrat) angewiesen. Saphir z. B. ist jedoch anders als Silizium immer elektrisch isolierend und nur sehr schwer zu bearbeiten, außerdem ca. 10-mal teurer. Siliziumkarbid ist sogar ca. 100-mal teurer als Silizium. Zudem ist Silizium großflächig vorhanden, derzeit werden bereits Wafer bis zu 300 mm Durchmesser gefertigt, und verfügt über eine ausgereifte Technologie. Von daher bietet sich Silizium als Substrat geradezu idealerweise an.

Leider hat die Natur die Sache nicht ganz so einfach eingerichtet, wie bis jetzt beschrieben. Die beiden Materialien besitzen abgesehen von der hohen Gitterfehlpassung (Abb. 2) sehr unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten. Da hochwertiges Galliumnitrid immer bei hohen Temperaturen gewachsen wird, kommt es bei der Abkühlung zu ungeheuren Spannungen, die im Fall von Galliumnitrid auf Silizium bei einer Schichtdicke von ca. $1 \mu\text{m}$ ($1/1000 \text{ mm}$) im wahrsten Sinne des Wortes zu Filmrissen und damit zur Zerstörung der gewachsenen Schicht führen. Es kann sogar vorkommen, dass sich schon während des Wachstums Risse bilden⁶⁾, so dass Gallium in direkten Kontakt mit Silizium

kommen kann, was bei den hohen Temperaturen ($1000 \text{ }^\circ\text{C}$) zu einer heftigen chemischen Reaktion und damit zu einer Zerstörung von Schicht und Substrat führt. Diese Schwierigkeiten sind der Grund, warum sich trotz weltweiter Bemühungen bis heute keine Galliumnitrid-Technologie auf Silizium entwickelt hat. In der Magdeburger Arbeitsgruppe Halbleiterepitaxie werden verschiedene Wege verfolgt, diese Probleme zu lösen. Vorher sei jedoch noch kurz das Wachstumsverfahren beschrieben.

METALLORGANISCHE GASPHASENEPITAXIE

Es gibt derzeit im wesentlichen zwei Verfahren, mit denen moderne III-V-Bauelemente hergestellt werden. Die Molekularstrahlepitaxie (MBE) und die metallorganische Gasphasenepitaxie (MOCVD, metal organic chemical vapor deposition, auch MOVPE metal organic vapor phase epitaxy genannt). Die MOCVD wird vor allem für Anwendungen im industriellen Maßstab eingesetzt. Sie ist universell, da man praktisch für jede gewünschte Verbindung einen metallorganischen Ausgangsstoff synthetisieren kann (Metallorganische Chemie ist das Arbeitsgebiet von Prof. Frank Thomas Edelmann an der Magdeburger Universität). Bei diesem Verfahren werden die Gruppe-III-Ausgangskomponenten in Form von einer oder mehreren metallorgani-

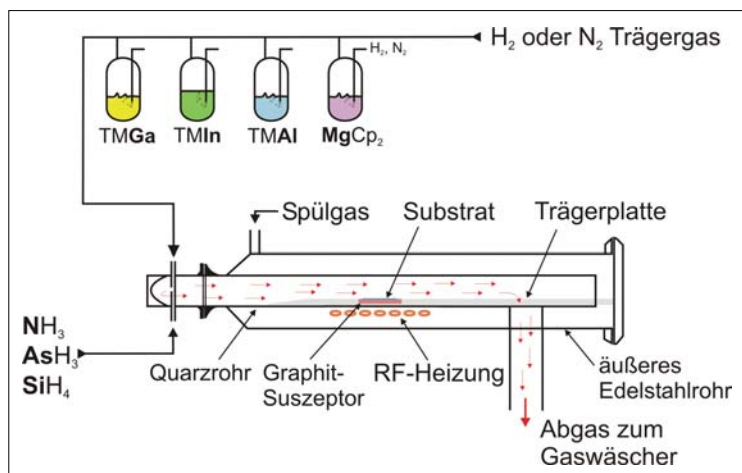
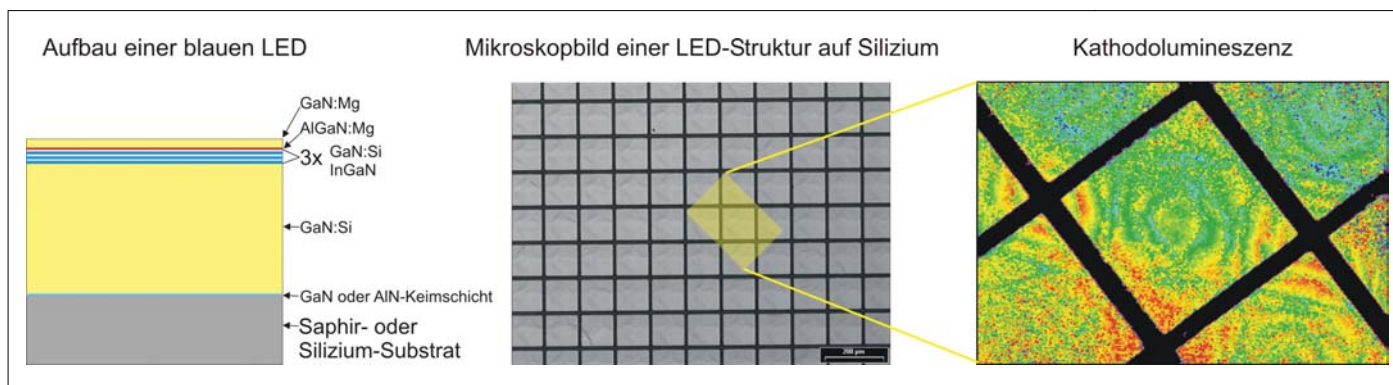


Abb. 6
Prinzip der metallorganischen Gasphasenepitaxie

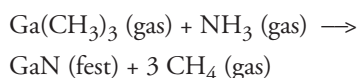


Abb. 7
MOCVD-Anlage

6) Das Galliumnitrid-Wachstum beginnt mit dem Wachstum von vielen Galliumnitrid-Keimen bzw. -Inseln, die auch bei dickeren Schichten eine schwache Zugverspannung während des Wachstums bewirken.



schen Verbindungen in flüssiger oder fester, hochreiner Form in geschlossenen Behältern bereitgestellt. Über der Flüssigkeit oder dem Festkörper bildet sich ein nur von der Temperatur abhängiger, metallorganischer Dampf aus, welcher mittels eines Trägergases, meist Wasserstoff oder Stickstoff, in den Reaktor geführt wird (Abb. 6). Die Gruppe-V-Komponente, meist ein Hydrid, wird direkt aus einer Gasflasche dem Reaktor zugeführt. Im Reaktor befindet sich das zuvor sorgfältigste gereinigte Silizium-Substrat auf einer rotierenden Unterlage, welche von unten induktiv auf die gewünschte Wachstumstemperatur aufgeheizt wird. Die zugeführten Gase werden bei hohen Temperaturen zerlegt, die Ausgangsprodukte scheiden sich dabei als dünne, kristalline Schicht (die Epitaxieschicht) auf dem Silizium-Substrat ab. Das Verfahren funktioniert optimal, wenn die Gase in einem Laminarstrom zugeführt werden, so dass keine Wirbel entstehen. Laminare Strömung wird aufrechterhalten, indem der gesamte Reaktor mittels einer Vakuumpumpe auf ca. 100 mbar Unterdruck gehalten wird. Die Netto-Reaktionsgleichung für die Abscheidung von Galliumnitrid lautet dann beispielsweise:



Die dabei entstehenden Gase und unzerlegten Bestandteile werden abgepumpt und einem Gaswäscher (Scrubber) zugeführt, in dem sie gebunden werden. Der gesamte Prozess wird rechnergesteuert geführt. Aufgrund der hohen Gasgeschwindigkeit ($> 1 \text{ m/s}$) und Ventilen mit sehr geringen Totvolumina kann das Wachstum von Schichten bis hinab zu einer einzigen Atomlage gesteuert werden. Solche extrem dünnen Schichten werden beispielsweise in Form von so genannten Quantenwells als lichtemittierende Komponenten in LEDs eingesetzt.

RISSFREIE GALLIUMNITRID-SCHICHTEN AUF SILIZIUM

Zur Erzielung von rissfreien Galliumnitrid-Schichten auf Silizium-Substrat wurden von der Magdeburger Arbeitsgruppe drei verschiedene Verfahren entwickelt, welche im Folgenden dargestellt sind. Zunächst gilt es, bei den hohen Wachstumstemperaturen von über 1000°C das

Silizium-Substrat vor dem Einfluss von Gallium zu schützen, da die beiden Komponenten heftig miteinander reagieren. Dies gelingt, indem bei relativ niedriger Temperatur eine Aluminiumnitrid-Keimschicht abgeschieden wird [2]. Diese ca. 20 nm dicke Schicht benetzt das Substrat vollständig und sorgt für eine gute kristalline Ausrichtung der darauf gewachsenen Galliumnitrid-Schicht. Trifft man keine Vorkehrungen, so kommt es ab einer Schichtdicke von ca. $1 \mu\text{m}$ nach dem Abkühlen zu Rissen.

Spannungskompensation

Dies kann verhindert werden, indem man Spannungskompensation betreibt, das heißt abwechselnd zug- und druckverspannte Schichten, z. B. Galliumnitrid und Aluminiumgalliumnitrid, geeigneter Dicke einbaut [3]. Diese vorgespannte Pufferschicht im unteren Teil der Struktur hat dann gegenüber Galliumnitrid eine kleinere Gitterkonstante, worauf man druckverspanntes Galliumnitrid abscheiden kann. Dieses Galliumnitrid ist zwar nach dem Abkühlen meist leicht zugverspannt, aber bei geeigneter Pufferschicht ohne Risse. Hierbei ist das Produkt aus Schichtdicke und Verzerrung der Galliumnitrid- und Aluminiumgalliumnitrid-Schichten maßgebend. Bei geeigneter Wahl der Parameter lassen sich so rissfreie Schichten bis zu ca. $3 \mu\text{m}$ Dicke herstellen, welche man vorteilhaft für die Herstellung von Bauelementen nutzen kann. Das Verfahren hat unter anderem den Nachteil, dass der Serienwiderstand durch den Einbau der Aluminiumhaltigen Schichten relativ groß wird, so dass die Einsatzspannungen für die LEDs, verglichen mit den herkömmlichen, noch zu hoch sind, und dass die Gesamtschichtdicke limitiert ist.

Substratstrukturierung

Eine weitere Möglichkeit, die Rissbildung zu verhindern, ist es, das Silizium-Substrat mit photolithografischen Methoden in kleinere Felder zu strukturieren, so wie in der Mitte der Abbildung 8 gezeigt [4, 5]. Geeignet dazu sind entweder Siliziumnitrid-Masken oder einfach nur -Gräben. Während der Epitaxie baut sich das Material dort nicht ein, sondern diffundiert zu den freien Bereichen auf der Silizium-Oberfläche. So konnten in Magdeburg rissfreie LEDs mit $2.5 \mu\text{m}$ Dicke auf einer Fläche von

Abb. 8 Aufbau einer LED auf strukturiertem Silizium-Substrat (links), in Aufsicht das Raster-elektronenmikroskopbild solcher Strukturen (hier $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ Strukturen, Mitte) und die Lumineszenz durch Anregung mit einem Elektronenstrahl (rechts). Das Lumineszenzbild zeigt in Falschfarbendarstellung das Wellenlängenmaximum, was durch eine leichte Fluktuation der Schichtdicke zu Interferenzmustern führt.

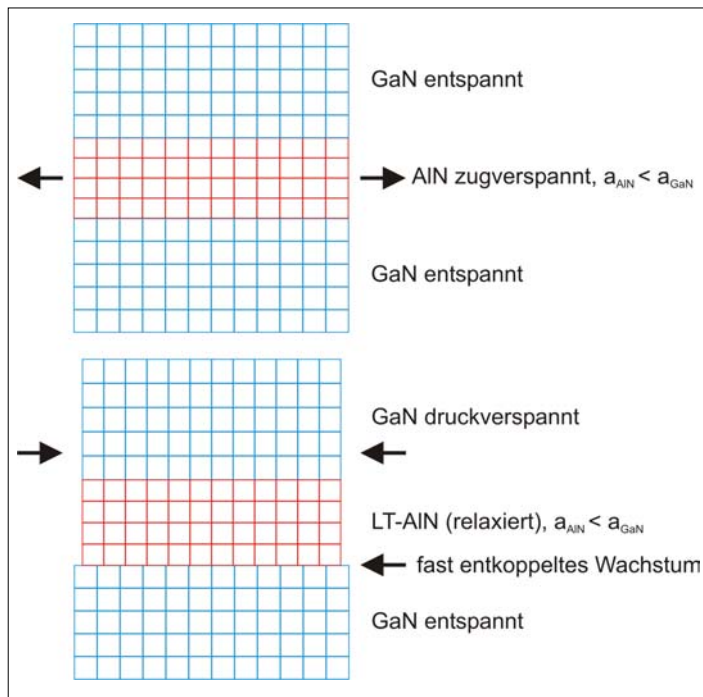


Abb. 9
Prinzip der Spannungsrelaxation und -kompensation durch LT-AlN-Schichten: Wird Aluminiumnitrid, das eine kleinere Gitterkonstante a als Galliumnitrid besitzt, bei normalen Wachstumstemperaturen dünn auf Galliumnitrid aufgewachsen, gefolgt von einer weiteren Galliumnitrid-Schicht, so ist das Aluminiumnitrid voll verspannt und damit stark zugverspannt (oben). Im Gegensatz dazu wächst die LT-AlN-Schicht quasi unverspannt bzw. entkoppelt, d. h. ohne die Gitterkonstante des darunterliegenden Galliumnitrid vollständig zu übernehmen auf (unten). Dabei wird jedoch die Kristallorientierung übernommen und sogar leicht verbessert. Das auf dem Niedrigtemperatur-Aluminiumnitrid abgeschiedene Galliumnitrid wächst nun bis zu einer gewissen Dicke leicht druckverspannt, was wiederum die beim Abkühlen entstehende Zugverspannung kompensiert. Um mit dieser Methode dicke Galliumnitrid-Schichten abzuschneiden, müssen die LT-AlN-Schichten nach ca. 0.7-1 μm Galliumnitrid-Wachstum wiederholt abgeschieden werden. Dies ist mit dem Aufbau der meisten Bauelemente kompatibel.



Abb. 10
Aufbau der LED-Struktur: auf einem hochleitfähigem n-Typ-Silizium-Substrat wird eine ca. 20 nm dicke Aluminiumnitrid-Keimschicht bei niedrigen Temperaturen abgeschieden. Darauf kommt ein siliziumdotierter Galliumnitrid-Puffer bei Wachstumstemperaturen von ca. 1 050 °C, der mit Hilfe der Niedertemperatur(LT)-AlN:Si-Zwischenschichten am Reißen gehindert wird. Als aktive Schicht werden bei niedriger Temperatur (700-800 °C) Indiumgalliumnitrid- bzw. Galliumnitrid-Multiquantumwells abgeschieden (5-mal). Hier ist nur die Galliumnitrid-Barriere mit Silizium dotiert. Als Deckschicht und für den p-Typ-Kontakt werden darauf ca. 15 nm $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N:Mg}$ und ca. 200 nm GaN:Mg abgeschieden.

300 x 300 μm^2 hergestellt werden, was für diese Bauelemente völlig ausreichend ist. Bei diesem Verfahren werden die Spannungen dadurch abgebaut, dass das Substrat in den nichtüberwachsenen Bereichen reißt, man sozusagen Sollbruchstellen eingebaut hat, in denen die Risse geführt werden. Das Verfahren ist für die Herstellung von LEDs gut geeignet, hat jedoch den Nachteil, dass man für andere Bauelemente, z. B. Transistoren oder Transistorschaltungen, ebenfalls immer auf die Felder angewiesen ist. Daher ist das Ziel letztendlich, rissfreie Schichten beliebiger Dicke auf planarem Substrat herzustellen. Dies kann nur funktionieren, wenn die Spannungsenergie während des Wachstums nicht kontinuierlich mit der Schichtdicke aufgebaut wird⁵⁾ und eine die thermische Verspannung reduzierende Vorspannung vorhanden ist.

Spannungsrelaxation und -kompensation

Um das Aufbauen von Verspannungen zu verhindern, haben wir in die Struktur in bestimmten Abständen ca. 10 nm dünne Zwischenschichten aus Aluminiumnitrid bei niedriger Wachstums-

temperatur eingefügt /6, 7/. Diese so genannten LT-AlN-Schichten (LT: low temperature) bewirken, dass das darunter und darüber befindliche Galliumnitrid nicht mehr mit derselben Gitterkonstanten aufeinander wachsen und somit voneinander entkoppelt werden, wobei die kristallographische Symmetrie erhalten bleibt (Abb. 9). Dies geht aus röntgenographischen Messungen eindeutig hervor. Durch die kleinere Gitterkonstante des Aluminiumnitrid wird das darauf wachsende Galliumnitrid leicht druckverspannt, was der Zugverspannung, die schon beim Wachstum und vor allen Dingen beim Abkühlen entsteht, entgegenwirkt. Somit kann man fast spannungsfreies Material erhalten. Gleichzeitig bewirken diese Schichten, dass ein Teil der an der Silizium-Aluminiumnitrid-Grenzfläche entstandenen Versetzungen an ihnen gestoppt und somit die Materialqualität erheblich verbessert wird. Der Mechanismus dazu wird derzeit intensiv untersucht. Möglicherweise löschen sich dort Versetzungsdipole mit unterschiedlichem Vorzeichen gegenseitig aus. Erstaunlicherweise sind die Aluminiumnitrid-Schichten auch sehr gut leitend

und behindern kaum den vertikalen Stromtransport. Dies könnte daran liegen, dass diese Schichten einen geringen Aluminium-Überschuss aufweisen, welcher auch für die notwendige plastische Verformung sorgt, was derzeit ebenfalls intensiv untersucht wird.

Wiederholt man den LT-AlN-Zwischenschritt periodisch, so lassen sich rissfreie Galliumnitrid-Schichten beliebiger Dicke auf planarem Silizium abscheiden. Derartige Strukturen werden benutzt, um darauf LEDs mit Mehrfach-Indiumgalliumnitrid- bzw. Mehrfach-Galliumnitrid-Quantentöpfen abzuscheiden (Abb. 10).

Es konnten nach wenigen Versuchen bereits Lichtleistungen von mehr als 0,4 mW bei 20 mA erzielt werden; das ist nur noch ein Faktor 10 weniger als bei optimierten kommerziell erhältlichen Dioden. Die Helligkeit der von der Magdeburger Halbleiterpitaxiengruppe entwickelten LEDs ist schon jetzt, nach einer relativ kurzen Entwicklungszeit von weniger als einem Jahr, für die Anwendung in einfachen Signallampen ausreichend. Der Nachteil von LEDs auf Silizium ist die Absorption des entstehenden Lichts im Silizium-Substrat, was die Helligkeit immer auf ca. 50 % der von LEDs auf Saphir bzw. Siliziumkarbid beschränkt. Silizium bietet hier jedoch als einziges der drei Substrate einen großen Vorteil: Es lässt sich einfach nasschemisch entfernen. Damit ergeben sich ganz neue Möglichkeiten zum Abführen der Wärme, die aufgrund von Verlusten, insbesondere bei Hochleistungs-LEDs, die Effizienz limitiert. Somit ist die

von uns gefundene Möglichkeit, dicke Galliumnitrid-Schichten auf Silizium abzuscheiden, nicht nur eine Ergänzung zu LEDs auf Saphir und Siliziumkarbid, sondern ein vollwertiger, kostengünstiger Ersatz dieser Substrate für zukünftige LED-basierte Lichtquellen.

Aber nicht nur für Lichtemitter eignet sich Silizium-Substrat, sondern auch für Hochleistungselektronik wie Hochtemperatur- und Hochfrequenzbauelemente. Da die dafür zwingend notwendigen Schichtdicken gering sind und somit das Rissproblem vermindert ist, bildete es bislang den Schwerpunkt der internationalen Forschung am Galliumnitrid auf Silizium. Hier wurde von den Magdeburger Wissenschaftlern als weiteres Bauelement eine erste Transistorstruktur gewachsen, die in Zusammenarbeit mit der Universität Ulm prozessiert wurde. Auch hier sind die ersten Ergebnisse an Strukturen mit LT-AlN-Schichten überraschend gut.

Mit den hier vorgestellten Arbeiten ist es gelungen, die Heteroepitaxie von Galliumnitrid auf Silizium in bauelementrelevante Bereiche voranzutreiben und einen wesentlichen Schritt für die Entwicklung von preiswerten, energiesparenden Lichtquellen zu leisten. Dies ist jedoch erst der Beginn. Wünschenswert für eine monolithische Integration ist es, den Prozess auf die technologisch noch interessantere Silizium(100)-Substratoberfläche zu übertragen. Speziell die Realisierung von Galliumnitrid auf CMOS-kompatiblen Silizium(100) ist dabei von Interesse.

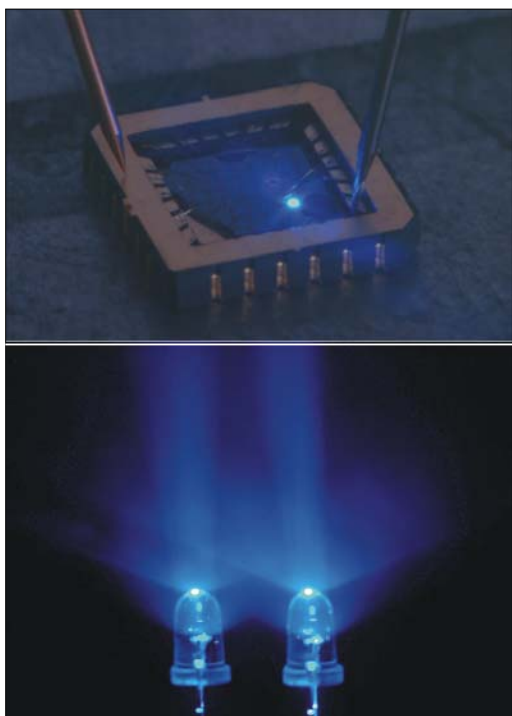


Abb. 11
Blaue Galliumnitrid-LEDs auf Silizium-Substrat im Testgehäuse (oben) und eingegossen in Kunststoffgehäusen (unten).

Dank

Allen Mitarbeitern sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Die wertvolle Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Jürgen Christen und seiner Arbeitsgruppe sei nachdrücklich erwähnt. Die Arbeiten werden im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Gruppe III-Nitride und ihre Heterostrukturen: Wachstum, materialwissenschaftliche Grundlagen und Anwendungen“ finanziell gefördert.

Literatur

- /1/ M. Krimes, Lumileds Lighting, 4th Int. Symp. on Blue Lasers and Light Emitting Diodes (ISBLED), Cordoba (Spain), March 2002
- /2/ AIXTRON AG, A. Dadgar und A. Krost, Verfahren und Apparatur zur Herstellung von Gruppe-III-N, Gruppe-III-V-N und Metall Stickstoff Bauelementstrukturen auf Si-Substraten mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie, nationale und internationale Patentanmeldungen unter DE 10009945, PCT/DE 01/00777
- /3/ A. Dadgar, J. Christen, T. Riemann, S. Richter, J. Bläsing, A. Diez, A. Krost, A. Alam und M. Heuken, Bright blue electroluminescence from an InGaN/GaN multiquantumwell diode on Si (111): Impact of AlGaIn/GaN bragg-reflector, Appl. Phys. Lett. 78, 2211 (2001)
- /4/ A. Dadgar, A. Krost, Verfahren zur Herstellung von rißfreien planaren Gruppe-III-N, Gruppe-III-V-N und Metall Stickstoff Bauelementstrukturen auf Si-Substraten mittels epitaktischer Methoden, Patentanmeldung DE 100 56 645
- /5/ A. Dadgar, A. Alam, T. Riemann, J. Bläsing, A. Diez, M. Poschenrieder, M. Straßburg, J. Christen, and A. Krost, Crack-free InGaIn/GaN light emitters on Si(111) phys. stat. sol. (a) 188, 155 (2001)
- /6/ A. Dadgar, A. Krost, Verfahren zur Herstellung von planaren und rißfreien Gruppe-III-Nitrid-basierten Lichtemitterstrukturen auf Silizium Substrat, Patentanmeldung DE 101 51 092
- /7/ A. Dadgar, M. Poschenrieder, J. Bläsing, K. Fehse, A. Diez und A.Krost, Thick, crack-free blue light emitting diodes on Si(111) using low temperature AlN interlayers and in-situ Si_xN_y masking, Appl. Phys. Lett. 80, 3670 (2002)

**Prof. Dr. rer. nat. Alois Krost,**

Jahrgang 1951, studierte und promovierte 1981 an der RWTH Aachen Physik mit dem Schwerpunkt Halbleiterphysik, danach akademischer Oberrat an der TU Berlin, 1995 Habilitation in Experimentalphysik. Seit 1998 ordentlicher Professor am Institut für Experimentelle Physik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Aktuelle Forschungstätigkeiten: MOCVD von wide-band-gap-Halbleitern und deren Charakterisierung, insbesondere mit Röntgenbeugung.

**Dr. Armin Dadgar,**

Jahrgang 1966, studierte Physik in Heidelberg und an der TU Berlin, an der er 1999 promovierte. Seitdem ist er in der Fakultät für Naturwissenschaften der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg als wissenschaftlicher Assistent tätig. Forschungstätigkeiten: MOCVD von wide-band-gap-Halbleitern, speziell die Heteroepitaxie auf Fremdsubstraten.