



Ferdinand-Braun-Institut
für Höchstfrequenztechnik



Entwicklung und Erprobung neuer Instrumente zur Bildung von Verwertungs- und Transfernetzen innerhalb der Leibniz-Gemeinschaft: Leibniz WideBaSe Research

Förderkennzeichen: 01 SF 0713

Laufzeit: 01.10.2007 - 31.12.2008

Berichtszeitraum: 01.10.2007 – 31.12.2008

Abschlussbericht

Institutsleiter: Prof. Dr. G. Tränkle (FBH) Prof. Dr. R. Fornari (IKZ)

Projektleiter: Dr. M. Weyers

Bearbeiter:

FBH:	IKZ:
Dr. F. Brunner	Dr. J. Wollweber
N. Hübener	C. Hartmann
Dr. A. Knauer	Dr. A. Dittmar
V. Küller	R. Nitschke
T. Petzke	M. Ziem
Dr. O. Reentilä	P. Lange
T. Tessaro	U. Jendritzki

I. Kurzdarstellung

I.1. Aufgabenstellung

Das Vorhaben hatte zwei unterschiedliche Arten von Aufgaben. Die erste Aufgabe war es, Wege zu einer verwertungsorientierten Netzwerkbildung innerhalb der Leibniz-Gemeinschaft aufzuzeigen und diese auszuprobieren. Dies sollte anhand von fachlichen Fragestellungen zu breitlückigen Halbleitern (wide bandgap semiconductors; WideBaSe) geschehen. Entsprechend dem Profil der beiden beteiligten Institute waren diese Fragestellungen die Konzepterstellung für eine verbesserte Kristallzüchtungsanlage für AlN (IKZ) sowie die Entwicklung von Epitaxieteilprozessen für UV-LEDs mit Emission bei ca. 300 nm und die Verbesserung der technologischen Grundlagen für diese Bauelemente durch einen hochtemperaturfähigen GaN-Reaktor für mehrere 4"-Wafer (FBH).

I.2. Voraussetzungen für die Vorhabensdurchführung

Beide beteiligten Einrichtungen haben Erfahrung in der Verwertung der eigenen Forschungsarbeiten. Punktuell haben IKZ und FBH auch in der Vergangenheit in Förderprojekten zusammengearbeitet und sich in ihrer Arbeit unterstützt. Erfahrungen in unterschiedlichen Netzwerken war bei beiden Einrichtungen z.B. aus Verbundprojekten vorhanden. Bisher wurden jedoch Forschungsergebnisse nicht gemeinsam sondern nur jeweils durch die einzelnen Institute verwertet.

Das FBH hat in den letzten Jahren durch den Aufbau einer Gruppe „Netzwerke“ umfangreiche Erfahrung im Aufbau und im Management von Netzwerken – insbesondere auf dem Feld der Ausbildung – gewonnen.

Auf dem Fachgebiet WideBaSe hat das IKZ langjährige Erfahrung zur Kristallzüchtung von SiC, ZnO sowie AlN und GaN. Für AlN wurden dabei Probleme identifiziert, die durch apparative Verbesserungen lösbar erscheinen.

Das FBH arbeitet seit langem an GaN-Transistoren und GaN-Laserdioden im Bereich um 410 nm. Dieses Tätigkeitsfeld wurde 2007 auch auf LEDs mit kürzeren Wellenlängen ausgedehnt. Die Epitaxie stellt dabei einen Engpass in der Kapazität dar und die Arbeiten haben gezeigt, dass insbesondere für AlN Wachstumstemperaturen vorteilhaft sind, die über den normalerweise zugänglichen Temperaturen liegen.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Es war geplant, dass die fachliche Arbeit zur AlN-Einkristallzüchtung und zur Epitaxie von AlN und AlGaIn für UV-LEDs nicht nur der Weiterentwicklung der technologischen Grundlagen dienen sollten, sondern auch als „Aufhänger“ für den Aufbau eines verwertungsorientierten Netzwerks genutzt werden. Entsprechend dieser Planung wurden die fachlichen Arbeiten in den beiden beteiligten Instituten durchgeführt und Teilergebnisse genutzt (durch Darstellung auf Seminaren und der Sommerschule) um (potentielle) Netzwerkpartner zu informieren, interessieren und zu gewinnen. Neben der Vernetzung innerhalb der Leibnizgemeinschaft lag dabei der Fokus insbesondere darauf, die Bildung eines Netzwerks zwischen auf dem Feld „WideBaSe“ tätigen Unternehmen zu unterstützen. Diese Vernetzungsaktivitäten wurden durch den Netzwerkmanager koordiniert und die fachlich beteiligten Wissenschaftler unterstützt.

I.4. wissenschaftlich und technischer Stand zu Vorhabensbeginn

Der wissenschaftliche Stand zu Vorhabensbeginn ist im Antrag dokumentiert. Da es sich bei den fachlichen Arbeiten um solche der Grundlagenforschung handelt, bilden Schutzrechte keine Einschränkung. Für die fachliche Arbeit wurde die einschlägige Fachliteratur berücksichtigt. Eine vollständige Auflistung ist hier nicht möglich. Zur Recherche der Fachliteratur wird z.B. ISI Web of Science routinemäßig eingesetzt. Sonstige Informations- und Dokumentationsdienste wurden nicht genutzt.

In Hinblick auf den Aspekt der Vernetzung lag bei beiden Partnern Erfahrung in gemeinsamen Projekten sowohl mit Industriepartnern als auch mit Forschungseinrichtungen. Mit dem

Aufbau eines weiter gespannten aber fachlich fokussierten Netzwerks unabhängig von der gemeinsamen Bearbeitung von Förderprojekten bestand jedoch keine Erfahrung.

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben ist Teil des Dachvorhabens „Entwicklung und Erprobung neuer Instrumente zur Bildung von Verwertungs- und Transfernetzen innerhalb der Leibniz-Gemeinschaft“. Die Geschäftsstelle der Leibniz-Gemeinschaft wird bei der Auswertung der unterschiedlichen Ansätze der verschiedenen Teilvorhaben im Rahmen des Dachvorhabens unterstützt.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Erzielte Ergebnisse

Übersicht:

Im Berichtszeitraum wurden folgende wichtige Ergebnisse erzielt:

Arbeitspaket 1 – Aufbau des Netzwerks

- Workshops mit Forschungseinrichtungen zur Erweiterung des Netzwerks Leibniz Wide-BaSe Research
- Antragsstellung zum regionalen Wachstumskern „Berlin WideBaSe Applications“
- Workshop „GaN-Bauelemente“ auf der Microsystems Summer School Berlin
- Beteiligung an BMBF-Verbund „Deep-UV LEDs“ (FBH)
- Projekt „UV-Photodetektoren“ (FBH mit Epigap)
- Antrag „Neue Sensorkonzepte basierend auf der Funktionalisierung von Nitridhalbleiterbauelementen mit Biomolekülen“ (FBH – ISAS) im Rahmen des SAW-Verfahrens
- Antragstellung für AiF-Projekt „Mikrowellenstimulierte Plasmakammer“ (IKZ, Steremat, INP)
- Antragsstellung für DFG-Projekt (IKZ, INP)

Arbeitspaket 2 – Konzeption Reaktor für Sublimationszüchtung

- Test für HF-Heizung für $T > 2000^\circ\text{C}$ mit Wärmedämmung durch metallische Strahlungsschilde, Adaption des Temperaturfeldes für AlN-Sublimationszüchtung
- Numerische Simulation der Mikrowellenkammer für lokale Erwärmung von AlN-Quellpulver; Aufbau einer Testkammer (IKZ, IBF Electronic)
- Abschluss der Tests für Generationswechsel zu Anlagen mit sauerstoff- und kohlenstofffreier Züchtungsumgebung
- Konzeption/Konstruktion der Module Sublimation und Mikrowellenkammer; Integration der Module, Bau der Anlage (Fa. Steremat)

Arbeitspaket 3 – Grundlagenentwicklung für LEDs im tiefen UV

- Wachstumstechnologie für AlN-Basissschichten auf Hochtemperaturreaktor weiterentwickelt.
- QW-Strukturen mit Emission bei ca. 300 nm demonstriert.
- LEDs bei 375 nm, 345 nm und 320 nm realisiert.

II.1.1. AP1: Aufbau des Netzwerks

Workshops mit Forschungseinrichtungen zur Erweiterung des Netzwerks Leibniz WideBaSe Research

Im ersten Halbjahr 2008 haben zwei Workshops mit Berliner und Brandenburger Leibniz Einrichtungen stattgefunden. Der Aufbau eines Forschungsnetzwerks innerhalb der Leibniz-Gemeinschaft zur Erforschung der Materialeigenschaften von und Entwicklung der Technologie für WideBaSe – mit dem Schwerpunkt (Al,Ga,In)N - wurde damit intensiviert. Beim ersten Workshop am 28.02. haben sechs Einrichtungen anhand von acht wissenschaftlichen Vorträgen ihre aktuellen Forschungsschwerpunkte und Projekte dargestellt. Daraus wurde eine Matrix zu den Kompetenzen der einzelnen Einrichtungen erstellt. Vereinbart wurden der Einbezug einer weiteren Einrichtung sowie bilaterale Gespräche zu Kooperationen. Diese bildeten die Grundlage zum 2. Workshop am 08.04. Die zwischenzeitlich stattgefundenen zahlreichen bilateralen Gespräche zeigten das Interesse von allen Beteiligten zu einer langfristigen gemeinsam abgestimmten Zusammenarbeit in diesem Themenfeld. Vereinbart wurden weitere bilaterale Abstimmungen zur Initiierung von FuE-Projekten sowie eine zentral gesteuerte Ansprache von Unternehmen zur Einrichtung einer Verwertungsplattform. Hierfür wurde das Förderkonzept „Unternehmen Region“ als passend identifiziert.

Workshop „GaN-Bauelemente“ auf der Microsystems Summer School Berlin

Im Rahmen der Microsystems Summer School Berlin (14.-19.09.) wurde ein Tag (19.09.) mit dem Schwerpunkt „GaN-Bauelemente“ angeboten. Zusätzlich zu den an der gesamten Woche teilnehmenden Studierenden, Diplomanden und Doktoranden aus ganz Deutschland wurden zu diesem Thema regionale Unternehmensvertreter eingeladen. Die Teilnehmenden erhielten einerseits einen Überblick über den aktuellen technologischen Stand, was viele Unternehmen als Weiterbildungsmöglichkeit wahrnahmen. Andererseits wurden im Anschluss die notwendigen Schritte zur gemeinsamen Initiierung des regionalen Wachstumskerns besprochen und Interessen ausgetauscht. Sowohl für die Industrie-, als auch für die Forschungsvertreter wurde mit dem Workshop die Bedarfs- bzw. Angebotslage deutlich, von allen Seiten wurde das Interesse an einer intensiven Zusammenarbeit bestätigt. Der Workshop diente auch zum Kennenlernen, da persönliche Kontakte und Vertrauen grundlegende Erfolgskriterien für Netzwerkarbeit sind.

Spezifische Vorlesungen

Zur Nachwuchssicherung auf dem Feld WideBaSe wurden über die oben dargestellte Vortragsreihe auch Lehrveranstaltungen initiiert bzw. die Themenstellung in bestehende Vorlesungen integriert. An der TU Berlin wurde eine Vorlesung „GaN-Leistungselektronik“ ins Leben gerufen und Aspekte von WideBaSe finden auch Eingang in die Vorlesung „Angewandte Physik“.

Vernetzung mit anderen wissenschaftlichen Einrichtungen (Schwerpunkt Leibniz) und Unternehmen

Gestartet wurde das Vorhaben durch das FBH und das IKZ. Anhand der Workshops mit den weiteren Forschungseinrichtungen wurden Forschungsschwerpunkte aufgedeckt. Folgende Matrix zu den vorhandenen Kompetenzen in Leibniz WideBaSe Research konnte erstellt werden:

	FBH / TUB	IHP	IKZ	MBI	PDI	WIAS
Grundlagenforschung			X	X	X	X
Materialforschung	X		X	X	X	
Leistungselektronik	X	X			(X)	
Optoelektronik	X					X

TUB: Technische Universität Berlin; IHP: Institut für Innovative Mikroelektronik; MBI: Max-Born-Institut; PDI: Paul-Drude-Institut; WIAS: Weierstrass-Institut

Hieraus wurden bilaterale Projekte und Forschungsarbeiten initiiert. Einige Projekte konnten bereits gestartet werden, andere sind noch abhängig von Finanzierungsmöglichkeiten. Die

genannten Einrichtungen waren sich untereinander einig, dass eine regelmäßige Information und ggf. Abstimmung zu Ergebnissen und Inhalten sinnvoll ist. In unregelmäßigen Abständen werden weitere Treffen im Konsortium und bilateral stattfinden.

Antragsstellung zum regionalen Wachstumskern „Berlin WideBaSe Applications“

Aufbauend auf dem Forschungsnetzwerk Leibniz WideBaSe Research wurden zahlreiche, teilweise bereits mit den Einrichtungen kooperierende Unternehmen identifiziert, die die Forschungsergebnisse der Netzwerkpartner verwerten können. Mit diesen Unternehmen wurden bilateral und dann in einem Workshop (siehe Workshop „GaN-Bauelemente“) Interessen und Bedarfe geklärt. Hieraus ergab sich die Notwendigkeit, auch die industriellen Interessen zu bündeln, um eine gemeinsame Technologieplattform zu entwickeln und vorzuhalten. Im Programm Unternehmen-Region wurde während der Projektlaufzeit eine Ideenskizze zum Regionalen Wachstumskern „Berlin WideBaSe Applications“ eingereicht. Die erste Hürde in diesem Programm wurde noch im Dezember 2008 genommen, das Konsortium wurde im Bewerbungsgespräch beim BMBF als „sehr Erfolg versprechend“ eingestuft und zur Erarbeitung eines Innovationskonzepts aufgefordert.

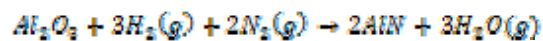
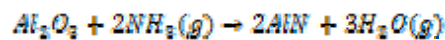
II.1.2. AP2: Konzeption Reaktor für Sublimationszüchtung (IKZ)

Das Prinzip der Sublimationszüchtung von AlN-Einkristallen besteht in der Überführung des zunächst festen polykristallinen AlN-Vorratsmaterials bei Temperaturen über 2000°C in die Gasphase und der Rekondensation der gasförmigen Spezies Al und N₂ bei niedrigeren Temperaturen zurück in die feste Phase. Dieser Vorgang findet in geschlossenen Tiegeln in einer N₂-Atmosphäre statt. Obwohl sich seit einigen Jahren Firmen mit der Technologieentwicklung für die industrielle Züchtung von AlN-Kristallen durch Sublimation beschäftigen (Crystal IS Inc., Hexatech Inc., FairFieldCrystals Inc. und Fox Group Inc. (alle USA)), sind einkristalline AlN-Substrate bisher nicht wirklich kommerziell sondern nur als Labormuster erhältlich.

Ursache für diese unbefriedigende Situation ist der mangelnde technologische Entwicklungsstand. Um diesen auf ein industriell verwertbares Niveau zu heben, konzentrieren sich die Bemühungen auf die Tiegelstabilität, die Reinheit des AlN-Ausgangsmaterials und die kristalline Perfektion der wachsenden Kristalle, wobei das wissenschaftliche Verständnis für die stattfindenden Prozesse wenig entwickelt ist. So ist beispielsweise nicht abschließend geklärt, welche der beiden gasförmigen Spezies als wachstumsbestimmende Minoritätskomponente wirkt. Dies trifft dezidiert auch für N₂ zu, dessen Dissoziationsenergie mit 945 kJ/mol sehr groß ist.

Die gravierenden Probleme, wie Tiegelzerstörung und Abscheidung parasitärer Verbindungen, gehen von den systeminhärenten Verunreinigungen O₂ und C aus, die unter anderem aus den kommerziell verfügbaren AlN-Quellenpulvern (zirka 0,5% C und 1% O₂) stammen.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung dieser Verunreinigungen besteht in der Reaktion des Quellpulvers mit NH₃. Durch den Zerfall des NH₃ an den mit Al₂O₃ bedeckten AlN-Körnern wird N und H im Status Nascendi freigesetzt, was über ein komplexes Reaktionsgeschehen zu einer Abreicherung von O₂ und C führt.



Problematisch ist dabei, dass besonders die O₂-Reaktion erst bei hohen Temperaturen leicht exotherm wird (Abb. 1). Um trotzdem die erwünschte Abreicherung erreichen zu können, muss das Reaktionsgleichgewicht durch Abführen der gasförmigen Reaktionsprodukte auf die Seite der Reaktionsprodukte verschoben werden.

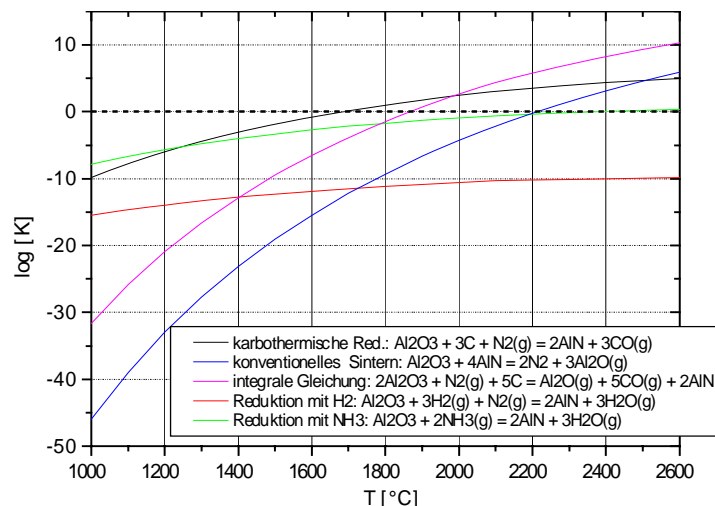


Abb. 1: Möglichkeiten der Reduktion von Al_2O_3 ; für $\log[K] > 0$ liegt das Gleichgewicht auf Seiten der Reaktionsprodukte

Die dazu erforderlichen hohen Gasdurchsätze bedeuten zusammen mit den Aufwendungen für die Gasentsorgung hohe Kosten. Bei konventionellen Reaktionskammern besteht außerdem die Gefahr, dass die extrem reaktiven Gasspezies Verunreinigungen aus dem Kammermaterial freisetzen (Alkalien, Schwermetalle, Kohlenstoff).

Eine sinnvolle Nutzung der beschriebenen Reaktion ist nur möglich, wenn die Umsetzung durch strenge Lokalisierung der stofflichen und thermischen Bedingungen auf das AlN-Quellpulver realisiert wird. Der existierende technologische Entwicklungsstand im wissenschaftlichen Gerätebau lässt die Beschaffung einer entsprechenden Züchtungsanlage nicht zu. Im Rahmen des Projektes sollten deshalb in einem ersten Schritt die Voraussetzungen für die neuartige AlN-Quellpulverpräparation geschaffen werden, um dann die Konzeption und den Bau einer kombinierten Anlage für die Reinigung von AlN-Quellpulver und die Züchtung von AlN-Einkristallen in C- und O_2 -freier Umgebung zu ermöglichen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Tests für eine HF-Heizung für $T > 2000^\circ\text{C}$ mit Strahlungsschilden als Wärmedämmung durchgeführt. Wegen der hohen Temperaturen und der Reinheitsanforderungen kamen dafür nur Folien aus systemeigenen Metallen infrage, die wegen ihrer guten Stromleitfähigkeit als schmale isolierte Streifen verarbeitet werden mussten.

Eine besondere Herausforderung stellt die partielle Reaktion des Metalls der Folie zu Metallnitrid dar. Dieser Phasenübergang geht mit einer $\sim 20\%$ Volumenänderung einher und führt zu einer starken Verformung der Folienstreifen. Trotz dieser Probleme konnten konstruktive Lösungen gefunden werden, die als Ersatz für die konventionelle Wärmedämmung durch Graphitfilz geeignet sind. Die damit verbundene Adaption des Temperaturfeldes wurde durch numerische Simulationen mit der Software „Virtual Reactor for AlN“ unterstützt.

Die angestrebte Lokalisierung der chemischen Abläufe wird durch ein Mikrowellenfeld erzielt. Im Vorfeld sind dafür numerische Simulationen der Mikrowellenkammer gemacht wurden. Für das Finetuning war der Aufbau einer Testkammer notwendig (IKZ, IBF Electronic). Es zeigte sich, dass die Abstimmungsbreite mittels 3-Stift-Tuner unter den gegebenen Umständen unzureichend ist. Als Lösung dieses Problems wurde eine variable Kammergeometrie eingeführt, die in Abhängigkeit von der Geometrie und den dielektrischen Eigenschaften des AlN-Quellpulvers eingestellt wird.

Die Voraussetzungen für einen Generationswechsel zu Anlagen mit O_2 - und C-freier Züchtungsumgebung sind damit gegeben gewesen. Im nächsten Schritt wurden die Konzeption und Konstruktion der Module Sublimation- und Mikrowellenkammer, die Integration der Module und der Bau der Anlage (IKZ, Fa. Steremat) begonnen. Wegen des Auftragsüberhangs in der Industrie aus dem „Boom“-jahr 2008 wird die Auslieferung erst in 04/09 möglich sein.

II.1.3. AP 3: Grundlagenentwicklung für LEDs im tiefen UV (FBH)

LEDs im tiefen UV sind von Interesse für eine Reihe von Anwendungen in der Medizin, für die Desinfektion z.B. von Trinkwasser, für spektroskopische Anwendungen, in der Drucktechnik (Lackhärtung) und der Lithographie. Neben der Ersetzung der ineffizienten und wenig umweltverträglichen Quecksilberdampf Lampen erlauben LEDs auch, auf spezifische Anwendungen maßgeschneiderte Emissionswellenlängen einzustellen. Bisher sind jedoch die erreichten Ausgangsleistungen bei Wellenlängen unterhalb von 370 nm noch nicht ausreichend für viele Anwendungen. Hier wird weltweit an Verbesserungen geforscht, wobei die Aktivitäten jedoch deutlich geringer als auf dem Feld der LEDs für die Beleuchtungstechnik mit Emission im violetten bis blauen Spektralbereich sind.

Aufbauend auf den Erfahrungen im FBH zur Epitaxie mit metallorganischer Gasphasenepitaxie und mit der Prozessierung für GaN-basierte LEDs mit Emissionswellenlängen im nahen UV (370 nm bis 400 nm) wurden Grundlagenentwicklungen durchgeführt, um die Emission der LEDs unter 370 nm abzusenken. Für LEDs, die bei Wellenlängen oberhalb von 370 nm emittieren, werden typischerweise InGaN-Quantentöpfe (QWs) mit (In)GaN-Barrieren als lichtemittierende Schichten sowie GaN Templates auf Saphir als Substrat verwendet. Für kurzwelligere Emission ist einerseits GaN nicht mehr transparent und kann somit nicht mehr als Substrat verwendet werden, andererseits muss in der lichtemittierenden aktiven Zone Aluminium hinzugegeben werden, um eine größere Bandlücke zu realisieren. Damit ergaben sich im Wesentlichen für die Epitaxie drei Aufgabenkomplexe:

- Entwicklung eines neuen, im tiefen UV transparenten Templates, hier AlN auf Saphir
- Entwicklung von im tiefen UV emittierenden aktiven Zonen, hier InAlGaN Quantentöpfe
- Entwicklung der LED-Schichtstruktur mit leitfähigen Kontaktschichten, hier AlGaIn.

Der generelle höhere Al-Gehalt der Schichten bzw. des Templates erfordert die Entwicklung völlig neuer Züchtungsbedingungen, da die Diffusionslänge von Aluminium auf der Oberfläche bei „Standard“-Züchtungstemperaturen von 750°C bis 1100°C sehr gering ist und raue Epitaxieschichten verursacht. Somit wurden Hochtemperaturtaugliche Reaktoreinbauten für den vorhandenen Mehrscheibenreaktor gemeinsam mit dem Anlagenhersteller konzipiert und am FBH getestet. Diese Vorexperimente dienten auch der Spezifikation des neuen Reaktors, dessen aus technischen Gründen verzögerte Installation eine Nutzung während der Projektlaufzeit verhinderte. Zuerst wurde die Abhängigkeit der Oberflächenmorphologie des AlN auf Saphir von der Reaktorzüchtungstemperatur mittels AFM untersucht, siehe Abbildung 2. Die Morphologien der Schichten, die bei 1300°C abgeschieden wurden, zeigen viele Löcher und sind verhältnismäßig rau (RMS ~ 3 nm), Abb. 2b. Mit Erhöhung der Züchtungstemperatur auf 1500°C schließen sich die Löcher und die Rauigkeit nimmt ab, Abb. 2c. Diese Oberflächen sind eine gute Grundlage für die Abscheidung weiterer Schichten für eine LED-Entwicklung. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Versetzungsdichte des Templates entscheidend die Lichtleistung der späteren LEDs beeinflusst. Daher wurde die Defektdichte des AlN-Templates mittels Transmissionselektronenmikroskopie und korrelierend dazu mit Röntgenbeugung bestimmt. Es wurde der Einfluss der Startbedingungen vor der unmittelbaren Abscheidung von AlN auf die Versetzungsdichte untersucht. Es zeigt sich, dass ein gleichzeitiges Anschalten der Al-Quelle und des Ammoniaks zu einer minimalen Dichte an Schrauben- und Linienversetzungen führt. Dies findet seinen Ausdruck in der minimalen Halbwertsbreite der X-ray Rockingkurve der symmetrischen (0002) bzw. der asymmetrischen (10-12) Reflexe, die in Abb. 3 über die Vorflusszeiten des Ammoniaks bzw. des TMAI dargestellt sind. Die so hergestellten Schichten haben abgeschätzte Versetzungsdichten von ca. $8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ für die Schraubenversetzungen und ca. $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ für die Linienversetzungen. Diese Versetzungsdichten sind hinreichend, um eine LED im tiefen UV zu entwickeln. Für effiziente Dioden müssen sie allerdings auf wenige 10^8 cm^{-2} abgesenkt werden, wie sie für GaN-Templates für LEDs bei längeren Wellenlängen üblich sind.

Die lichtemittierende aktive Zone besteht aus fünf 2,5 nm dicken $\text{Al}_x\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98-x}\text{N}$ QWs, in denen der Aluminium Gehalt von $x = 0,05$ sukzessive auf 0,4 erhöht wurde. Die QWs sind in 7 nm dicke $\text{Al}_x\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98-x}\text{N}$ als Barrierschichten eingebettet ($x = 0,34$ bzw. 0,43). Als Template wurde für diese Vorstudien GaN eingesetzt, um Versetzungsdichten von wenigen 10^9 cm^{-2} zu realisieren. Die Emission wurde optisch angeregt und die Photolumineszenz (PL) von der Schichtoberfläche gemessen. Die Emissionswellenlänge der 5-fach QWs schiebt

dabei von 355 nm bis nach 305 nm, siehe Abb. 4. Die Züchtungsbedingungen der $\text{In}_{0.02}\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ QWs, die bei 350 nm emittierten, wurde nochmals separat bzgl. der maximalen PL-Intensität der QWs optimiert und zur Entwicklung von LED-Strukturen verwendet.

Die LED-Schichtstruktur benötigt eine n-leitfähige $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Kontaktschicht, die transparent für die Emissionswellenlänge der QWs ist. Das heißt der Aluminiumgehalt muss höher als im QW bzw. in den Barrieren sein. Mit steigendem Aluminiumgehalt vergrößert sich die Ionisierungsenergie des Si-Donators und die Konzentration der für die Leitfähigkeit zur Verfügung stehenden freien Ladungsträger nimmt ab. Daher werden möglichst geringe Al-Gehalte für eine gute elektrische Leitfähigkeit angestrebt. Für LEDs mit 350 nm Emission kommen z.B. Al-Gehalte von ca. 0.16 – 0.20 zum Einsatz. Die damit verbundenen Gitterkonstanten führen zu einer Gitterfehlpassung zum AlN-Template von ca. 2 %. Diese sehr große Fehlanpassung ruft mit steigender Schichtdicke Risse in der Schichtstruktur hervor. Um diese zu vermeiden, werden kurzperiodige Übergitter aus einer abwechselnden Abfolge sehr dünner Schichten aus z.B. AlN und (Al)GaN (Abb. 5) eingesetzt. Anschließend wurde die komplette Struktur abgeschieden.

Basierend auf den unterschiedlichen Heterostrukturen wurden LED-Bauelemente mit einer Ni/Au-Metallisierung für die p-Kontakte ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) und einer Ti/Al-Metallisierung für die n-Kontakte hergestellt. Die LED-Lichtleistung wurde „on-wafer“ gemessen. Hierzu wurden die LED-Wafer auf eine Quarzplatte platziert und das substratseitig austretende Licht mit einer geeichten Si-Photodiode detektiert. Die Emissionsspektren der LEDs mit unterschiedlicher Zusammensetzung der QWs und der Barrierenschichten sind in Abb. 6 dargestellt. Es konnten die Emissionswellenlängen von 375 nm (GaN basiert) bis 320 nm ins tiefe UV (AlN-basiert) verschoben werden. Die Steigerung der Lichtaustrittsleistung sowohl durch weitere Defektreduktion im Template als auch die Optimierung des Strukturdesigns sowie die Reduktion des Serienwiderstandes ist nun Gegenstand weiterer Untersuchungen.

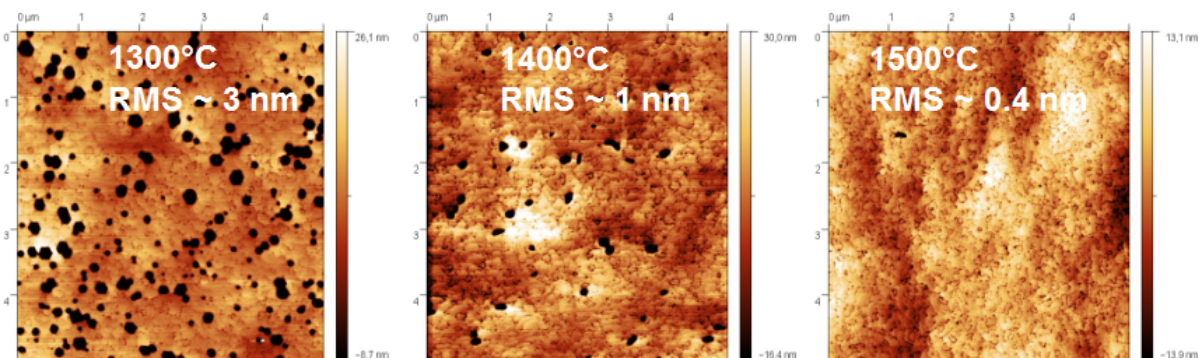


Abb. 2: Atom-Kraft-Mikroskopaufnahmen ($5 \times 5 \mu\text{m}^2$) von $0,7 \mu\text{m}$ dicken AlN-Schichten, abgeschieden bei 1300°C , 1400°C und bei 1500°C mittels MOVPE auf c-Saphir.

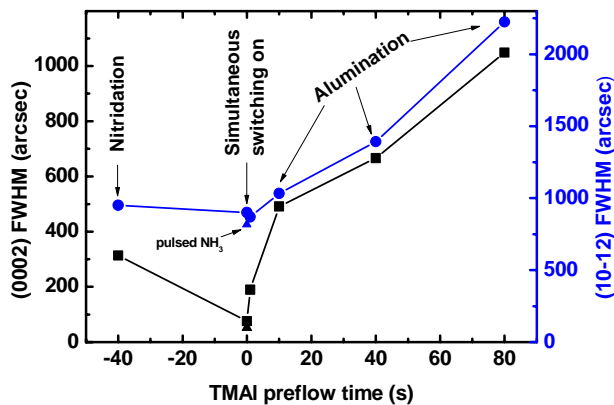


Abb. 3: Halbwertsbreiten (FWHM) der X-ray Röntgenkurven in (0002) und (10-12) Reflexion in Abhängigkeit von den Vorflusszeiten des Ammoniaks (Nitridation) bzw. des TMAI (Alumination) vor Beginn des AlN-Wachstums

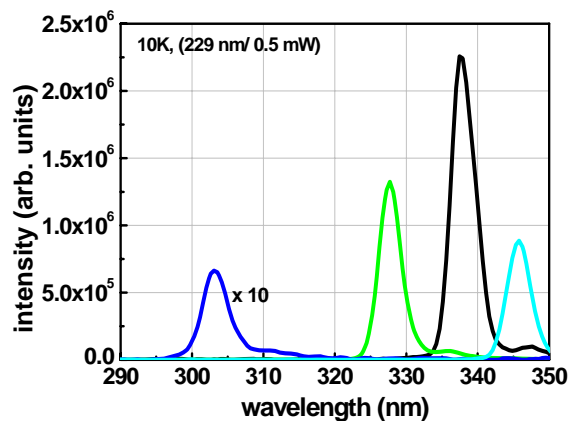


Abb. 4: Photolumineszenzspektren von 5fach InAlGaN/InAlGaN Schichten mit unterschiedlichem Al-Gehalt, angeregt mit 229 nm bei 10 K.

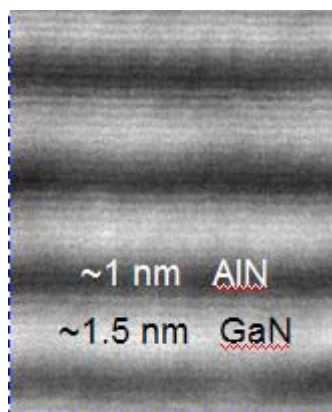


Abb. 5: Ausschnitt aus Transmissionselektronenaufnahme eines Querschnittes eines 80fach AlN/GaN Übergitters auf AlN

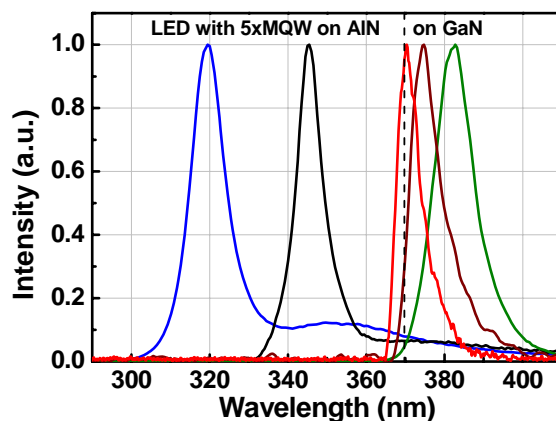


Abb. 6: Elektrolumineszenzspektren von LEDs mit 320 nm bis 385 nm Emissionwellenlänge bei 50 mA Vorwärtsstrom

Insgesamt wurden damit in allen drei Arbeitspaketen die gesetzten Ziele erreicht.

II.2. Zahlenmäßiger Nachweis

Siehe separate Schlussabrechnung.

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die fachlichen Arbeiten haben die technologische Kompetenz der beteiligten Partner gestärkt und die Grundlage für weiterführende Projekte gelegt. Sie waren notwendig und - durch die Ergebnisse belegt - auch angemessen.

Die Aktivitäten zur Vernetzung werden im Rahmen des Dachvorhabens vergleichend bewertet. Ohne dieses Projekt wäre eine Vernetzung zwischen den beteiligten Instituten und insbesondere auch mit den Unternehmen in dem erreichten Umfang kaum möglich gewesen, da die Aktivitäten des Netzwerkmanagers von den beteiligten Fachwissenschaftlern neben der Forschungsarbeit nicht mit hätten abgedeckt werden können. Die Angemessenheit dieser Arbeiten wird durch die Aufforderung zur Antragstellung für den regionalen Wachstumskern deutlich.

II.4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das vorliegende Vorhaben wurde als Plattform benutzt, um die Vernetzung der Forschungseinrichtungen untereinander und mit der Industrie (und auch die Vernetzung der Unternehmen untereinander) voranzutreiben. Schwerpunkt ist dabei die Region Berlin mit der hier versammelten Dichte an Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die sich mit der Forschung und Entwicklung an Bauelementen auf der Basis breitlückiger Halbleiter sowie deren Anwendung beschäftigen.

Es wurde eine Vortragsreihe zur Themenstellung GaN-Technologie und -Bauelemente organisiert, zu der gezielt Unternehmensvertreter eingeladen wurden. In insgesamt drei Treffen von Unternehmen und Forschungsinstituten wurde ein Regionaler Wachstumskern zum Thema WideBaSe definiert. Die entsprechende Skizze dazu wurde am 11.12.2008 beim BMBF vorgestellt und das Konsortium wurde zur Ausarbeitung eines Innovationskonzepts aufgefordert.

Federführend bei diesem Konsortium ist die Epigap Optoelektronik GmbH, ein Unternehmen der Jenoptik-Gruppe. Weiterhin sind beteiligt bzw. interessiert die OSA Optolight GmbH, Osram GmbH, sg-lux GmbH, AZZURRO Semiconductor AG, Jenoptik Diodelab GmbH, eagleyard photonics GmbH, TESAG sowie Steremat Elektrowärme GmbH. Ziel des Regionalen Wachstumskerns ist die Etablierung einer gemeinsamen Technologieplattform, die es den Unternehmen erlaubt, die jeweiligen Teilmärkte bedienen zu können, ohne eine komplette Technologie für die Bauelemente eigenständig aufbauen zu müssen.

Als Untermenge des multilateralen Ansatzes beim Regionalen Wachstumskern wurden punktuell auch bilaterale Projekte definiert. Am weitesten fortgeschritten ist hier ein gemeinsames Vorhaben von Epigap und FBH zur Entwicklung von UV-Photodetektoren auf der Basis von (Al)GaN, das im Rahmen von ProFIT gefördert wird. Das große wissenschaftliche und merkantile Interesse an den bearbeiteten Fragen wird auch durch die laufende Antragstellung für ein AiF-Projekt „Mikrowellenstimulierte Plasmakammer“ (IKZ, Steremat, INP), und einen Antrag für ein DFG-Projekt (IKZ, INP) deutlich.

Unabhängig von der Etablierung des Regionalen Wachstumskerns ist das FBH an einem durch das BMBF geförderten Verbundvorhaben zur Entwicklung von Deep-UV-LEDs beteiligt. Partner sind hier das Fraunhofer IAF in Freiburg und die Universität Ulm. Als assoziierte Partner verfolgen die Unternehmen Osram OS und Aixtron die Entwicklungen im Rahmen dieses Vorhabens.

Zusammenfassung bisheriger und zukünftig geplanter Verwertungsschritte

- Zwischen Forschungseinrichtungen
 - Workshops
 - Bilaterale Projektanträge
 - Abstimmung zu Forschungsschwerpunkten
- Zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen
 - Workshops
 - Projektanträge (teilweise schon bewilligt)
- Zwischen Unternehmen (Unterstützung durch Forschungsinstitute)
 - Koordination der Zusammenarbeit von FuE-Seite
 - Antrag zum regionalen Wachstumskern
- Zur Nachwuchssicherung
 - Beteiligung an regionalen und internationalen Sommeruniversitäten
 - Etablierung spezifischer Vorlesungen („GaN-Elektronik“ an TUB, einzelne Kapitel der Vorlesung „Angewandte Physik“ an der TUB)

II.5. Fortschritt bei anderen Stellen

Fachlich wurden während der Projektlaufzeit keine Durchbrüche an anderen Stellen erzielt und publiziert. In Hinblick auf den Aspekt der Vernetzung wird auf den Bericht zum Dachvorhabens verwiesen.

II.6. Veröffentlichungen

In Hinblick auf die Vernetzungsaktivitäten sind keine eigenständigen Veröffentlichungen geplant. Hier sei wieder auf den Bericht zum Dachvorhaben verwiesen.

Die fachlichen Arbeiten im Rahmen dieses Vorhabens sind eingebettet in die Arbeitsprogramme der beiden Partner. Angesichts der Kürze der Laufzeit basieren Publikationen entweder auf vor Projektbeginn bereits laufenden Forschungsarbeiten oder sind eingereicht, aber noch nicht veröffentlicht. Patentanmeldungen, die aus dem Projekt resultieren, existieren derzeit noch nicht.

Im Zusammenhang mit den fachlichen Fragestellungen AlN und LEDs im UV wurden während der Projektlaufzeit publiziert:

F. Brunner, H. Protzmann, M. Heuken, A. Knauer, M. Weyers,
„High-temperature growth of AlN in a Production Scale 11x2“ MOVPE reactor”,
phys. stat. sol. c **5**, Nr. 6, 1799-1801 (2008)

A. Knauer, H. Wenzel, T. Kolbe, S. Einfeldt, M. Weyers, M. Kneissl, G. Tränkle,
“Effect of the barrier composition on the polarization fields in near UV InGaN light emitting diodes”, Applied Physics Letters, Vol. **92**, 191912 (2008)

A. Knauer, S. Einfeldt, M. Weyers, T. Kolbe, M. Kneissl, T. Zettler,
„Optimization of InGaN(In, Al, Ga)N based near UV-LEDs by MQW strain balancing with insitu wafer bow sensor“,
Phys. Stat. Sol (a), **1-4** (2008), DOI10.1002/pssa.20080403

O. Reentilä, F. Brunner, A. Knauer, M. Kneissl, M. Weyers, G. Tränkle, H. Protzmann, M. Heuken,
„Effect of the AlN nucleation layer growth on AlN material quality“,
Journal of Crystal Growth **310**, 4932-4934 (2008)

C. Hartmann, J. Wollweber, Chr. Seitz, M. Albrecht, R. Fornari,
"Homoepitaxial seeding and growth of bulk AlN by sublimation",
Journal of Crystal Growth **310**, 930-934 (2008)