

Abschlussbericht zum Verbundprojekt

**Neuartige Leistungs-Bauelemente mit hoher Energieeffizienz und
Wirtschaftlichkeit auf Basis von Verbindungshalbleitern mit großer
Bandlücke (NeuLand)**

Teilvorhaben:

***Erforschung einer MOCVD-Technologie für die industrielle
Herstellung von GaN-basierten Hochspannungsbaulementen für
die Leistungselektronik***

Fördernummer 16N10729

Durchführende Institution:
AIXTRON SE
Kaiserstr. 98, 52134 Herzogenrath

Projektleitung:
Prof. Dr. Michael Heuken
Vice President Corporate Research and Development

Inhalt

I.1 KURZE DARSTELLUNG DER AUFGABENSTELLUNG	3
I.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE	4
I.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	5
I.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND ZU BEGINN DES VORHABENS	13
I.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	15
II.1 EINGEHENDE DARSTELLUNG DES ERZIELTEN ERGEBNISSES	15
II.2 FORTSCHREIBUNG DES VERWERTUNGSPLANS	54
II.3 VERÖFFENTLICHUNGEN	55

1.1 Kurze Darstellung der Aufgabenstellung

Das Ziel des **Gesamtvorhabens** war die Entwicklung von Leistungsbauerelementen mit optimaler Energieeffizienz die in der Applikationen / im System zu keiner Kostenerhöhung, gegenüber vergleichbaren, aber weniger energieeffizienten Si-Komponenten führen.

Dabei sollten 2 Stoßrichtungen verfolgt werden:

- Weiterentwicklung der SiC-Technologie mit dem Ziel einer massiven Kostenreduktion via Grundmaterial-Qualität (⇒ Ausbeute)
- Aufbau einer vollständig neuen Leistungselektronik-Technologie, basierend auf hochsperrenden GaN-Schichten, die auf vergleichsweise kostengünstigen und großflächigen (200 mm) Si-Substraten abgeschieden werden.

Diese beiden konkurrierenden Forschungsrichtungen sollten für dieses Vorhaben Demonstrator-Bauerelemente mit, so weit wie möglich, vergleichbaren Basiseigenschaften liefern:

Quasi schaltverlustfreie Dioden und Schalter im Sperrspannungsbereich von 600 V bis 1500V und einer Stromtragfähigkeit von 5 - 10 A.

Ziel des **Teilprojekts** war, die für die Massenerstellung notwendige MOCVD Technologie zu entwickeln. Im Vordergrund der Reaktor- und Prozesstechnologieentwicklung standen in diesem Teilprojekt produktionsrelevante Aspekte wie Homogenität, Reproduzierbarkeit, Ausbeute sowie Prozessstabilität und -effizienz. Die Skalierungsmöglichkeiten von Planeten- und Showerheadreaktoren für die Epitaxie von solchen Bauelementstrukturen sollten theoretisch vorhergesagt und experimentell überprüft werden. Die MOCVD ist ein so genannter Batchprozess. D. h., dass im Gegensatz zu einem Durchlaufverfahren pro Prozessschritt immer nur eine bestimmte Anzahl an Substraten beschichtet werden kann. Die industrielle Massenproduktion von elektronischen und optoelektronischen Bauelementen wird umso wirtschaftlicher, je mehr Substrate pro Abscheidungsprozess beschichtet werden können und je größer die verwendeten Substratflächen sind. Der Stand zu Projektbeginn der GaN-Produktionstechnik war die MOCVD von komplexen Bauelementstrukturen in 42x2 Zoll Planetenreaktoren oder 31x2 Zoll Showerhead Anlagen. Ziel von Neuland war es, in neuen 56x2 Zoll bzw. 14x100 mm Planeten Reaktoren Prozesse für die Abscheidung von III-V-Halbleitern auf 100 mm Si-Substraten zu entwickeln und die Prozesse erst auf 8x150 mm und später auf 8x200 mm große Substrate zu übertragen. Mit dem Schritt von 42x2 Zoll auf 56x2 Zoll wird die Produktionskapazität pro Abscheidung um den Faktor 1,3 vergrößert. Der Schritt von 56x2 Zoll auf 8x150 mm bringt einen weiteren Faktor 1,3 und vor allem weniger Wafer, die prozessiert werden müssen und weniger Randausschluss, sprich eine größere Ausbeute. Dieses wird die Gesamtproduktionskosten pro Bauelement signifikant reduzieren.

Im Rahmen des Projektes sollten die wissenschaftlich-technischen Voraussetzungen für die Abscheidung von HEMT-Strukturen auf Si-Substraten mit den neuen Reaktorkonfigurationen erarbeitet werden.

Auf der Basis der erzielten Prozessergebnisse sollten die Reaktoren hinsichtlich Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und Ausbeute an „guten“ Wafern pro Abscheidung optimiert werden.

Im Einzelnen hatte AIXTRON die folgenden wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele:

- Erforschung der technischen und wissenschaftlichen Grundlagen zur Optimierung eines bestehenden 56x2 Zoll (14x100 mm, 8x150 mm, 5x200 mm) Reaktorprototypen zwecks effizienter und reproduzierbarer Herstellung von GaN/AlGaIn-HEMT-Strukturen auf großen Si-Substraten
- Optimierung der Simulationstools hinsichtlich neuer HEMT-relevanter Materialien und Prozesse zur effizienteren Modulation der Reaktoren
- Entwicklung neuer Konzepte für Schlüsselkomponenten des Reaktors
- Verständnis der Wachstumsmechanismen von AlGaIn, InGaIn, GaIn und AlInN in der 14x100 mm (8x150 mm, 5x200 mm) und 300 mm Epitaxie, Entwicklung von Basisprozessen auf Si-Substraten für elektronische Anwendungen
- Entwicklung von qualitativ hochwertigen, hochohmigen Pufferschichten auf großen Si-Substraten
- Entwicklung von HEMT Prozessen auf Si-Substraten
- Skalierung der Si-Substratgröße von 100 mm über 150 mm auf 200 mm und ggf. 300 mm. Hierbei stellt die 150 mm Größe den wichtigsten Arbeitspunkt hinsichtlich der Kompatibilität mit heutigen Fertigungslinien für die Leistungselektronik dar.
- Analyse der Kosten auf Basis der Anlagenkomponenten und der Prozesse
- Studien zur Produktivitätssteigerung von MOCVD-Anlagen, neue Anlagenkonzepte und Analyse der Anlagenkomponenten

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

GaN-auf-Si war zu Projektbeginn bereits eine international mit stark wachsendem Interesse verfolgte Technologie. Die im Jahr 1998 erstmals mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE) gewachsenen GaN-basierten LEDs auf Silizium zeigten die prinzipielle Machbarkeit von Bauelementen, insbesondere der oft angezweifelten Möglichkeit der p-Typ Dotierung auf. Bis zum Projektstart in 2010 wurden von verschiedenen MOCVD Gruppen, inklusive AIXTRON, schon mehrere µm dicke, rissfreie GaN Schichten auf Si demonstriert.

Der damalige GaN-Standard basierte auf 2“, 3“ und bei wenigen Herstellern auf 100 mm Substraten, was vor allem in der Substratproblematik für das Wachstum von Gruppe-III-Nitriden begründet lag und immer noch liegt. GaN- und verwandte Substrate lassen sich bis heute noch nicht in ausreichender Qualität, Größe, und - noch wichtiger - zu keinem wettbewerbsfähigen Preis fertigen. Daher hat sich für optische Standardbauelemente Saphir als Substratmaterial durchgesetzt. Aufgrund der geringen thermischen Leitfähigkeit ist Saphir für Leistungsbauelemente aber wenig brauchbar. Zudem war es kommerziell nur bis zu einer Größe von 100 mm verfügbar und verbiegt sich in 150 mm Größe im MOCVD-Prozess schon beim Aufheizen so stark, dass es sich entweder mehrere Millimeter am Rand von der Reaktor-Oberfläche abhebt oder sogar bricht. Diese durch die geringe Wärmeleitung und Transparenz gegebene Problematik lässt sich nicht in herkömmlichen MOCVD-Reaktoren lösen. SiC hat eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit, ist aber extrem teuer und war ebenfalls nur bis maximal 100 mm erhältlich. SiC als GaN-Substrat wurde nur für hochpreisige Hochfrequenz-Bauelemente verwendet. Si-Substrate waren dagegen bereits in exzellenter

Qualität bis 300 mm verfügbar, vergleichsweise billig und haben eine Wärmeleitfähigkeit, die etwa der des GaN entspricht.

Das Hauptproblem der GaN-auf-Si Epitaxie in der MOCVD sind die stark unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten und Gitterkonstanten zwischen den GaN-basierten Schichten und dem Si-Substrat. Diese stellen für MOCVD-Prozesse auf diesen Substraten generell eine besondere Herausforderung dar. Die auftretenden Probleme sind vielfältig und waren nicht vollständig verstanden. Während des Wachstums führen die Spannungen in dem Material zu einer Krümmung des Wafers. Dadurch kann er teilweise den Kontakt zum Suszeptor verlieren, was sich in einer inhomogenen Temperaturverteilung über den Wafer bemerkbar macht. Dieser Effekt wird mit wachsendem Substratdurchmesser stärker. Während der Abkühlphase kann es dann aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zu einer Rissbildung in den abgeschiedenen Strukturen kommen. Die für die geplanten HEMT-Strukturen notwendigen, im Vergleich zu optoelektronischen Bauelementen hohen, Al-Gehalte führen zu weiteren Problemen mit Zugverspannung und Rissbildung.

Vorarbeiten bei AIXTRON und dem Partner AZZURRO hatten die prinzipielle Machbarkeit gezeigt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Ziel der Arbeiten war die Entwicklung einer MOCVD Technologie für die Herstellung von GaN-basierten Hochspannungsbaulementen auf Silizium-Substraten. Dazu gehörten die experimentelle Prüfung der theoretisch vorhergesagten Skalierungsmöglichkeiten von Planeten- und Showerhead-Reaktoren für die Epitaxie von GaN-Heterostrukturen für die Anwendung in HEMT-Strukturen auf Si-Substraten, die Skalierung der Wachstumsprozesse von 100 mm über 150 mm auf 200 mm Si-Substrate in einem Planetenreaktor und die mögliche weitere Skalierung auf 300 mm Substrate in einem Showerhead-Reaktor. Basierend auf den erfolgreich entwickelten und in die Produktion eingeführten 42x2 Zoll (bzw. 11x100 mm) Planetenreaktoren wurde im Vorfeld des Projektes eine neue 56x2 Zoll Technologie entwickelt. Theoretisch konnte der 56x2 Zoll Reaktor auf 14x100 mm, bzw. 8x150 mm und 5x200 mm skaliert werden. Die meisten Standardprozesse waren bereits von der 42x2 Zoll auf die 56x2 Zoll Reaktorkonfiguration übertragen und angepasst worden. Da es damals schwierig wurde hochwertige 2“ Si-Substrate zu beziehen sollten im Rahmen des Projektes zunächst die technischen und wissenschaftlichen Voraussetzungen für die Abscheidung von HEMT-Strukturen auf 100 mm Si-Substraten erarbeitet werden und die Prozesse im Planetenreaktor über 150 mm auf 200 mm Si-Substrate skaliert werden. Im letzten Schritt sollten die Prozesse auf einen Showerhead-Reaktor übertragen werden. Reaktor- und Prozesstechnologie sollten dabei iterativ optimiert werden. Um diese Ziele zu erreichen wurden die folgenden Arbeitspakete bearbeitet.

AP-AIX 1: Optimierung 56x2 Zoll (14x 100 mm, 8x150mm) MOCVD-Anlage

Ein 56x2 Zoll MOCVD-Prototyp war im AIXTRON Labor installiert und stand für die Durchführung der Experimente zur Verfügung. In diesem Prototyp sind schon alle derzeitigen Erkenntnissen, und die Ergebnisse der letzten Simulationsergebnisse realisiert worden. Im Rahmen dieses zentralen Arbeitspaketes sollten alle im Projekt erarbeiteten Schwachstellen

der Anlagentechnik verbessert werden. Das heißt, dass es eine sehr enge Korrelation zwischen AP AIX1 und den AP AIX3 bis AIX5 gab. Die experimentellen Ergebnisse aus AP AIX3 bis AIX5 sollten von erfahrenen Wissenschaftlern ausgewertet werden und mit Hilfe der Konstruktionsabteilung für die Optimierung des Anlagendesigns eingesetzt werden. Zu den sensiblen Teilen, die im Rahmen des Projektes optimiert werden sollten gehörten die Suszeptoren (AP4), der Exhaustkollector (Flussdynamik), der Gaseinlass (Flussdynamik, Homogenität, Effizienz) und die Ceiling (Partikel, Temperaturmanagement). Nach jeder Änderung sollte der Einfluss des neuen Designs auf den Abscheidungsprozess simuliert werden. Nach einer positiven Bewertung der Neuerungen sollten die optimierten Teile gefertigt und in die bestehende Anlage implementiert werden. Experimentell sollte der Einfluss der Optimierungen dann in AP-AIX5 und AP-AIX6 verifiziert werden. Der gesamte Optimierungsvorgang sollte iterativ über die gesamte Projektlaufzeit fortgesetzt werden. Die Arbeiten sollten der Produktivitätssteigerung der Anlage dienen und zielten auf die reproduzierbare Herstellung von GaN-basierten Schichtstrukturen für die Elektronik. Im Gegensatz zu optischen Anwendungen werden für die Elektronik Schichten mit hohem Al-Anteil benötigt. Diese sind prozesstechnisch schwerer zu handhaben und stellen höhere Anforderungen an die Anlagentechnologie. Zudem versprach man sich in der Literatur durch die Verwendung des Materials AlInN in HEMT-Strukturen für die Zukunft eine weitere erhebliche Leistungssteigerung. Auf Einzelheiten zu den benötigten spezifischen Reaktormodifikationen wird in den Beschreibungen der folgenden Arbeitspakete eingegangen.

Basierend auf den Erfahrungen der beteiligten Projektpartner, insbesondere AZZURRO, MicroGaN und SiCrystal, sollten die substratspezifischen Anforderungen an die Epitaxie beleuchtet werden, und ein detailliertes Anforderungsprofil an die Reaktortechnologie erstellt werden. Dies war Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung von AP-AIX1.

AP-AIX2: Erweiterung / Optimierung der chemischen Modelle

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war, die Vorgänge im Reaktor und den Einfluss des Reaktordesigns auf die Abscheidungsprozesse effizienter simulieren zu können. Die Simulation von Abscheidungsprozessen in Abhängigkeit vom Reaktordesign und Reaktortyp (Planet, horizontal oder Showerhead, vertikal) hat sich als extrem hilfreiches und kostensparendes Hilfsmittel bei der Entwicklung von neuen Reaktoren und Reaktorkomponenten erwiesen. Es ist offensichtlich, dass die Güte der Simulationen entscheidend von den zugrunde liegenden chemischen Modellen für die Reaktionskinetik in den jeweiligen Materialsystemen abhängt. Durch den Vergleich der Modellrechnungen mit den experimentellen Daten müssen diese Modelle fortlaufend verbessert werden. Der größte Teil der vor Projektbeginn durchgeführten Simulationen hatte die Optimierung von Anlagen und Prozessen für die Abscheidung von optischen Bauelementen zum Ziel. Zur Simulation der für die Elektronik benötigten weiteren Materialien, AlGaIn mit höherem Al-Gehalt und AlInN, mussten die vorhandenen chemischen Modelle optimiert und erweitert werden. Bei erhöhtem Al-Gehalt in der Gasphase mussten beispielsweise verstärkt Vorreaktionen zwischen der Al-Quelle und Ammoniak berücksichtigt werden. Die AlInN-Abscheidung wurde im Vorlauf noch gar nicht simuliert. Die Erweiterung der Modelle erforderte zunächst die Entwicklung eines tiefen physikalisch-chemischen Verständnisses der Vorgänge, die während der Abscheidung im Reaktor stattfinden. Die benötigten Erkenntnisse sollten in M5

bis M7 gewonnen werden. Die erweiterten und optimierten Modelle sollten schließlich wieder sowohl für die neue 14x100 mm / 8x150 mm / 5x200 mm Konfiguration des Planetenreaktors als auch für den Showerhead-Reaktor experimentell verifiziert werden. Dieses sollte wieder den Arbeitspaketen AP-AIX6 bis AP-AIX7 erfolgen.

AP-AIX3: Optimierung Temperaturmanagement im Planetenreaktor

Eine Grundvoraussetzung für die homogene Abscheidung von Verbindungshalbleitern, vor allem von ternären oder gar quaternären Materialien ist eine extrem gleichförmige Temperaturverteilung im Reaktionsraum. Für die neue Konfiguration musste die Dimension des Reaktionsraumes und der RF-Heizspule sowie die Lage der Substrate auf dem Suszeptor verändert werden. Solche Änderungen haben einen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Reaktor. Zur Charakterisierung der neuen Anlage mussten zunächst die thermischen Bedingungen im Reaktor exakt vermessen und analysiert werden. Anschließend sollte die Temperaturhomogenität optimiert werden. Kriterium für die Optimierungen der Spuleneinstellung war, dass die Temperaturabweichungen auf den einzelnen Satelliten (einzeln rotierende Substratträger im Suszeptor, siehe Abbildung 1) $\pm 1^\circ\text{C}$ nicht überschreiten durfte. Die Optimierung des gesamten Temperaturmanagements im Reaktor ist material- und prozessspezifisch und musste speziell auf den HEMT Prozess auf Si abgestimmt werden. Das Ziel war die homogene Abscheidung der diversen Materialien (GaN, AlN, AlGaIn, AlInN) in AP-AIX5 und AP-AIX6. Das Temperaturmanagement wird neben der exakten Einstellung der neuen Spule durch eine ganze Anzahl weiterer Komponenten und Parameter beeinflusst: die Kühlung des Reaktormantels und der den Reaktionsraum abschließenden oberen Quarzplatte (Ceiling), die Kühlung und das Material des Gaseinlasses, das Material des Suszeptorzentrums, die Flussdynamik im Reaktionsraum, Form und Material der Satelliten, etc. All die Faktoren mussten für die HEMT-spezifischen Prozesse auf Si-Substraten angepasst und optimiert werden. Ziele der Optimierungen waren z.B. die Vermeidung von Vorreaktionen bei der Abscheidung der Al-reichen Schichten und die zeitlich konstante homogene Temperaturverteilung während der Abscheidung auf großen Si-Substraten trotz der dort auftretenden Waferkrümmungen. Die Optimierungen sollten zunächst für den Planetenreaktor durchgeführt werden. Ähnliche Betrachtungen waren aber auch für die Showerhead-Reaktoren notwendig.

AP-AIX4: Optimierung 14x100 mm / 8x150 mm / 5x200 mm / 1x200 mm / 1x300 mm Suszeptor für HEMT auf Si-Substraten

Der Suszeptor ist ein komplexes und damit teures Bauteil. Aufgrund der extrem hohen Temperaturen während der Epitaxie von AlN-basierten Materialien und der stark ätzenden Wirkung des Ammoniaks ist die Lebensdauer der Suszeptoren, trotz widerstandsfähiger SiC-Beschichtungen, relativ begrenzt. Durch den häufigen Austausch des Suszeptors hat er einen wesentlichen Einfluss auf die Kostenstruktur der Epitaxie. Ziel dieses Arbeitspaketes war die Erarbeitung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen für die Optimierung der Suszeptoren bzgl. der Lebensdauer, der Einzelstückkosten und des Aufwands für Wartungsarbeiten. Angedacht war der Entwurf von Mehrlagen- oder Sandwich-Suszeptoren, um die geforderten Ziele zu erfüllen. Bei einem solchen Sandwich-Suszeptor könnte nur die

oberste, dem Prozessgas ausgesetzte Schicht bei Bedarf erneuert werden. Dieses und ggf. weitere neue Suszeptorkonzepte sollten erarbeitet, realisiert, erprobt und analysiert werden. Zudem mussten mit starker Rückkopplung aus AP-AIX3 Konzepte erarbeitet werden, in wie weit sich durch konstruktive Lösungen beim Suszeptordesign die Problematik der inhomogenen Temperaturverteilung aufgrund der Waferkrümmung beherrschen lässt.

AP-AIX5: Basisprozesse auf 100 mm Si-Substraten/ Prozessoptimierung

Der erste Schritt beim Übergang von der 42x2 Zoll / 11x100 mm auf die 56x2 Zoll / 14x100 mm Konfiguration war die Anpassung der Wachstumsprozesse für die Standardmaterialien der Gruppe-III-Nitride auf Saphir und wurde bereits als Vorarbeit geleistet. Die Vorarbeiten auf Si-Substraten wurden weitgehend in einem 1x2 Zoll Forschungsreaktor auf 2 Zoll Si-Substraten durchgeführt. Im NeuLand-Projekt sollten diese Ergebnisse in Vorversuchen an der vertikalen Showerheadanlage durch Skalierungsexperimente erforscht werden. Dies sollte aus Kostengründen in einem teilbeladenen Reaktor stattfinden. Für die Entwicklung der neuen Basisprozesse im Planetenreaktor auf 100 mm Si-Substraten sollten dann die Ergebnisse auf Si aus dem vertikalen Showerheadreaktor mit denen aus der Standardprozessentwicklung auf Saphir im 14x100 mm Planetenreaktor kombiniert werden. Für diesen Schritt war das Verständnis der Wachstumsmechanismen von AlGa₃N, InGa₃N und GaN in der 14x100 mm Epitaxie unerlässlich. Mit der Skalierung der Reaktorgröße wurden vor allem die Höhe der Reaktorkammer und die Position der Satelliten relativ zum Gaseinlass verändert. Die Veränderungen hatten einen entscheidenden Einfluss auf die Gasflussdynamik, das Temperaturmanagement und damit auf die Reaktionskinetik im Reaktionsraum. Diese Einflüsse wirken sich bei der Verwendung der Si-Substrate viel stärker aus als bei Standardsaphirsubstraten. Daher mussten alle wesentlichen Wachstumsparameter wie Druck, Temperatur, Mischverhältnisse der Gase, Totalflüsse etc. neu bestimmt und angepasst werden. Die optimierten Basisprozesse sollten anschließend unter Produktionsbedingungen getestet werden. Hierbei sollten vor allem die Homogenität und Reproduzierbarkeit der Wachstumsergebnisse im Vordergrund stehen. Die Standardabweichungen bezüglich Materialhomogenität sowohl von Wafer zu Wafer als auch von Abscheidung zu Abscheidung durften nicht größer als bei der Verwendung von Saphirsubstraten sein. Abschließend sollte eine Analyse der Epitaxiekosten basierend auf den Wachstumsergebnissen vorgenommen werden. Hierbei musste u. a. die Effizienz mit der die teuren Ausgangsmaterialien verwendet werden berücksichtigt werden. Eine Entwicklung der Basisprozesse für AlInN und AlGa₃N basierende elektronische Bauelemente auf Silizium Substrat sollte ebenfalls für Showerhead-Reaktoren entwickelt werden.

Zur Verifikation der Schichteigenschaften sollten Bauelementstrukturen hergestellt werden. Zur Qualifizierung dieser Strukturen sollte auf Messtechnik und die Erfahrung von MicroGa₃N und AZZURRO zurückgegriffen werden. Insbesondere die ausgefeilte Messtechnik von MicroGa₃N sollte relevante Fragestellungen zu Isolationseigenschaften der Pufferschichten und Transporteigenschaften des 2-dimensionalen Elektronengases an der AlGa₃N/GaN Heterogrenzfläche klären.

AP-AIX6: Prozessentwicklung für GaN/AlGaIn HEMT Strukturen auf 150/200 mm Si im Planetenreaktor

Nach der erfolgreichen Entwicklung der Basisprozesse auf 100 mm Si-Substraten lag der Schwerpunkt der Arbeiten in diesem Arbeitspaket auf der speziellen Prozessentwicklung für GaN/Al(In)GaIn-HEMT-Strukturen auf Si-Substraten. Neben den vielen Vorteilen wie Preis, Qualität, Verfügbarkeit in großen Durchmessern und einer dem GaN ähnlichen Wärmeleitfähigkeit haben die Si-Substrate den bereits erwähnten großen Nachteil, dass neben der Gitterfehlpassung (16,9 % absolut) zu den GaN-basierten Materialien auch ein großer Unterschied bei den Wärmeausdehnungskoeffizienten (-116 %) besteht. Dieser wirkt sich mit größer werdendem Substratdurchmesser zunehmend kritisch aus. Daher müssen für die Epitaxie von qualitativ hochwertigen Gruppe-III-Nitriden auf Si ausgeklügelte Pufferstrukturen entwickelt werden. Für die hier angestrebten speziellen GaN/Al(In)GaIn-HEMT-Strukturen mussten diese Pufferschichten sowohl die eigentliche HEMT-Struktur thermisch vom Substrat entkoppeln, um die Zahl der fehlpassungsbedingten Versetzungen zu reduzieren, als auch elektrisch isolierend, also sehr hochohmig sein. Hier konnten schon im Vorfeld durch eine Abfolge aus Tieftemperatur und Hochtemperatur AlGaIn/GaN-Schichtfolgen dicke, rissfreie GaN-Schichten auf Si realisiert werden.

Die Optimierung der strukturellen und elektrischen Eigenschaften der Pufferstrukturen auf 100 mm bzw. 150 mm Si-Substraten sollte der erste Schritt in diesem Arbeitspaket sein. Wichtig für den späteren Einsatz der Puffer in HEMT-Strukturen war, dass die isolierenden Eigenschaften des Materials das Ergebnis besonderer Güte und nicht von einer sehr großen Anzahl von Versetzungen oder einer starken Kompensation sind.

Auf den Pufferstrukturen aufbauend sollten sukzessive die einzelnen Schichten des Bauelements und die GaN-AlGaIn-Grenzfläche optimiert werden. Die Güte der Grenzfläche beeinflusst entscheidend die Qualität des Kanals und damit den Einschluss der Ladungsträger und deren Beweglichkeit. Weiter sollte untersucht werden, ob sich die elektrischen Eigenschaften der HEMT-Strukturen durch den Einsatz einer δ -Dotierung verbessern lassen. Ziel der Arbeiten war zunächst die Demonstration von HEMT-Strukturen, die unter Produktionsbedingungen auf Si abgeschieden wurden und eine Ladungsträgerkonzentration im Kanal von $> 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ mit einer Beweglichkeit von mindestens $1600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ aufweisen. Ausgesuchte Wafer sollten vom Projektpartner MG zu Bauelementen prozessiert werden.

Die experimentellen Ergebnisse mussten detailliert wissenschaftlich analysiert werden, um Rückschlüsse auf die physikalischen und chemischen Vorgänge im Reaktor ziehen zu können. Die Ergebnisse der Analyse wurden sowohl in AP-AIX 2 für die Optimierung der Simulationsmodelle benötigt als auch für die Skalierung der Prozesse auf größere Substrate in den unterschiedlichen Reaktoren – Planetenreaktor, Showerhead-Reaktor.

Der letzte Schritt in diesem Arbeitspaket sollte die Skalierung der Ergebnisse auf 6x150 mm Si-Substrate sein. Da die Problematik der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten mit der Substratgröße skaliert war dieser Schritt nicht trivial. Zunächst musste wieder versucht werden, die Pufferstrukturen derart zu verfeinern, dass eine rissfreie Abscheidung von dicken GaN-Schichten möglich war. Ggf. auftretender Waferkrümmung musste konstruktiv mit einem besonderen Suszeptordesign entgegen gewirkt werden. Am

Ende sollten die auf den 100 mm bzw. 150 mm Substraten demonstrierten Bauelementeigenschaften auf 200 mm Substraten reproduziert werden.

Dieses Arbeitspaket war in enger Kooperation mit AZZURRO und MicroGaN geplant. Dabei sollten insbesondere die statistischen Auswertungsmethoden und großflächigen Messmethoden der Projektpartner wichtige Werkzeuge zur Beurteilung der bei uns erforschten Technologie sein.

AP-AIX7: Korrelation externer Prozessdaten mit Showerhead-Anlagendesign

Der Projektpartner AZZURRO sollte parallel Bauelement-Prozesse auf 2 Zoll und 100 mm Si-Substraten in einem vertikalen Showerhead-Reaktor entwickeln. Die dabei gewonnenen Erfahrungen und Prozessdaten sollten gemeinsam analysiert und in Korrelation zum Anlagendesign gebracht werden. Die Analysen sollten anschließend als Grundlage für die Optimierung der Showerhead-Reaktortechnologie für das Wachstum von GaN/AlGaN-HEMT-Strukturen dienen und sollten im Rahmen von AP AIX2 verwertet werden.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollten die gewonnenen Ergebnisse entlang der Wertschöpfungskette von Technologie bis zum Endanwender analysiert und bewertet. Der Beitrag der Endanwender sollte dabei einen besonders wichtigen Aspekt darstellen, da von diesen Endanwendungen die treibende Marktkraft ausgeht, diese Technologie zu wirtschaftlichem Erfolg zu führen. Neben den Grundlagen für die Kostenanalyse sollten insbesondere Frequenz- und Leistungsgrenzen der Bauelemente als entscheidende Kriterien betrachtet werden.

AP-AIX8: Prozessentwicklung GaN/AlGaN-auf-Si im Showerheadreaktor auf 200/300 mm

AP-AIX7 sollte auch die Grundlage für die weitere Skalierung der HEMT Prozesse auf 300 mm Substrate liefern. Da die zu Prozessbeginn verfügbaren Planetenreaktoren nicht in der Lage waren 300 mm Substrate aufzunehmen und eine Neuentwicklung den Kostenrahmen des Projektes gesprengt hätte war auch hier geplant auf eine bestehende Showerhead 31x2 Zoll Produktionsanlage im AIXTRON Labor zurückzugreifen. Für das Projekt sollte zunächst ein neuer Suszeptor entwickelt werden, der ein 200 bzw. 300 mm Substrat aufnehmen kann. In AP-AIX7 erarbeitete Verbesserungen sollten, soweit im Rahmen des Projektes möglich, in der Anlage umgesetzt werden.

Die einzelnen Arbeitsschritte zur Prozessentwicklung sollten analog zu denen in AP-AIX6 erfolgen, wobei hier auch die anlagenspezifischen Erfahrungen von AZZURRO mit einfließen sollten. Zunächst sollten die Prozesse auf 200 mm Si-Substraten entwickelt werden. Das finale Ziel war ein HEMT-Basisprozess auf 300 mm Si-Substrat, der die Herstellung von konkurrenzfähigen Bauelementen erlaubt.

Auch dieses Arbeitspaket sollte in enger Kooperation mit AZZURRO und MicroGaN durchgeführt werden.

AP AIX9: Studie neue Anlagenkonzepte

Der Vergleich mit der Si-Industrie hat gezeigt, dass die Skalierung der 56x2 Zoll / 14x100 mm Reaktoren auf 5x200 mm bzw. 1x300 mm nur ein erster Schritt sein kann. Für die spätere Überführung der neuen Technologie in die Produktion werden weitere Steigerungen der Effizienz und Senkung der Prozesskosten notwendig sein. Dazu waren in diesem Arbeitspaket umfangreiche theoretische Modellbildungsprozesse geplant. Um die Produktionstauglichkeit der neuen Herstellungsprozesse für III-V-Halbleiter auf Si theoretisch vorhersagen zu können, sollte im Rahmen dieses letzten Arbeitspaketes eine wissenschaftlich basierte Machbarkeitsstudie für entsprechende Produktionsprozesse durchgeführt werden. Als Basis für die Studie sollten die bis dahin erarbeiteten Projektergebnisse bzgl. Prozessführung und Anlagentechnologie eingehend analysiert werden und mit den Produktionsanforderungen der Endanwender Infineon und SMA abgeglichen werden. Dabei sollte von einem möglichst abstrakten Modell gestartet werden, um allgemeingültige Aussagen für eine spätere Anwendung zu erhalten. Dieser Soll-Ist-Vergleich sollte dann als Grundlage für die Erarbeitung von ganz neuen Anlagenkonzepten dienen, die weit über die einfache Skalierung bestehender Anlagen hinausgehen könnte und einen erheblichen, risikobehafteten Entwicklungsaufwand darstellen würden. Das im Rahmen der vorangegangenen Arbeitspakete entwickelte detaillierte theoretische Verständnis der physikalischen und chemischen Vorgänge während der Schichtabscheidung sollte in die neuen Anlagenkonzepte einfließen. Als besondere technologische Herausforderung wurde erwartet, ein Anlagenkonzept zu erstellen, das die effiziente und reproduzierbare Produktion mit einem hohen Durchsatz erlaubt, trotz der extrem engen Prozessfenster für die Abscheidung von qualitativ hochwertigem III-V-Halbleitermaterial auf Si. Bei der Erstellung der Anlagenkonzepte sollten die in AP AIX2 verbesserten chemischen Modelle für die Simulation der Abscheideprozesse zum Einsatz kommen. In enger Abstimmung mit den Projektpartnern sollten die neuartigen Anlagenkonzepte hinsichtlich ihrer Eignung für die industrielle Herstellung von III-V-Elektronik auf Si abschließend bewertet werden.

Nach Projektabschluss sollten die erstellten Anlagenkonzepte als wissenschaftliche Grundlage für die Entwicklung einer später geplanten neuen Anlagentechnologie verwendet werden. Erst nach positiver Bewertung der erarbeiteten Modelle sollte die Planung der Hardware erfolgen.

Balkenplan AIXTRON

Zeitraum		Monat	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36					
Arbeitspaket	Arbeitspunkt	Bezeichnung																																										
Aixtron	T7.1	Optimierung 14x100 mm Anlage	10																																									
	T7.2	Opt/Erw chem. Modelle	8																		M7.3																					M7.8		
	T7.3	Temperaturgmt. Planetenreaktor	10						M7.1																																			
	T7.4	Opt. Suszept. für HEMT/Si	9						M7.2																																			
	T7.5	Basisprozesse/Prozeßoptimierung	12																		M7.4																							
	T7.6	Proz. Entw. HEMT auf 150/200 mm	16																																									
	T7.7	Korrel. Planet-> Showerhead	6																																									
	T7.8	Proz. Entw. SH-Reaktor (200/300mm)	12																																									
	T7.9	Studie neue Anlagenkonzepte	6																																									M7.10

- M7.1 Temperaturmanagement optimiert, Temperaturabweichung von Wafer zu Wafer < 1 °C
- M7.2 1. neues Suszeptordesign realisiert und getestet / Sandwich Bauweise realisiert, Lebensdauer der Deckschicht entspricht mindestens der Lebensdauer von Standardsuszeptoren / M7.1 kann auch mit neuem Suszeptor erfüllt werden
- M7.3 1. verbessertes chemisches Modell verfügbar / das Modell muss die Wachstumsraten und die Schichtzusammensetzung bei der AlGaIn und InAlIn Abscheidung richtig wiedergeben
- M7.4 Basisprozesse für GaN, AlGaIn, und InGaIn auf Saphir für 56x2 Zoll Reaktor entwickelt und dokumentiert / Standardspezifikationen der 42x2 Zoll Anlagen werden erfüllt
- M7.5 Auf Grundlage der Basisprozessentwicklung optimierter Reaktor – Design von Suszeptor, Gaseinlass und das optimierte Temperaturmanagement erlauben die Erfüllung der 2 Zoll Spezifikationen (M7.4) auch auf 100 mm Saphirsubstraten
- M7.6 Hochohmige ($> 10^5 \text{ Ohm/}$) Pufferstruktur auf Si-Substraten demonstriert
- M7.7 HEMT Struktur auf 100 mm Si mit $n_s > 1 \times 10^{13} \text{ cm}^2$ und $\mu = 1600 \text{ Vs/cm}^2$ demonstriert
- M7.8 Endgültige Definition der optimierten Anlagenhardware, Anlagenhardware muss die Erfüllung der Spezifikationen von M7.7 und M7.8 erlauben.
- M7.9 Skalierung HEMT Prozess auf 150 mm Si-Substrat abgeschlossen, Spezifikationen entsprechend M7.7 erreicht
- M7.10 Designstudie für neue Anlagenkonzepte auf der Basis von Kundenerwartungen, die zur Projekthalbzeit erhoben werden

Abbruchmeilenstein in Abstimmung mit den Projektpartnern (Monat 19):

Die Erfüllungskriterien für die Weiterführung des Projekts waren die Erfüllung der bis zum Monat 19 geplanten Meilensteine, eine gegenseitig positive Bewertung der gelieferten Beiträge und eine Risikoanalyse in Bezug auf die verbleibenden Arbeitspakete. Bei einem Verzug von Meilensteinen über den Projektmonat 19 hinaus war eine detaillierte Risikobetrachtung mit den Maßnahmen zur Einhaltung der gemeinsamen Arbeiten zu erbringen. Gemeinsam mit den Projektpartnern sollte die Entscheidung über die Fortführung oder den Abbruch des Vorhabens auf Basis der gelieferten Beiträge und der Risikobewertungen der verbleibenden Aktivitäten beschlossen werden. Zum Abbruchmeilenstein sollte vom BMBF bzw. dem PT über eine Fortführung oder ggf. einen Abbruch (der Förderung) entschieden werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Die Firma AIXTRON besaß als Marktführer auf dem Gebiet des Anlagenbaus für die III-V Halbleiterepitaxie bereits eine große Erfahrung im Design, Bau und Betrieb von Mehrscheiben-MOCVD-Anlagen. Für das Wachstum von GaN-basierten Halbleitern standen diverse MOCVD-Anlagen zur Verfügung, die aufgrund ihrer exzellenten Homogenitäts- und Reproduzierbarkeitsdaten von industriellen und akademischen Anwendern in der ganzen Welt für Forschung und Produktion benutzt wurden. Darüber hinaus fand im Applikationslabor der Firma AIXTRON seit vielen Jahren MOCVD-Prozessentwicklung für optoelektronische und elektronische Bauelementstrukturen statt.

Speziell für dieses Projekt wurden auf der Anlagenseite bereits umfangreiche Vorarbeiten bezüglich der Realisierung eines 56x2-Zoll-Planetenreaktors für die Abscheidung von GaN-basierten Bauelementstrukturen geleistet. Auf der Basis des bewährten 42x2 Zoll Reaktordesigns und der vorhandenen 42x2 Zoll-Prozessdaten wurde die Reaktorhardware für den 56x2 Zoll Prototypen entworfen und der Einfluss der neuen Hardware auf den Prozess simuliert. Mit Hilfe der Simulationsrechnungen wurde das Design des 56x2 Zoll Planetenreaktors sukzessive optimiert. Schließlich wurde ein erster Prototyp realisiert und die Basisprozesse auf Saphir wurden bereits übertragen. Dieser Prototyp stand für die Arbeiten im Projekt zur Verfügung.

Auch hinsichtlich der GaN-Prozessentwicklung auf 2 Zoll Silizium-Substraten wurden schon umfassende Entwicklungsarbeiten durchgeführt. U. a. wurden im Rahmen von Diplomarbeiten im AIXTRON Labor Prozesse für GaN-basierte LEDs und Transistoren auf Si-Substraten entwickelt [Yilmaz, Philip, Costas]. Transistoren im Materialsystem AlInN/GaN und AlGaIn/GaN mit Weltbestwerten der elektronischen Eigenschaften wurden dabei realisiert. Diese Arbeiten wurden auf einem 1x2 Zoll Forschungsreaktor durchgeführt und sollten als Basis für die Prozessentwicklung auf der Produktionsanlage dienen. Diese ersten Erkenntnisse sollten dann im NEULAND-Projekt auf die großen Produktionsreaktoren (31x2 Zoll vertikale SH-Anlage, bzw. 56x2 Zoll Planeten-Anlage) übertragen werden. Da kaum noch 2 Zoll Substrate produziert wurden, war geplant schon zu Projektbeginn die Erforschung auf Si Substratgrößen von 100 mm zu untersuchen.

Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter)

Es gab nach damaligem Wissensstand keine Schutzrechte oder Patente Dritter, die einer späteren Verwertung der Ergebnisse aus der Projektarbeit entgegengestanden hätten.

Ein Auszug aus der für das Projekt relevanten AIXTRON Patentliste wird im Folgenden beschrieben:

1. DE-Patent 3537544.2, „Gaseinlaßvorrichtung für Reaktionsgefäße“
2. DE-Patent 3721636.8, „Quartzglasreaktor für MOCVD-Anlagen“
3. DE-Patent 3918094.8, „Verfahren zur Herstellung von dotierten Halbleiterschichten“
4. DE-Patent 3608783, „Gasphasen-Epitaxieverfahren und Vorrichtung zu seiner Durchführung“
5. DE-Patentanmeldung P 44 04 468.2, „Vorrichtung zum Abscheiden von Schichten auf Substraten“
6. DE-Patentanmeldung P 44 22 202.5, „Reaktor und Verfahren zum Beschichten von flächigen Substraten“
7. DE-Patentanmeldung 198 13 523.8, „CVD-Reaktor und dessen Verwendung“
8. DE-Patentanmeldung 198 55 637.3, „Verfahren und System zur Halbleiterkristallherstellung mit Temperaturverwaltung“
9. DE-Patentanmeldung 199 19 902.7, „Verfahren zur Herstellung eines Waferträgers, der insbesondere in einem Hochtemperatur-CVD-Reaktor bzw. bei einem Hochtemperatur-CVD-Verfahren unter Einsatz aggressiver Gase Verwendung findet“
10. DE-Patentanmeldung 199 40 033.4, „Verfahren und Vorrichtung zum Abscheiden von Schichten auf rotierenden Substraten in einem allseits beheizten Strömungskanal“
11. EP 99 119 423.4, „Method for Forming P-Type Semiconductor Crystalline Layer of III-Group Element Nitride“
12. DE-Patentanmeldung 100 099 45.9, „Verfahren und Apparatur zur Herstellung von Gruppe III-N + Gruppe III-V-N und Metall-Stickstoff Bauelementstrukturen auf Si-Substraten mittels metallorganischer Gasphasen“
13. DE-Patentanmeldung 100 181 28.7, „Verfahren zum Wachstum von Stickstoff enthaltenden Halbleiterkristallmaterialien“
14. DE-Patentanmeldung 100 487 59.9, „Verfahren und Vorrichtung zum Abscheiden insbesondere organischer Schichten im Wege der OVPD („Isothermer Verdampfer“)
15. DE-Patentanmeldung 100 550 33.9, „CVD-Reaktor mit grafitschaum-isoliertem, rohrförmigen Suszeptor, („Grafitschaumisolierung“)
16. DE-Patentanmeldung 100 551 82.3, „CVD-Reaktor mit von einem Gasstrom drehgelagerten und –angetriebenen Substrathalter („GFR SiC-Reaktor“)
17. DE-Patentanmeldung 100 560 29.6, Temperatursteuerung der Oberflächentemperaturen von Substraten in einem CVD-Reaktor („Gasflußgesteuerte Temperatur“)

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Bei dem abgeschlossene Vorhaben handelte es sich um ein Verbundprojekt mit den Projektpartnern:

Firma	Ansprechpartner	Anschrift	Kontakt
AIXTRON SE	Prof. Michael Heuken	Kaiserstr. 98 52134 Herzogenrath	Tel.: +49 241 8909154 m.heuken@aixtron.com
AZZURRO Semiconductors AG	Alexander Lösing	Universitätsplatz 2 39106 Magdeburg	Tel.: +49 / 391 / 506 88 - 102 alexander.loesing@azzurro-semiconductors.com
MicroGaN	Dr. Mike Kunze	89081 Ulm Lise-Meitner-Str. 13	Tel.: +49-731 5094-333 mike.kunze@microgan.com
Infineon Technologies AG	Dr. Roland Rupp	Am Campeon 1-12 85579 Neubiberg	Tel.: +49-9131 6872779 roland.rupp@infineon.com
SiCrystal AG	Sabine Storm	Günther-Scharowsky-Straße 1 D-91058 Erlangen	Tel.: +49- 9131 733252 sabine.storm@sicrystal.de mailto:martin.koelbl@sicrystal.de
SMA Solar Technology AG	Dr. Bernd Engel	Sonnenallee 1 34266 Niestetal	Tel.: +49 561 9522-4128 bernd.engel@sma.de

Die in diesem Forschungsvorhaben vorgesehene Konstellation aus Grundlagenforschung und industrieller Material- und Bauelement-Forschung hatte sich in früheren Kooperationen sehr gut bewährt und bot somit eine ideale Voraussetzung zur Erreichung der Projektziele.

Das Gesamtvorhaben wurde nach Abstimmung zwischen den beteiligten Projektpartnern in mehrere Teilvorhaben gegliedert. Die SiC- und GaN-spezifischen Forschungsarbeiten wurden zu Beginn der Projektarbeiten zunächst getrennt und zeitlich parallel bei den jeweils spezialisierten Partnern durchgeführt und im Anschluss beim Partner Infineon und den Systemintegrationspartnern zusammengeführt.

II.1 Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses

Im Folgenden werden die einzelnen Projektergebnisse nach Arbeitspaketen geordnet dargestellt.

AP-AIX 1: Optimierung 56x2 Zoll (14x100 mm, 8x150mm) MOCVD-Anlage

Im ersten Arbeitspaket ging es um die Optimierung einer bestehenden MOCVD-Anlage für die Herstellung von GaN-basierenden Schichtstrukturen auf großen Si-Substraten. Dazu gehörte auch die Abscheidung von AlGaIn-Schichten mit hohem Al-Anteil. Zu Projektbeginn existierte im AIXTRON Applikationslabor bereits der Prototyp eines horizontalen

Planetenreaktors, der für die Herstellung von LED Strukturen auf 56x2-Zoll Substraten entwickelt worden war. Diese Anlage sollte im Rahmen von Neuland für die Abscheidung auf 14x100 mm, 8x150 mm und 5x200 mm Si-Substraten optimiert werden. Die Designoptimierungen wurden im Rahmen von AP-AIX-1 durchgeführt. Der Test der Teile erfolgte dann in den nachfolgenden Arbeitspaketen. Die auf der Basis der Testergebnisse notwendigen Optimierungsarbeiten waren dann wieder Bestandteil dieses Arbeitspaketes.

Abbildung 1 zeigt die 56x2-Zoll Ausgangskonfiguration der Anlage.



Abbildung 1: MOCVD Planetenreaktor in ursprünglicher 56x2-Zoll Ausgangskonfiguration.

Es liegen jeweils sieben 2-Zoll Substrate auf einem 6-Zoll Teller. Neben dem Suszeptor, dem mit AIX-AP 4 ein eigenes Arbeitspaket gewidmet war, waren weitere zu optimierende Schlüsselkomponenten der Gaseinlass und die so genannte Ceiling, die den Reaktionsraum zum Reaktordeckel hin abschließt.



Abbildung 2: Dreifacheinlass und Ceiling des neuen horizontalen MOCVD Reaktors für die industrielle Herstellung von GaN-basierten Hochspannungsbauerelementen für die Leistungselektronik auf 100 mm und 150 mm Substraten.

Der in Abbildung 2 zu sehende neue Dreifacheinlass erlaubte die homogene Einleitung von sehr viel größeren Flussmengen, als das bei dem alten Design der Fall war. Dadurch lassen sich größer Quellenflüsse realisieren und diese mit Trägergas stärker verdünnen. Dadurch können parasitäre Gasphasenreaktionen weitgehend vermieden werden, was sich positiv auf die Vermeidung von Partikeln auswirkt. Außerdem kann bei höheren Drücken gearbeitet werden und es sind höhere Wachstumsraten möglich. Insgesamt führte der neue Gaseinlass zu einer signifikanten Aufweitung des Parameterfensters für die Abscheidung von qualitativ hochwertigen Schichten. Ebenfalls in Richtung Partikelvermeidung ging die Änderung der Materialwahl für die Ceiling – Abbildung 2. Die herkömmliche Quarzceiling wurde durch Graphit ersetzt. Generell ist parasitäres Wachstum an der Ceiling nicht vollständig auszuschließen. Die Graphitceiling hat aber gegenüber dem Quarz die Vorteile, dass das parasitär gewachsene Material besser haftet und sich die Emissivität nur unwesentlich mit dem Belag ändert. Die bessere Anhaftung des Materials führt dazu, dass dickere Beläge toleriert werden können ohne den Prozess negativ zu beeinflussen. Dadurch kann man auf das sonst übliche „ausbacken“ des Reaktors verzichten, Partikelbildung wird vermieden und die Ceiling muss seltener getauscht und gereinigt werden, was die Zeit für Wartungsarbeiten minimiert. Eine Änderung der Emissivität mit zunehmender Ceilingbelegung führt zu einem nicht zu vernachlässigenden Eingriff in das sensible Temperaturmanagement des Reaktors und muss unter allen Umständen vermieden werden.

Der Neue Gaseinlass und die neue Ceiling haben sich sowohl in der 14x100 mm als auch in der 8x150 mm Konfiguration bewährt.

Bezüglich der 14x100 mm Konfiguration wurde bei den Arbeiten zu AP-AIX 3 festgestellt, dass die Temperaturhomogenität mit der neuen Konfiguration noch nicht den Anforderungen entsprach. Deswegen wurde die Rückseitenbeschaffenheit der 14 Substratteller mit Blick auf

eine verbesserte Temperaturhomogenität über die 100 mm Substrate optimiert. Es wurden insgesamt 4 verschiedene Teller entworfen, gefertigt und im Rahmen von AP-AIX 3 getestet.

Vom Anlagendesign her war der Übergang von der 56x2 Zoll Konfiguration auf die 8x150 mm Konfiguration weniger Risikoreich als bei der 14x100 mm Konfiguration. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, entspricht die 8x150 mm Konfiguration in Bezug auf die Lage der Wafer der ursprünglichen 56x2 Zoll Konfiguration und stellt damit gleiche Anforderungen an Temperaturhomogenität und Gasflussdynamik.

Deswegen waren hier erst mal keine weiteren Anpassungen notwendig. Auf Wunsch der Projektpartner Azzurro und Infineon wurden die Optimierungsmaßnahmen zur Vermeidung von Partikeln aber nochmals im Detail diskutiert und der Einfluss der Prozessparameter anhand einer vorhandenen Datenbasis ausgewertet und erläutert. Materialablagerungen auf dem Suszeptor, an der Ceiling und am Kollektoring sowie Partikelbildung in der Gasphase sind die Hauptquellen für Partikel auf den Wafern. Der positive Einfluss des neuen Dreifacheinlasses, der Graphitceiling und des Suszeptors wurden schon vorher dargestellt. Zusätzlich wurde mit Blick auf die Partikelvermeidung der Abgasbereich des Reaktors optimiert. Zum einen wurde die Materialwahl für den Kollektor auf bestmögliche Haftwerte hin überprüft, zum anderen wurde das Spaltmaß zwischen Kollektoring und Suszeptor vergrößert, um eine Verunreinigung des Suszeptors durch vom Kollektor abfallende Partikel zu vermeiden. Neben dem Anlagendesign hat aber auch die Prozessführung einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Partikelgeneration. Im AIXTRON Labor wurden die wichtigsten Einflussgrößen zur Vermeidung von Partikeln im Prozess bestimmt. Hierzu zählen z.B. die Desorptionsbedingungen - Temperatur, Druck, Dauer, Art der Prozessgase – und die Temperatur der Ceiling sowohl in Bezug auf die spezifische Temperatur während eines Prozessschrittes, als auch auf die im Prozess gefahrenen Temperaturrampen. Eine solche Feinabstimmung der Prozessparameter bezüglich Partikelvermeidung ist aber absolut prozessspezifisch. Da die von den Partnern verwendeten Prozesse bei AIXTRON nicht im Detail bekannt sind und auch nicht offen gelegt werden sollten, konnten hier nur allgemeine Tendenzen zur Vermeidung von Partikeln diskutiert werden.

Der nächste Schwerpunkt lag auf der Entwicklung eines neuen Suszeptors für eine 5x200 mm Konfiguration. Ein Foto des neuen Suszeptors ist in Abbildung 3 zu sehen. Der Grundaufbau ist der gleiche wie für die 100 mm und 150 mm Konfigurationen – siehe AP-AIX 4. Auch dieser Suszeptor wurde bereits für das automatisierte Be- und Endladen vorbereitet.



Abbildung 3: MOCVD Produktionsanlage AIX G5 HT in neuer 5x200 mm Prototypenkonfiguration.

Im Rahmen der Prozessentwicklung wurde die Form der Substratteller hinsichtlich bestmöglicher Homogenität beim Wachstum optimiert. Die einzelnen simulationsgestützten Optimierungsschritte sind sehr ähnlich wie für die 200 mm Konfiguration des CCS (Close Coupled Showerhead) Reaktors und werden beispielhaft in AP-AIX 8 beschrieben.

Bei der Prozessentwicklung auf 200 mm Si Substraten hat sich herausgestellt, dass mit dem für die 14x100 mm und 8x150 mm Konfigurationen optimierten Dreifachgaseinlass keine ausreichenden Homogenitätswerte erzielt werden konnten.

Dadurch, dass in der 5x200 mm Konfiguration der Substratrand sehr nah an den Gaseinlass heranreicht, muss der Wachstumsberg der Verarmungskurve (für eine detaillierte Beschreibung der Wachstumsrate als Funktion der Position auf dem Substrat, Verarmungskurve, siehe AP-AIX 2) sehr nah am Injektor liegen. Das Verschieben der Verarmungskurve erfolgt in der Regel durch Variation des Totalflusses – in diesem Fall durch eine Reduktion und durch die Reduzierung des NH_3 -Flusses im untersten Gaseinlassniveau. Durch den geringeren NH_3 -Fluss erreicht man eine geringere Gasdichte über dem Substrat und beschleunigt damit die Diffusion der Gruppe-III-Komponenten aus der Gasphase zum Substrat. Auf der anderen Seite benötigt man bei den großen Substraten aber einen hinreichend großen Gesamtfluss, um genügend Wachstumsspezies bis an den äußeren Bereich der Substrate zu bringen. Der Konflikt zwischen diesen beiden Bedingungen ließ sich mit dem bestehenden Dreifachgaseinlass nicht lösen. Deswegen musste für die 200 mm Konfiguration ein neuer Injektor entwickelt werden, der eine schnellere Diffusion der

wachstumsbestimmenden Gruppe-III-Komponenten (MO) zum Substrat erlaubt, ohne dafür die Gesamtflussgeschwindigkeit zurückzunehmen oder den NH_3 -Fluss unterhalb des MO Injektionsniveaus zu reduzieren. Das Design des neuen Injektors erfolgte simulationsgestützt in verschiedenen Iterationen. Optimale Ergebnisse konnten schließlich mit einem 5-fach Injektor erzielt werden. Abbildung 4 zeigt als ein Beispiel das Ergebnis für die jeweilige Schichtdickenhomogenität über dem Wafer für die separate TMGa Injektion durch jedes der 5 übereinander liegenden Injektorniveaus. In allen fünf Fällen wurde ein maximal möglicher NH_3 -Fluss durch alle 5 Einlassniveaus verwendet. Der maximal mögliche NH_3 -Fluss wird durch ein gerade noch homogenes Strömungsfeld im Reaktor bestimmt.

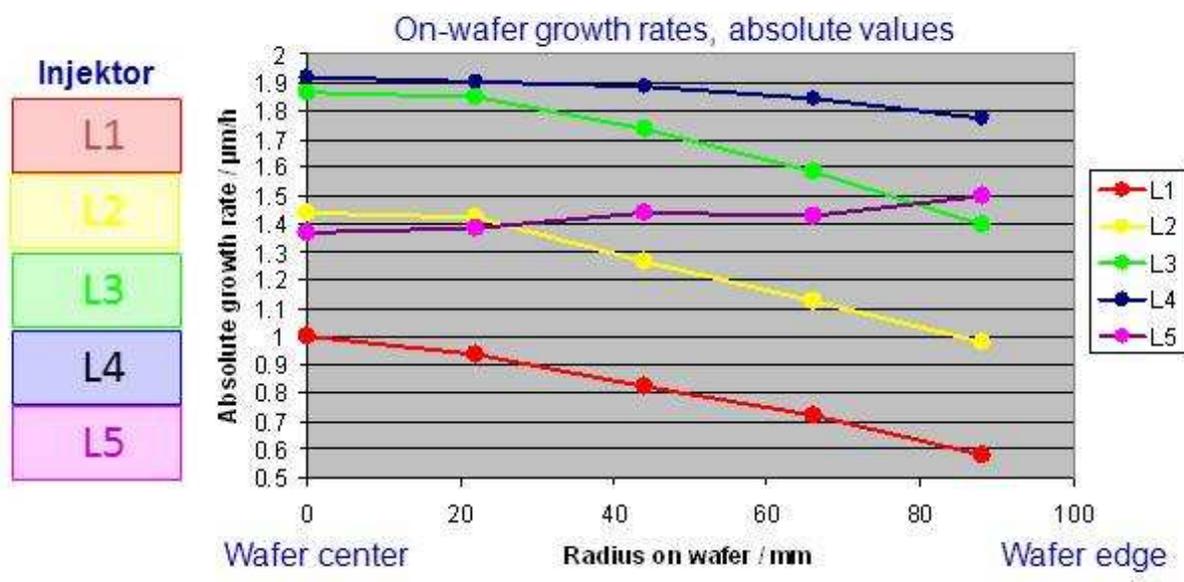


Abbildung 4: Schichtdickenhomogenität über dem Wafer für die separate TMGa Injektion durch jedes der 5 übereinander liegenden Injektorniveaus L1 bis L5. Ein maximaler NH_3 -Fluss wird gleichmäßig über alle 5 Injektorniveaus verteilt.

Die Auswertung der Experimente hat zu den folgenden Schlüssen geführt:

1. Mischen von NH_3 und TMGa im gekühlten Injektor führt nicht zu Vorreaktionen. Bisher wurden die MOs und NH_3 immer durch getrennte Einlässe eingeleitet.
2. Man kann nur durch die MO Einleitung durch unterschiedliche Einlassniveaus das Wachstumsprofil von konvex zu konkav variieren ohne Änderung sonstiger Flussparameter
3. Für die separate TMGa-Injektion durch N4 wird ein fast flaches Profil erreicht.

Für den Fall, dass ternäre Komponenten abgeschieden werden sollen bietet der 5-fach Injektor sogar die Möglichkeit die Wachstumsprofile der jeweiligen binären Komponenten

separat einzustellen. Abbildung 5 zeigt das am Beispiel des AlGaIn. Der Graph zeigt die Wachstumsrate als Funktion der Position auf dem 200 mm Substrat. In dem gezeigten Beispiel wurde ein konstanter TMGa-Fluss durch das Injektorniveau L4 verwendet, während das TMAI jeweils separat durch die Niveaus L2, L3 und L4 eingeleitet wurde. Das Wachstumsratenprofil für die GaN-Komponente blieb in diesem Experiment weitgehend konstant, das AlN-Profil konnte wieder von konvex zu konkav eingestellt werden. In gleicher Weise kann man mit konstanter Einleitung von TMAI und Variation des TMGa das GaN-Wachstumsprofil einstellen.

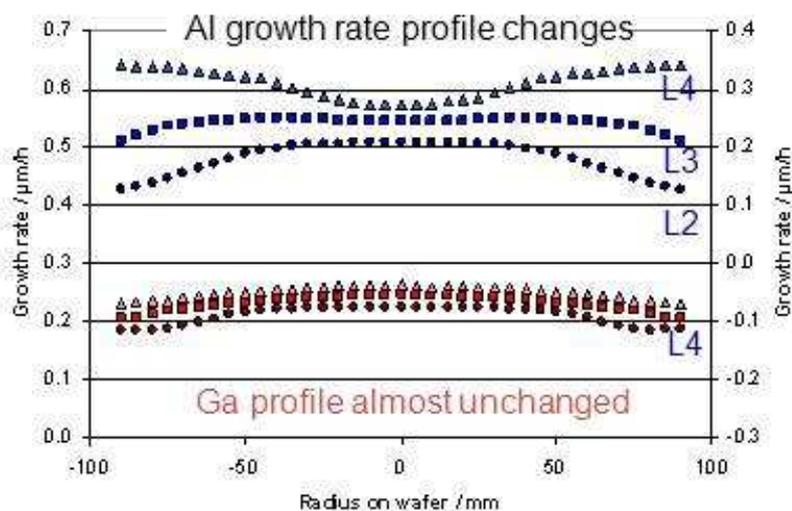


Abbildung 5: AlGaIn Wachstumsrate als Funktion der Position auf dem 200 mm Substrat und des TMAI Injektionsniveaus. Für TMGa wurde ein konstanter Fluss durch Injektionsniveau L4 verwendet, während das TMAI jeweils separat durch die Niveaus L2, L3 und L4 eingeleitet wurde.

Am Ende von AP-AIX 1 stand optimierte MOCVD Reaktor Hardware für die Abscheidung von GaN basierten Materialien auf für die Abscheidung auf 14x100 mm, 8x150 mm und 5x200 mm Si-Substraten zur Verfügung.

AP-AIX 2: Erweiterung / Optimierung der chemischen Modelle

Alle Designänderungen an den Reaktoren, sowohl an den horizontalen Planetenreaktoren als auch an den vertikalen Close Coupled Showerhead (CCS) Reaktoren, wurden durch numerische Simulationen unterstützt. Die Modellrechnungen dienten als Grundlage für die Reaktorentwicklung und -optimierung. Zu Projektbeginn standen schon sehr gute Wachstumsmodelle für die Abscheidung von GaN zur Verfügung. Die Abscheidung von Al-reichen AlGaIn Schichten ließ sich aber nicht richtig darstellen. In der ersten Projektphase sollten die GaN Modelle verifiziert werden. Für die AlGaIn Modelle sollte durch den Vergleich von Rechnungen mit experimentellen Daten eine Bestandsaufnahme gemacht werden, die dann als Basis für eine Verbesserung der Modelle dienen sollte.

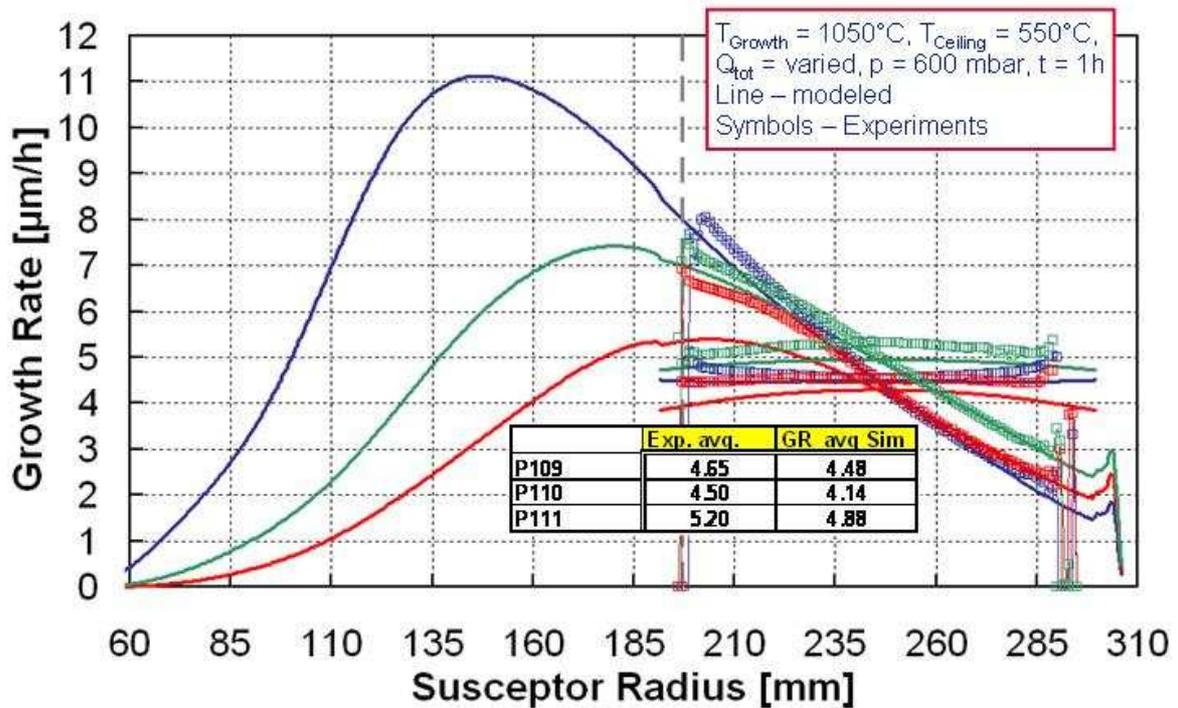


Abbildung 6: GaN Wachstumsrate als Funktion des Suszeptorradius für GaN Standardprozessbedingungen – Simulation: durchgezogene Linien – Experiment: quadratische Messpunkte. Variiert wurde der Gesamtgasfluss durch den Reaktor.

Abbildung 6 zeigt die berechnete GaN Wachstumsrate als Funktion des Suszeptorradius – durchgezogene Linien – und zum Vergleich die experimentellen Daten – quadratische Messpunkte. Für die Experimente wurden GaN Schichten auf Saphirsubstraten in der neuen 14x100 mm Reaktorkonfiguration abgeschieden. Die abfallenden Kurven wurden an stehenden Wafern gemessen, die weitgehend horizontalen an rotierenden. Die drei Kurven, die durch den gesamten Graphen in Abbildung 6 laufen zeigen typische so genannte Verarmungskurven für verschiedene Prozessbedingungen – hier wurde vor allem der Totalfluss im Reaktor variiert. Zunächst steigt die Wachstumsrate vom Gaseinlass in Richtung Substrate an, weil sich die Quellengase auf dem Weg zum heißen Substrat erst allmählich zerlegen. In der heißen Zone in Substratnähe setzt dann das Wachstum ein und es wird Material verbraucht. Dadurch verarmt die Gasphase im weiteren Verlauf Richtung Auspuff. Dadurch, dass man den Wafer im Bereich des linearen Abfalls rotieren lässt, kann man auf den Wafern ein sehr homogenes Wachstum realisieren. In dem Graphen erkennt man, dass Simulation und Experiment sehr gut aufeinander passen und sich damit die GaN Wachstumsraten sehr gut über die Modellrechnungen voraussagen lassen. Einzige Ausnahme bildet die rote Kurve, bei der extreme Prozessbedingungen angenommen wurden, die durch das Modell nicht wiedergegeben werden. Insgesamt wird durch das sehr gute GaN Modell der Transfer von Prozessen zwischen Reaktoren mit unterschiedlicher

Konfiguration extrem erleichtert und es lassen sich die Einflüsse von neuen Reaktorkomponenten auf den GaN Prozess relativ präzise voraussagen.

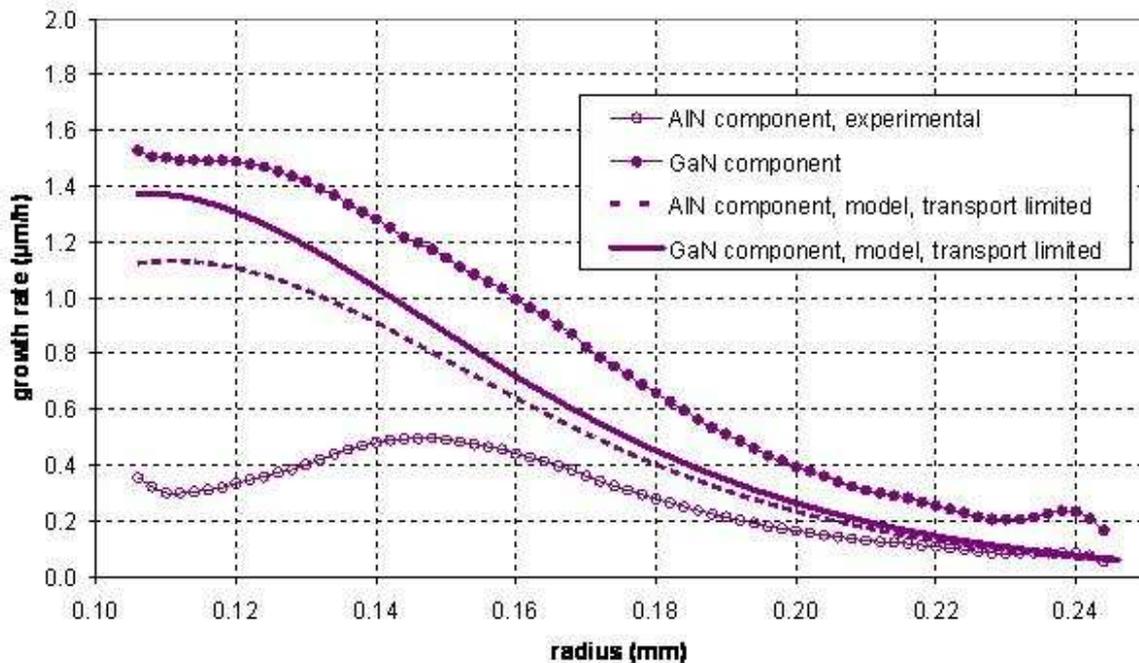


Abbildung 7: Wachstumsraten der binären Komponenten AlN und GaN bei der AlGaN Abscheidung als Funktion des Suszeptorradius - Vergleich von Simulation und experimentellen Daten.

Abbildung 7 zeigt, dass das bisherige AlGaN Modell leider noch nicht in der Lage ist das AlGaN Wachstum entsprechend gut vorausszusagen. Für die experimentellen Daten wurden AlGaN Schichten auf GaN-Si-Templaten abgeschieden und mittels Photolumineszenz (PL) und Röntgendiffraktometrie (XRD) analysiert. Aus den so gewonnen Daten wurden die Wachstumsraten für die binären Komponenten AlN und GaN einzeln aufgelöst. An den Verarmungskurven in Abbildung 7 sieht man, dass das Verarmungsverhalten der beiden Komponenten stark unterschiedlich ist. Während man beim GaN eine typische Verarmungskurve findet, zeigt die AlN Kurve einen starken Abfall nahe dem Reaktoreinlass. Im weiteren Projektverlauf wurde an einer Anpassung des Modells an die experimentellen Ergebnisse gearbeitet. Die Form der Kurve wurde dadurch erklärt, dass in Einlassnähe Addukte höherer Ordnung zwischen Al und NH_3 entstehen, die sich dann stromabwärts in der heißen Zone wieder teilweise zerlegen.

Die Ausarbeitung des verbesserten Modells wurde in Zusammenarbeit mit Partnern durchgeführt. Abbildung 8 zeigt die Kalkulation der AlN Wachstumsraten als Funktion der Position auf dem Suszeptor für die gegebenen Wachstumsbedingungen; einmal mit dem alten Modell gerechnet (conventional) und einmal mit dem optimierten (revised). Im linken

Diagram wurde das V/III-Verhältnis variiert, im rechten der Totalfluss und die Einspeisung der Gase durch die verschiedenen Gaseinlässe des Dreifacheinlasses.

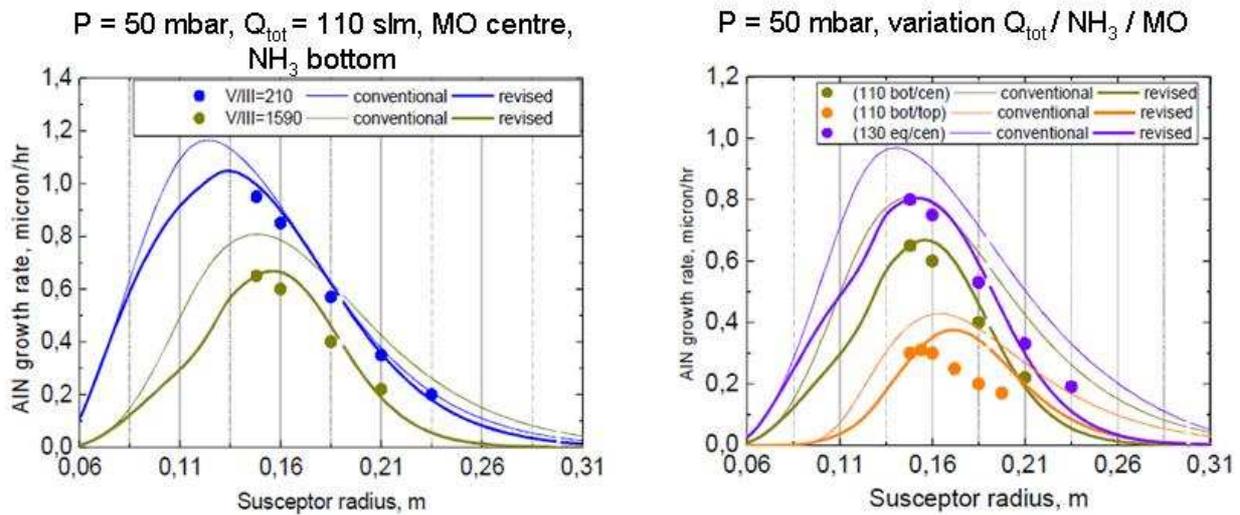


Abbildung 8: Vergleich von Simulation und Experiment für die AIN Wachstumsrate als Funktion der Position auf dem Suszeptor für altes (conventional) und optimiertes (revised) Modell – links: Variation V/III-Verhältnis; rechts: Variation von Totalfluss und Einspeisung der Gase durch die verschiedenen Gaseinlässe des Dreifacheinlasses.

Man erkennt deutlich, dass mit dem optimierten Modell die experimentellen Datenpunkte sehr viel besser auf den berechneten Kurven liegen. Die einzige Ausnahme bildet die orangene Kurve, bei der die Al-Ausgangssubstanz TMAI durch den oberen Gaseinlass eingespeist wurde. Der Grund hierfür ist, dass das einfache Modell die Belegung der Ceiling nicht richtig wiedergibt, wenn sich dort ein lokales V/III-Verhältnis kleiner als Eins einstellt. Auch dieser Extremfall lässt sich aber mit einer genaueren Simulation der Ceilingbelegung beheben.

In einem zweiten Schritt wurde das verbesserte AIN Modell als Grundlage für ein Wachstumsmodell für das ternäre AlInN verwendet. Auch hier erfolgte wieder eine Optimierung des Modells durch den Abgleich mit experimentellen Daten aus dem AIXTRON Labor. Abbildung 9 zeigt, dass schon das erste Modell die AlInN Abscheidung bei niedrigen Drücken sehr gut wiedergegeben hat. Sowohl für die AlInN Wachstumsrate als auch für den In-Anteil im ternären Kristall passen Simulation und Experiment sehr gut zusammen.

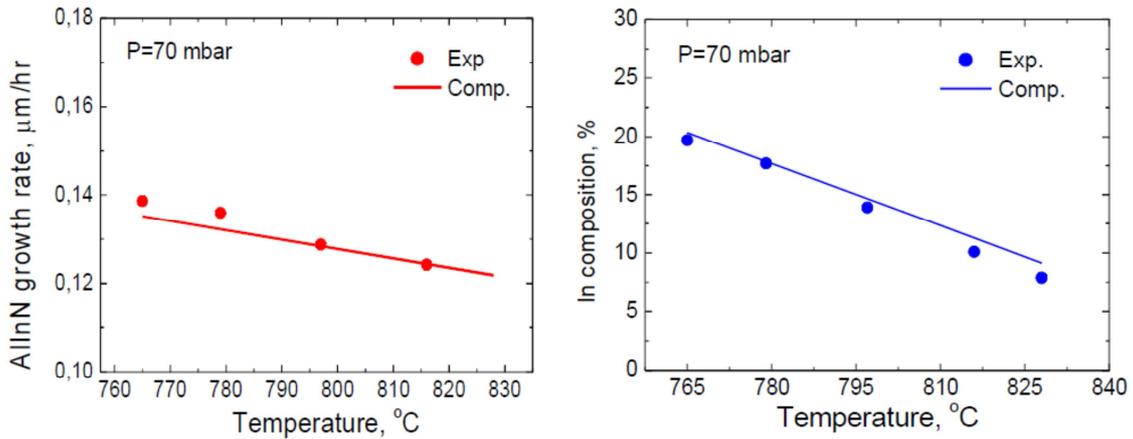


Abbildung 9: Vergleich von Simulation und Experiment für die AlInN Wachstumsrate (links) und den In-Gehalt (rechts) als Funktion der Wachstumstemperatur bei 70 mbar Reaktordruck.

Bei höheren Drücken treten aber größere Abweichungen auf, wie man im rechten Graphen von Abbildung 10 sieht. Hier ist wieder der In-Anteil im Festkörper als Funktion der Temperatur diesmal für 300 mbar Reaktordruck dargestellt. Der Graph zeigt aber auch, dass man Modell und Experiment für die höheren Drücke wieder annähern kann, wenn man die Bildung von InAlN Partikeln in dem Modell berücksichtigt. Der linke Graph zeigt experimentelle Daten und Simulationen mit dem optimierten Modell für Drücke von 70, 150 und 300 mbar.

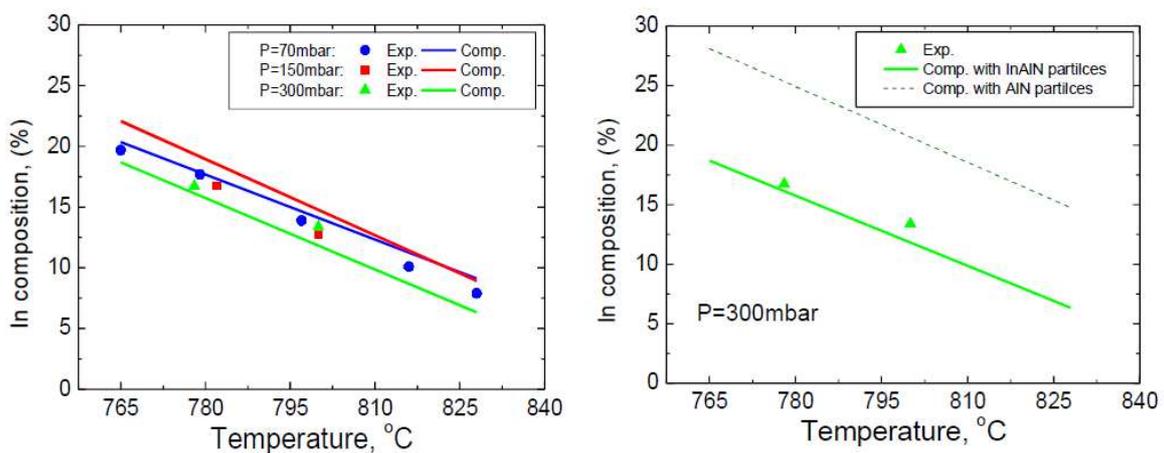


Abbildung 10: Vergleich von Simulation und Experiment für den In-Gehalt in AlInN als Funktion der Wachstumstemperatur. Rechts bei 300 mbar Reaktordruck, simuliert mit einfachem Modell und optimiertem Modell unter Berücksichtigung von AlInN Partikelbildung. Links mit optimiertem Modell für Drücke von 70, 150 und 300 mbar.

Damit stand ein erstes verbessertes Modell für die Abscheidung von AlN und AlInN zur Verfügung. Im weiteren Projektverlauf wurden die Modelle unter weiteren Prozessbedingungen getestet und weiter optimiert.

Mittels eines DoE wurde eine experimentelle Datenbasis geschaffen. Es wurden Experimente geplant und durchgeführt, um im Wesentlichen die Abhängigkeit der AlGaN-Schichtdicke und -zusammensetzung von den Prozessparametern zu untersuchen. Ein Teil der untersuchten Parameter zielte dabei allgemein auf das chemische Verhalten des Materialsystems AlGaN (z.B. Temperatur, NH₃ Partialdruck etc.), der andere Teil auf die Korrelation zwischen Reaktordesign und Wachstumsprozess (Totalflussrate, Ceilingtemperatur, Flussverhältnisse im Gaseinlass, etc.).

Tabelle 1: Auflistung der variierten Prozessparameter und der damit verbundenen Versuchsziele zur Schaffung einer experimentellen Datenbasis für die Validierung des chemischen Modells für das AlGaN Wachstum.

Parameter	Versuchsziel
Totalfluss	Tuning Verarmungskurve, Homogenität, Einfluss Verweilzeit auf Gasphasennukleation (GPN)
NH ₃ Fluss	Einfluss des NH ₃ Partialdruck auf GPN (via Adduktbildung) und Ga-Desorption
Druck	Einfluss auf GPN (via Verweilzeit und Partialdrücken)
Temperatur	Temperaturabhängigkeit der Ga-Desorption („H ₂ -Ätzen“)
Ceiling Temp.	Einfluss thermisches Umfeld auf GPN
Al-Gehalt	Einfluss $x_S(\text{Al})$ auf Ga-Desorption; Solid-Vapour ratio $x_S(\text{Al})/x_V(\text{Al})$
Al-Verteilung	Verteilung $x_S(\text{Al})$ beeinflussen durch TMAI im oberen Einlass

Tabelle 1 zeigt alle variierten Parameter und die damit verbundenen Versuchsziele. Abbildung 11 zeigt, als ein Beispiel für die Auswertung, die Wachstumsrate der binären AlGaN Komponenten AlN und GaN in Abhängigkeit von der Wachstumstemperatur und der Position auf dem Wafer. Die Messungen wurden an einem Wafer vorgenommen, der während der Abscheidung nicht rotiert wurde. Die Wachstumsrate der binären Komponenten wurde aus der Schichtdicke und der Zusammensetzung des ternären Materials bestimmt. Die Schichtdicke wurde mittels Weißlichtinterferometrie ermittelt, die Zusammensetzung über Photolumineszenzmessungen (PL). Für Proben mit hohem Al-Gehalt wurde zusätzlich die

Röntgenbeugung eingesetzt, da für Al-Gehalte > 38% die PL-Messungen aufgrund des zunehmend indirekten Charakters des Materials zu ungenau werden.

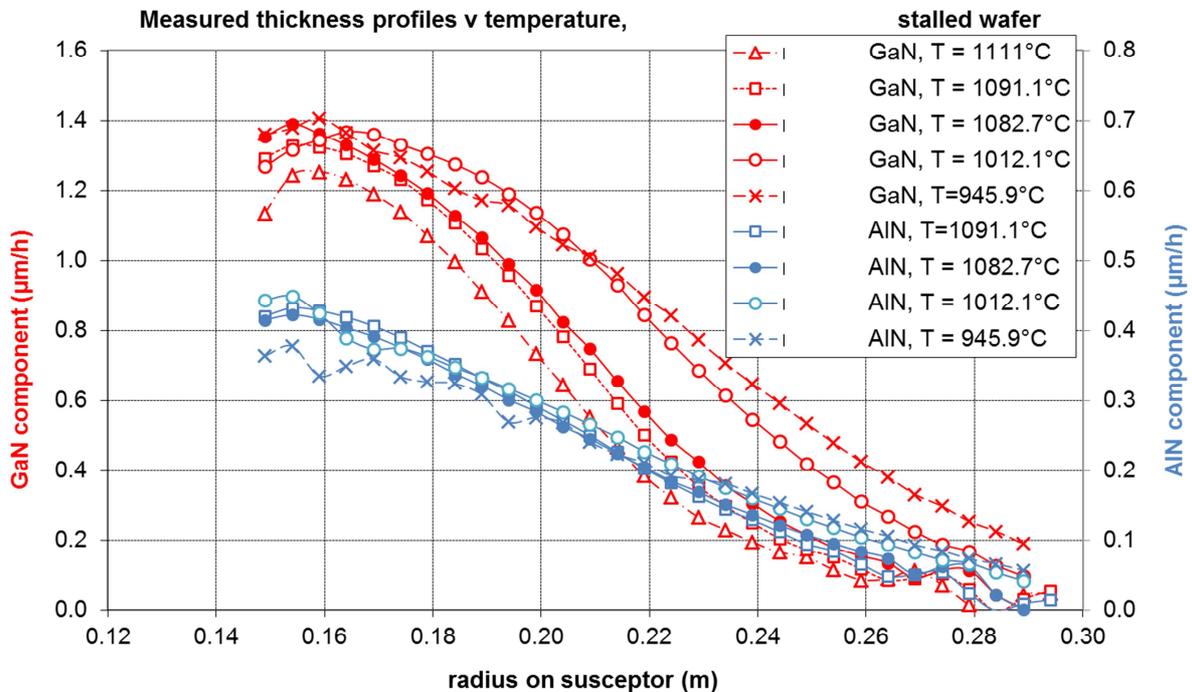


Abbildung 11: Wachstumsrate der binären AlGaN Komponenten AlN und GaN in Abhängigkeit von der Wachstumstemperatur und der Position auf dem Wafer. Die Messungen wurden an einem Wafer vorgenommen, der während der Abscheidung nicht rotiert wurde.

Man sieht in Abbildung 11, dass die GaN Wachstumsrate mit steigender Temperatur deutlich abfällt und die Verarmungskurve von der Mitte des Wafers zum Rand hin steiler wird. Die AlN Wachstumsrate ist dagegen nahezu konstant. Dieses Verhalten kommt durch eine selektive Desorption von Ga zustande, die durch das verbesserte chemische Modell relativ gut vorhergesagt werden kann. Dadurch, dass der Ga-Gehalt mit steigender Temperatur fällt, während der Al-Gehalt konstant bleibt, verändert sich der relative Anteil der binären Komponenten mit der Temperatur. D.h., dass mit steigender Wachstumstemperatur der Al-Anteil im AlGaN zunimmt. Bei genauerer Auswertung der Daten sieht man, dass in geringem Maß auch die Verarmung der AlN Komponente vom Gaseinlass zum Rand hin zunimmt. Dieses kann auf geringfügig höhere Verluste durch Gasphasennukleationen zurückgeführt werden. Insgesamt haben die durchgeführten Experimente eine Fülle von Daten generiert, die mit dem Modell abgeglichen wurden und zu einer iterativen Modelloptimierung geführt haben. Dieser Prozess wird auch über das Projektende hin weitergeführt.

AP-AIX 3: Optimierung Temperaturmanagement im Planetenreaktor

Weiter oben wurde bereits beschrieben, dass eine gute Temperaturhomogenität im Reaktor eine absolute Grundvoraussetzung für eine homogene Materialabscheidung ist. Das Temperaturmanagement im Reaktor ist konfigurations-, material- und prozessspezifisch. Deswegen musste es sowohl an die neue 14x100 mm Reaktorkonfiguration als auch an den AlGaIn Prozess auf Si angepasst werden. Mittels Simulationen wurde der Einfluss verschiedener Reaktorkomponenten auf das Temperaturmanagement untersucht, um die optimale Geometrie und die besten Materialien auszuwählen. Auf der Basis der Simulationen wurden die entsprechenden Komponenten entworfen, gefertigt und anschließend im Labor getestet. Ziel war die Realisierung einer Temperaturabweichung von Wafer zu Wafer von kleiner $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dieses Ziel war mit dem Meilenstein M7.1 verknüpft und sollte nach 6 Monaten erreicht sein.

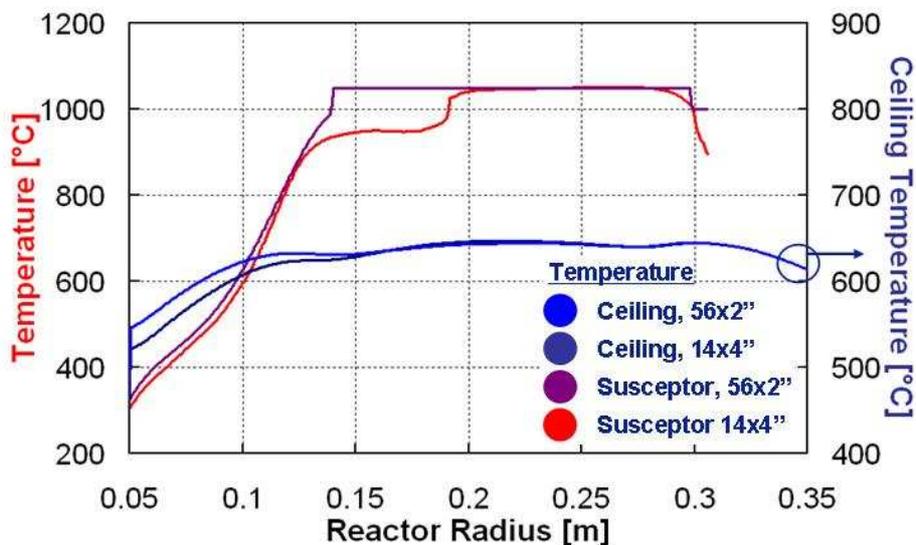


Abbildung 12: Simulierter Temperaturverlauf auf dem Suszeptor und auf der Ceiling für die 56x2-Zoll Ausgangskonfiguration und für die neue 14x4-Zoll bzw. 14x100 mm Konfiguration.

Abbildung 12 zeigt den mittels Simulation optimierten Temperaturverlauf auf dem Suszeptor und auf der Ceiling für die 56x2-Zoll Ausgangskonfiguration und für die neue 14x100 mm Konfiguration. In der Ausgangskonfiguration wird die Setpointtemperatur erst ganz kurz vor den 150 mm Tellern erreicht, auf denen die jeweils sieben 2-Zoll Substrate liegen. Dadurch sollen mögliche Vorreaktionen in einer zu langen heißen Vorlaufzone vermieden werden. Diese Vorreaktionen würden Quellenmaterial verbrauchen und damit die Wachstumsraten reduzieren und den Prozess weniger effizient machen. Für die 14x100 mm Konfiguration wurde ein Kompromiss gewählt. Hier war das Ziel, nur den Suszeptor für die neue Konfiguration zu tauschen, die Heizspule aber von der 2-Zoll Konfiguration zu übernehmen.

Dafür wurde in Kauf genommen, dass es eine längere heiße Vorlaufzone vor den 100 mm Tellern gibt, als dies bei den 150 mm Tellern der Fall ist. Mit Simulationen wurde gezeigt und experimentell nachgewiesen, dass der hierdurch tatsächlich verursachte Rückgang in der Wachstumsrate und damit in der Effizienz minimal ist. Man gewinnt aber die Flexibilität zum schnellen Austausch der verschiedenen Konfigurationen. Da die 56x2-Zoll Konfiguration fast identisch mit der 8x150 mm Konfiguration ist, kann man so dieselbe Heizspule für die drei 2-Zoll, 100 mm und 150 mm Konfigurationen verwenden.

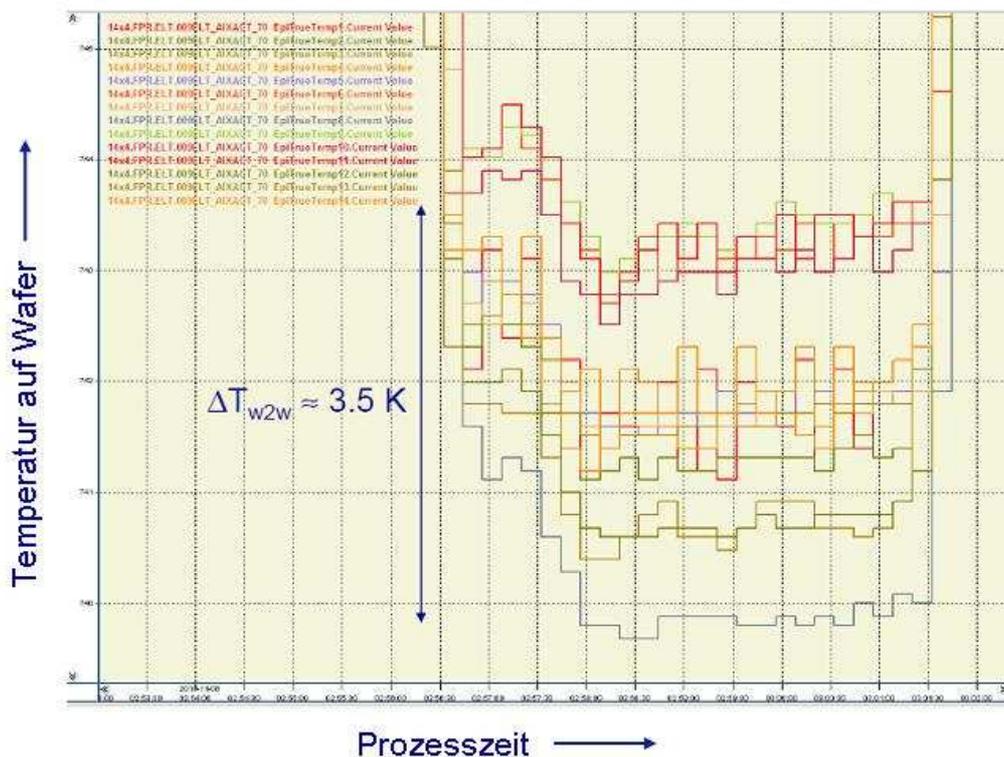


Abbildung 13: Screen Shot der Messung der Temperaturhomogenität auf allen 14 Wafern der neuen 14x100 mm Reaktorkonfiguration. Die absolute Temperaturabweichung von Wafer zu Wafer liegt bei 3,5 K.

Abbildung 13 zeigt die Messung der Temperaturhomogenität auf allen 14 Wafern der neuen Konfiguration. Man sieht, dass die Drift der mittleren Temperatur zwischen den einzelnen Tellern noch im Bereich von 3,5 K lag und damit außerhalb der Meilensteinvorgabe von $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Um die Temperaturen auf den einzelnen Substartellern und von Teller zu Teller weiter zu homogenisieren, wurde zum einen das Design der Teller überarbeitet, zum anderen wurde eine neue Technik entwickelt mit der sich Temperaturunterschiede zwischen einzelnen Substartellern ausgleichen lassen.

Das ursprüngliche Tellerdesign bestand aus einer einfachen, glatten Tellerunterseite. Zur Optimierung der Temperaturhomogenität auf den einzelnen Tellern wurden Rillen mit

unterschiedlichem Design in die Rückseite der Teller gefräst. Neben den flachen Tellern wurden 3 weitere Designs getestet.

800°C LP, carrier-gas N₂, sat.rot=N₂ (100sccm), p=400mbar

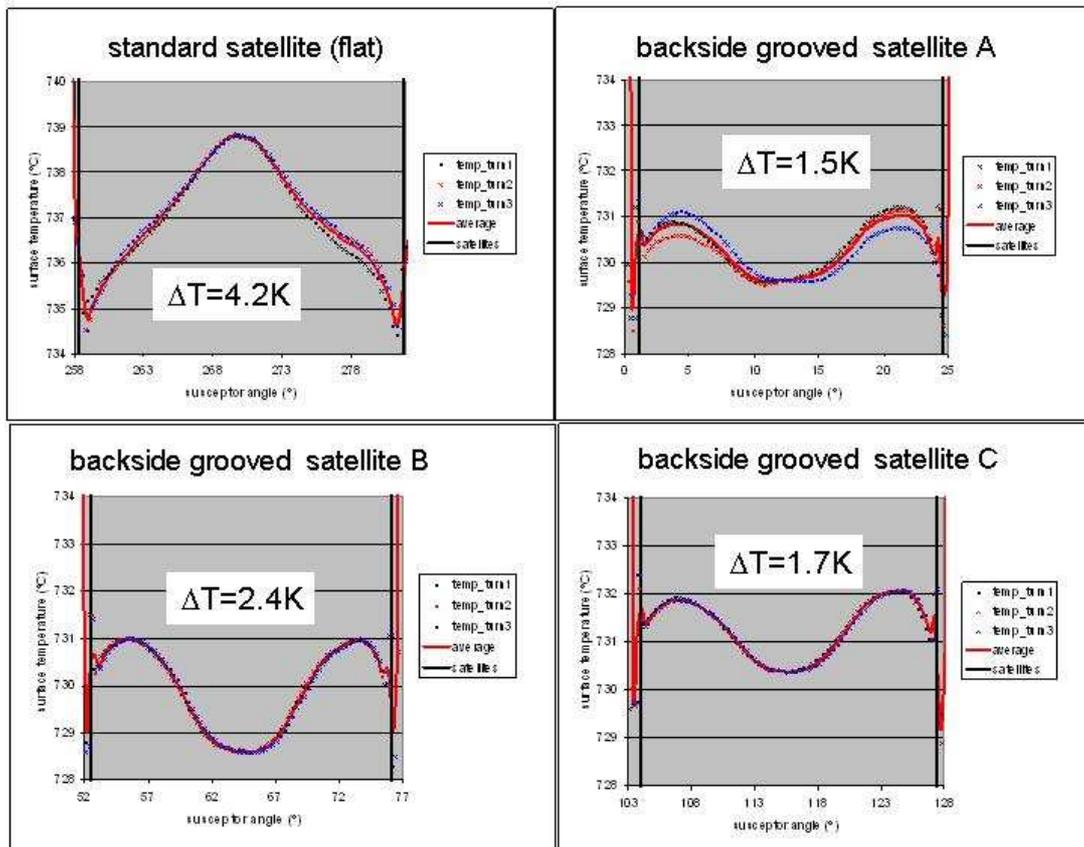


Abbildung 14: Temperaturmessung über den gesamten Radius von vier Substrattellern mit unterschiedlichem Design bei 800°C.

Abbildung 14 zeigt die Temperaturmessung über den gesamten Radius aller vier Tellervarianten. Im Vergleich zum flachen Standarddesign konnte die Temperaturdrift von $\Delta T = 4,2K$ auf $\Delta T = 1,5K$ mit Tellerdesign A reduziert werden. Entscheidend für die Ausbeute aus einem Produktionsreaktor ist aber nicht nur die Temperaturhomogenität auf einem einzelnen Teller, sondern auch die von Teller zu Teller. In unserem Fall die Homogenität über alle vierzehn 100 mm Teller. Um die Homogenität über alle Substartteller einer spezifischen Reaktorkonfiguration zu gewährleisten wurde eine Technik entwickelt, die einen Temperatenausgleich zwischen den verschiedenen Tellern ermöglicht. Abbildung 15 zeigt die prinzipielle Funktionsweise.

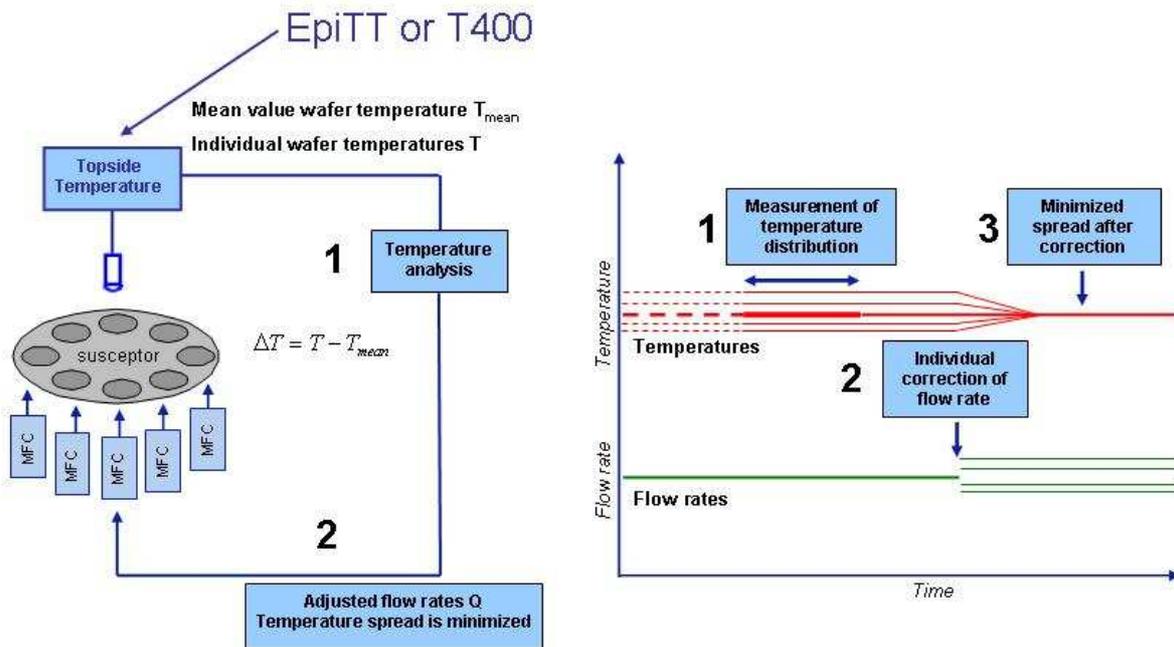


Abbildung 15: Prinzipielle Funktionsweise des Temperatenausgleichs von Substratteller zu Substratteller mittels Einzelrotationsgassteuerung.

Bei allen Planetenreaktoren erfolgt die Substrattellerrotation mit Hilfe eines Rotationsgases. Standardmäßig werden alle Teller mit dem gleichen Rotationsgasfluss unterspült. Das Besondere an der neuen Technik ist, dass sich jeder Teller mit einem spezifischen Rotationsgasfluss ansteuern lässt. Da ein erhöhter Rotationsgasfluss zu einer verstärkten thermischen Entkopplung des Tellers vom heißen Suszeptor führt, kann man so die mittlere Temperatur der einzelnen Teller variieren und somit einander angleichen. Die Messung der Teller, bzw. Substrattemperatur erfolgt pyrometrisch von oben.

Die Temperaturmessungen in Abbildung 16 zeigen, dass das theoretische Prinzip auch in der Realität funktioniert. Der linke Graph zeigt in der linken Hälfte die Temperaturmessung über alle 14 Substratteller mit einheitlichem Rotationsgasfluss für eine typische Barrierenwachstumstemperatur; die Temperaturdrift vom kältesten zum heißesten Teller beträgt 8,1K. Nach der individuellen Anpassung der Rotationsgasflüsse beträgt die Drift nur noch 0,4 K. Der rechte Graph zeigt, mit vergrößertem Maßstab, die Temperaturmessung, nach erfolgter Korrektur, für eine typische Quantentopfwachstumstemperatur, die etwa 100K niedriger liegt als bei der Barriere. Hier ist die Drift 0,6K. Damit wurde der Meilenstein M7.1 in beiden Fällen klar erfüllt.

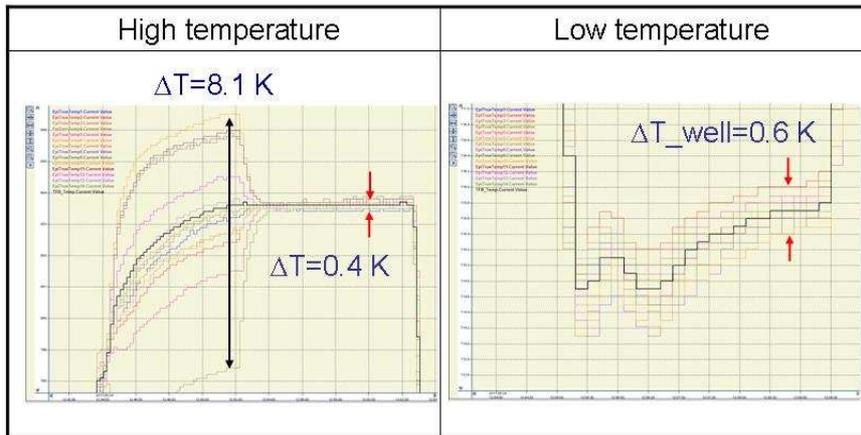


Abbildung 16: Temperaturmessung über alle 14 Substrate bei einer typischen Barrierenwachstumstemperatur (links) und bei einer um 100K reduzierten Temperatur (rechts). Das rechte Diagramm ist in vergrößertem Maßstab dargestellt.

Mit Blick auf die Minimierung der Prozesszeiten wurden die PID Parameter für die Heizung dahingehend Optimiert, das maximale Heiz- und Abkühlrampen gefahren werden können, ohne dass sich ein negativer Einfluss für das abzuscheidende Material ergibt.

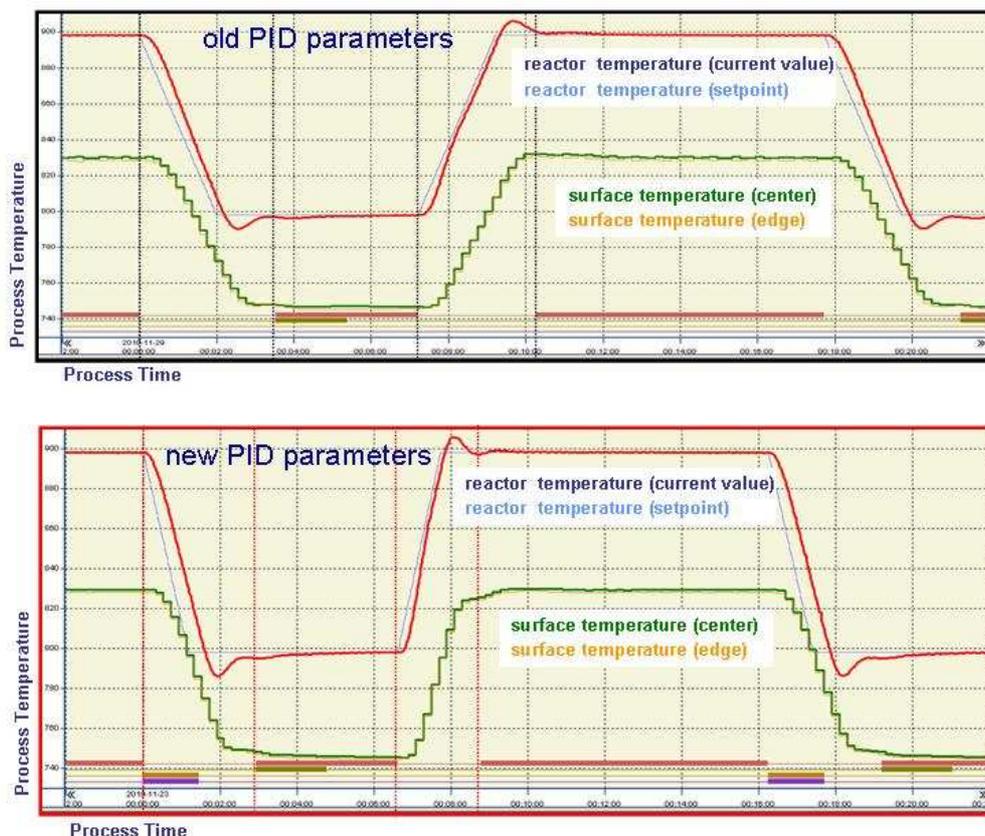


Abbildung 17: Heizzyklus für die Abscheidung einer einfachen GaN-InGaN-GaN Quantentopfstruktur mit ursprünglichen PID Parametern (oben) und mit optimierten Parametern (unten). Die roten Kurven entsprechen der unterhalb des Suszeptors gemessenen Steuertemperatur, die grüne und gelbe Kurve zeigen die tatsächlichen Temperaturen auf der Waferoberfläche, einmal im Zentrum (grün) und einmal im Randbereich (gelb, aufgrund der Homogenität weitgehend durch grüne Kurve verdeckt).

Weil das Materialsystem InGaN besonders temperaturempfindlich ist, wurden für diese Experimente InGaN basierende LED Strukturen abgeschieden. Abbildung 17 zeigt im oberen Teil einen Heizzyklus für die Abscheidung einer einfachen GaN-InGaN-GaN Quantentopfstruktur mit den ursprünglichen PID Parametern. Die rote Kurve entspricht der unterhalb des Suszeptors gemessenen Steuer temperatur, die grüne und gelbe Kurve zeigen die tatsächlichen Temperaturen auf der Waferoberfläche, einmal im Zentrum (grün) und einmal im Randbereich (gelb). Die Tatsache, dass die gelbe und grüne Kurve praktisch aufeinander liegen, zeigt die sehr gute Homogenität der Temperaturverteilung über den Wafer. Der untere Teil der Abbildung zeigt die gleichen Messungen für einen Prozess, der bezüglich maximaler Abkühl- und Heizraten optimiert wurde. Mit den neuen PID Parametern lassen sich in jedem Topf-Barrieren-Zyklus 90s einsparen. Dies ist für den Einzelschritt eine relativ geringe Zeitreduktion. In Bezug auf den Gesamtprozess für moderne Bauelementstrukturen, der aus einer erheblichen Anzahl von Prozessschritten bei verschiedenen Temperaturen besteht, wird der Zeitgewinn signifikant. Man sieht in Abbildung 17, dass mit den neuen PID Parametern die Temperaturdrift von absolut 2°C während des InGaN Wachstums etwas größer ist als mit den alten, die Auswertung der abgeschiedenen LED Strukturen hat aber ergeben, dass diese minimal größere Drift für die optischen Eigenschaften unerheblich war. Die Emissionswellenlängen lagen mit 460 nm und 462 nm ebenso eng beieinander wie die Standardabweichungen von 1,0 nm bzw. 1,6 nm. Da die LED Strukturen ein „worst case“ Szenario darstellen werden auch für die elektronischen Bauelemente durch die geänderten PID Parameter keine Nachteile erwartet.

AP-AIX 4: Optimierung Suszeptor für HEMT auf Si-Substraten (14x100mm / 8x150mm / 5x200mm / 1x200mm / 1x300mm)

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Optimierung der verschiedenen Suszeptoren bzgl. Temperaturhomogenität für die spezifischen Substratgrößen unter Berücksichtigung des Einflusses der zu erwartenden Wafer-Krümmungen. Daneben sollten bei Design und Materialauswahl auch die Prozesskosten im Auge behalten werden. Diese werden beeinflusst durch die Lebensdauer des Suszeptors, den Wartungsaufwand für Reinigung, Austausch, etc. und die Einzelstückkosten.



Abbildung 18: Neuer 14x100 mm Sandwich Suszeptor mit einzelnen SiC-beschichteten Abdecksegmenten und Vorbereitung für den Einsatz eines Beladeroboters.

In Abbildung 18 ist das Ergebnis für die 14x100 mm Konfiguration zu sehen, die im ersten Projektabschnitt entwickelt wurde. Das Design des neuen Suszeptors basiert auf einer so genannten Sandwich Bauweise. Auf den Grundträger werden als oberste Schicht einzelne SiC-beschichtete Abdecksegmente gelegt. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskonstanten zwischen dem Grundmaterial Silizium, der Beschichtung SiC und dem deponierten Material, Gruppe-III-Nitride, ist eine Beschädigung der SiC-Beschichtung die häufigste Fehlerursache. Durch die Segmentierung erhält man die Möglichkeit, bei Schäden an der Beschichtung nur einzelne fehlerhafte Segmente auszutauschen, was die Betriebskosten und den Wartungsaufwand im Vergleich zu den früheren massiven Suszeptoren signifikant reduziert. Zudem wurde das Suszeptordesign bereits für den späteren Einsatz eines Roboters für die Waferbeladung ausgelegt. Die Einkerbungen im Randbereich des Suszeptors ermöglichen dem Greifarm des Roboters die einzelnen Substratteller aufzunehmen. Dieses Grunddesign wurde im projektverlauf auf die 8x150 mm und 5x200 mm Suszeptoren übertragen. Mit der Fertigstellung der neuen 14x100 mm und 8x150 mm Suszeptoren wurde Meilenstein M7.2 „Neues Suszeptordesign realisiert und getestet“ erfüllt. Im Rahmen von AP5 wurden erfolgreiche Tests durchgeführt.

AP-AIX 5: Basisprozesse auf 100 mm Si / Prozessoptimierung

Mit der Skalierung der Reaktorgröße hat sich die Geometrie der Reaktorkammer in Bezug auf Prozesskammerhöhe, Gaseinlass, relative Lage der Wafer in der Prozesskammer etc.

geändert. Deswegen war es nötig alle Basisprozesse an den neuen Reaktor anzupassen. Die grundsätzliche Prozessanpassung zwischen den verschiedenen Reaktorgenerationen G4 und G5 war schon vor Projektbeginn erfolgt. Die Basisprozesse wurden zunächst auf die 56x2 Zoll Konfiguration übertragen. Mit dem unter AP4 entwickelten neuen 14x100 mm Suszeptor mussten die Prozesse jetzt im Rahmen des Projektes auch an die neue Konfiguration angepasst werden. Die verschiedenen Konfigurationen unterscheiden sich zum einen dadurch, dass die 100 mm Wafer weiter außen auf dem Suszeptor liegen und zum anderen dadurch, dass die heiße Vorlaufzone bei der 100 mm Konfiguration länger ist. Zur Anpassung der Prozesse wurde eine Vielzahl von Experimenten durchgeführt. Die Startparameter für die verschiedenen Materialien wurden über Simulationen bestimmt. Details zu den Simulationen und Experimenten liegen in Form der Präsentation zu den Projektstatustreffen vor. Hier werden nur einige Beispiele wiedergegeben.

Mit Hilfe der Simulation wurden Skalierungsfaktoren bestimmt, die ein relativ einfaches Anpassen der Gasflüsse beim Übergang von der 56x2 Zoll zur 14x100 mm Konfiguration ermöglicht haben. Mit diesen Skalierungsfaktoren wurden alle Basismaterialien auf die neue Konfiguration übertragen. Als Substrat kam hierfür zunächst Saphir zum Einsatz, um eine bessere Vergleichbarkeit zu alten Experimenten zu haben. Die Basismaterialien wurden dann zu der in Abbildung 19 gezeigten LED Struktur zusammengefügt. Diese Struktur diente als Testbauelement für aussagekräftige Untersuchungen bezüglich der erreichten Materialqualität und Homogenität der Abscheidung. Abbildung 20 zeigt Raumtemperatur (RT) Photolumineszenz (PL) Messungen an zwei 100 mm Wafern mit dieser LED Teststruktur aus derselben Abscheidung. Die Standardabweichung der Wellenlänge auf den einzelnen Wafern liegt bei nur etwa 0,3 % bzw. 1,4 nm bei einer mittleren Wellenlänge von 468 nm auf dem einen und 470 nm auf dem anderen Wafer.

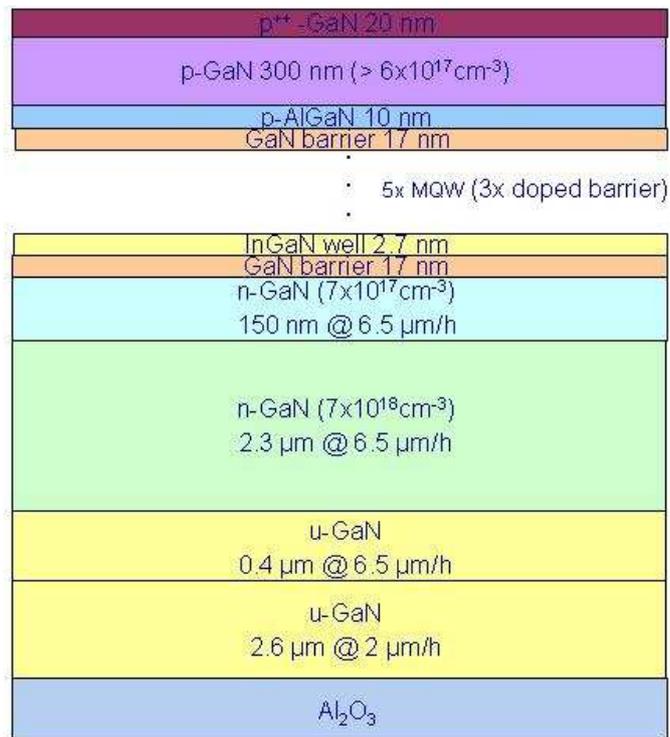


Abbildung 19: LED Teststruktur zur Bestimmung der Materialqualität von Standardmaterialien die mit der neuen Reaktorkonfiguration abgeschieden wurden.

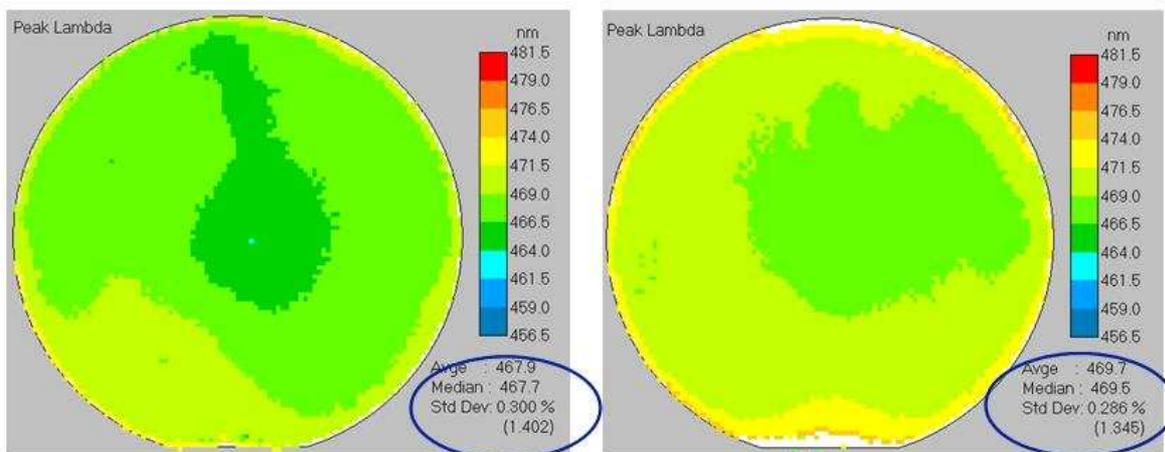


Abbildung 20: RT-PL Messungen von zwei 100 mm Wafern mit LED Teststrukturen aus dem gleichen Experiment.

Damit war die Homogenität auf den Wafern schon sehr gut, die von Wafer zu Wafer bot aber noch Potential für Verbesserung. Hier spielte die in AP-AIX 3 gezeigte noch nicht optimale Temperaturhomogenität eine Rolle. Röntgenbeugungsmessungen haben auch die exzellente strukturelle Qualität der hergestellten Teststrukturen gezeigt – Abbildung 21. Die in den gemessenen 002 Reflexen auftauchenden Schichtdickenoszillationen, in Abbildung 21 mit F

gekennzeichnet, zeigen zum einen die hohe strukturelle Qualität des Materials und der Grenzflächen und zum anderen zeigt der konstante Abstand die Homogenität der Schichtdicken. Die Paketschichtdicke von Quantentopf und Barriere weicht zwischen dem Zentrum des Wafers (links) und dem Randbereich (rechts) nur um 1,4 nm ab.

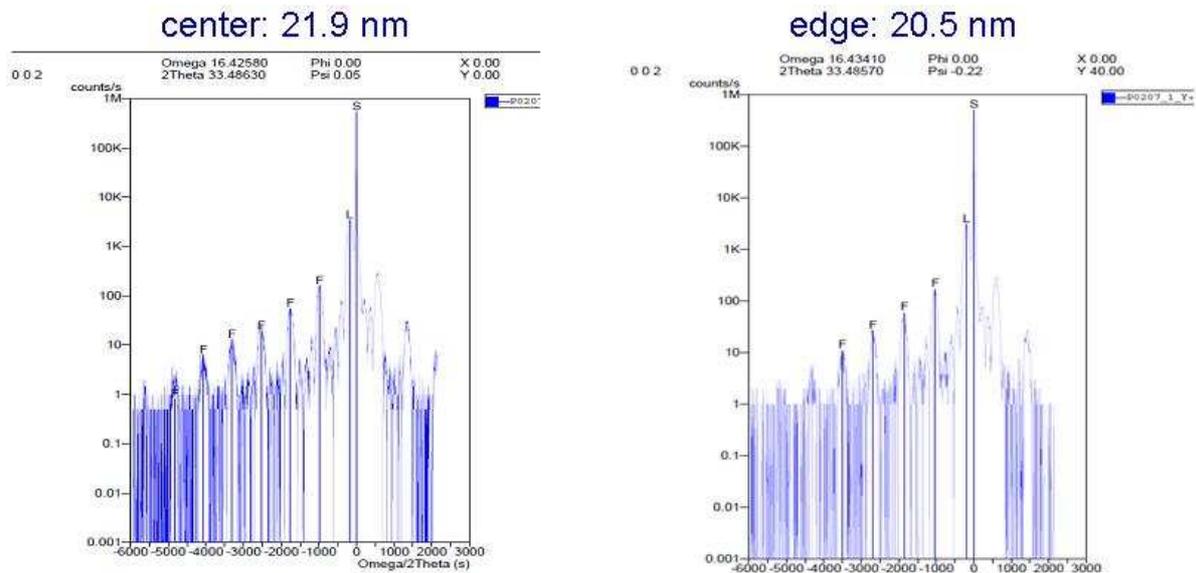


Abbildung 21: XRD des 002 Reflexes an LED Teststrukturen – links in der Wafermitte, rechts im Randbereich.

Parallel zur Anpassung der Basisprozesse an die 14x100 mm Konfiguration in dem neuen Reaktor, wurden in einem älteren Modell erste Erfahrungen mit der Abscheidung auf 100 mm Si Substraten gesammelt. Die ersten Testreihen beschäftigten sich mit der Substratpräparation und den Startbedingungen für das Wachstum auf Si. Zum Ausgleich der stark unterschiedlichen Gitterkonstanten und Wärmeausdehnungskonstanten zwischen Si und GaN müssen für die Abscheidung von qualitativ hochwertigen GaN Schichten mehr oder weniger komplexe Pufferstrukturen hergestellt werden. Im einfachsten Fall startet man mit einer AlN Nukleation und wächst dann mehrere AlGaIn Schichten mit abnehmendem Al-Gehalt hin zum binären GaN. Abbildung 22 zeigt die von uns verwendete Struktur, Abbildung 23 die In-Situ Reflexionen, die an 8 Wafern aus einem Experiment mit optimierten Prozessparametern gemessen wurden. An der Form der Reflektionskurven und der sehr guten Überlagerung der 8 Messungen kann man ablesen, dass das Material mit guter Qualität und guter Homogenität über die 8 Wafer gewachsen ist. Die Schichten waren nach der Abscheidung spiegelnd und hatten eine Standardabweichung bezüglich der Schichtdicke von nur 1,2 % bei einem Randausschluss von 3 mm.

800-1100 nm GaN
300-500 nm AlGa _N (~26%)
250-450 nm AlGa _N (~ 50%)
300 nm AlN
Si(111)

Abbildung 22: Verwendete Pufferstruktur für das GaN Wachstum auf Si-Substraten.

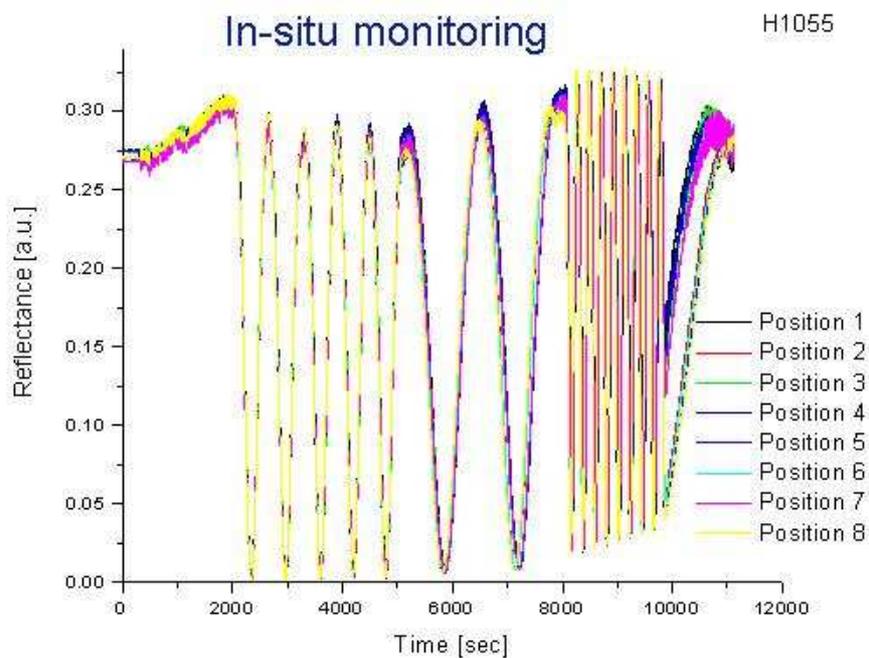


Abbildung 23: In-Situ Reflexion als Funktion der Wachstumszeit von 8 100 mm Wafern während des gleichen Experiments. Die Abscheidung erfolgte mit optimierten Prozessparametern.

Nach der Anpassung der Basisprozesse ging es vor allem um das Wachstum unter Produktionsbedingungen. Es wurde zum Beispiel undotiertes GaN in mehreren aufeinander folgenden Experimenten in voll beladenen Reaktoren abgeschieden. Die Experimente haben sowohl eine sehr gute Schichtdickenhomogenität über alle 14 Wafer der jeweiligen Experimente gezeigt als auch eine sehr gute Reproduzierbarkeit von Experiment zu Experiment.

Des Weiteren wurden auch Wachstumsprozesse für das neue Material AlInN entwickelt. Erste Versuche wurden in einem 3x2 Zoll Close Coupled Showerhead (CCS) Reaktor auf GaN-Saphir-Templaten durchgeführt. Die Daten aus diesen Experimenten sind in die Modellentwicklung in AP-AIX 2 eingeflossen. In einem zweiten Schritt wurde dann der Prozess auf 150 mm Si Substrate übertragen. Da die Zusammensetzung der AlInN Schichten mittels Röntgenbeugung bestimmt werden sollte, wurde eine vereinfachte GaN Pufferstruktur auf dem Si Substrat verwendet. Die sonst üblichen AlGaN Zwischenschichten mit unterschiedlichen Al-Anteilen wurden weggelassen, da diese Schichten in der Röntgenbeugung die AlInN Signale überlagert hätten. Abbildung 24 zeigt als Beispiel den ermittelten In-Einbau in die Schichten als Funktion der Wachstumstemperatur. Wie vom InGaN bekannt wird mit reduzierter Wachstumstemperatur mehr Indium eingebaut. Da der Relaxationsgrad der ca. 70 nm dicken AlInN Schichten nicht bekannt war, wurde der In-Gehalt einmal für die Annahme einer zu 100% relaxierten Schicht und einmal für eine gar nicht relaxierte Schicht ermittelt. In dem Graphen erkennt man außerdem einen Gradienten in der Zusammensetzung vom Zentrum hin zum Rand. Ursache hierfür ist ein relativ großer Temperaturgradient über den Wafer. Aufgrund der einfachen Pufferstruktur kommt es zu einer relativ starken Verbiegung des Substrats während der Abscheidung. Damit verliert ein Teil des Substrates den direkten Kontakt zum Substarteller, was wiederum zu einer thermischen Entkopplung führt. Mit einer optimierten Pufferstruktur kann die Substratverbiegung und damit der Temperaturgradient entscheidend reduziert werden.

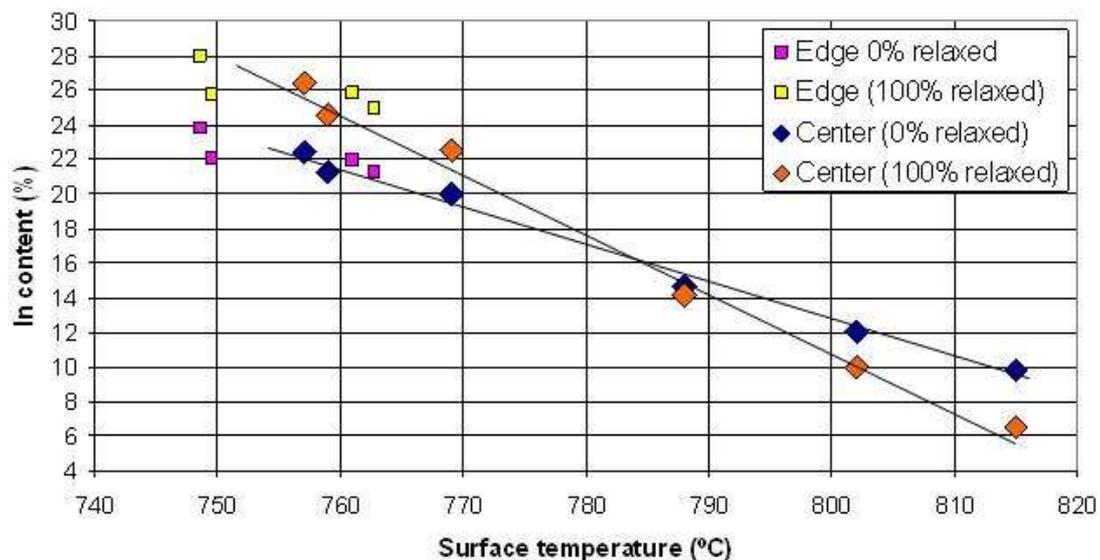


Abbildung 24: In-Gehalt als Funktion der Wachstumstemperatur am Rand (Edge) und im Zentrum (Center) des Wafers.

Nach der Realisierung der ersten AlGaIn/GaN HEMT Strukturen auf 100 mm Si Substraten wurde mit der Basisprozessentwicklung auf 150 mm Substraten begonnen. Als Grundlage für die Experimente auf 150 mm Si Substraten wurde zunächst das GaN Pufferwachstum auf

Saphir bezüglich maximal möglicher Wachstumsraten optimiert. Aufgrund der sehr großen Gitterfehlpassung zwischen GaN und Si sind auf Si Substraten in der Regel sehr viel dickere Pufferstrukturen notwendig als auf Saphir. Deswegen kommt hier der Wachstumsrate eine besondere Bedeutung zu. Für Reaktordrücke zwischen 200 mbar und 800 mbar wurde die Wachstumsrate anhand des Ga-Angebots variiert. Bei 200 mbar konnte eine Wachstumsrate vom maximal 31 $\mu\text{m/h}$ erreicht werden. Der beste Kompromiss aus hoher Rate und abgeschiedener Materialqualität wurde mit 5,6 $\mu\text{m/h}$ bei 600 mbar erzielt.

AP-AIX6 Prozessentwicklung für GaN/AlGaN HEMT Strukturen auf 150/200 mm Si im Planetenreaktor

Das Ziel von AP-AIX6 war die Prozessentwicklung für GaN/AlGaN HEMT Strukturen auf 150 und 200 mm Si Substraten in einem Planetenreaktor. Essentiell für gute Transistoreigenschaften ist die Realisierung eines hochohmigen Puffers auf Si und die Optimierung der GaN-AlGaN Grenzflächen. Mit den Arbeiten zu AP-AIX 6 wurde auf den Ergebnissen aus AP-AIX 5 aufgebaut. Zunächst wurden die gleichen HEMT Strukturen, die schon auf den 100 mm Si Substraten realisiert wurden, auf die 150 mm Substrate übertragen. Die strukturellen Eigenschaften der ersten Schichten waren vergleichbar mit denen auf den kleineren Substraten. Mittels PL Mapping wurde die Zusammensetzung und Homogenität der AlGaN Barrierenschicht bestimmt. Der mittlere Al-Gehalt lag bei 25,7%, die Standardabweichung bei nur 0,44%.

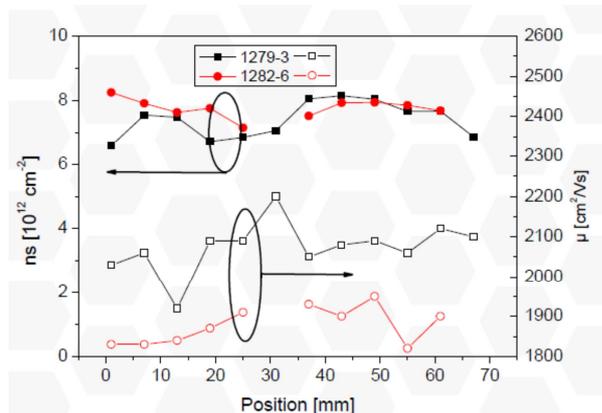


Abbildung 25a: Schichtladungsträgerkonzentration (n_s) und Hall-Beweglichkeit (μ) von GaN/AlGaN HEMT Strukturen auf 150 mm Si Substraten als Funktion der Position auf dem Wafer.

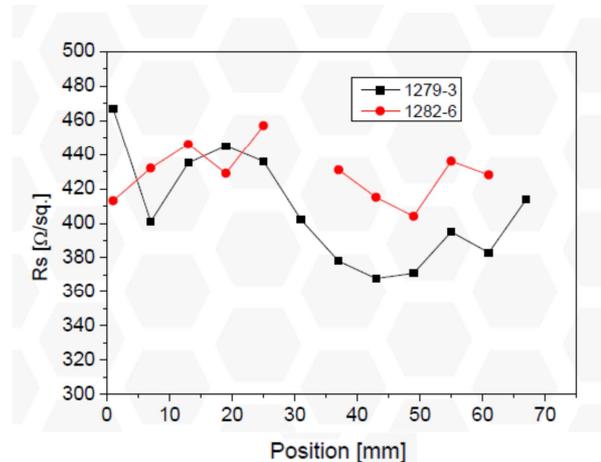


Abbildung 25b: Schichtwiderstand von GaN/AlGaN HEMT Strukturen auf 150 mm Si Substraten als Funktion der Position auf dem Wafer.

Exemplarisch sind in Abbildung 25 die elektrischen Eigenschaften von 2 verschiedenen HEMT Strukturen dargestellt. Der linke Graph zeigt die Schichtladungsträgerkonzentration (n_s) und die Hall-Beweglichkeit (μ) als Funktion der Position auf dem Wafer, die rechte Abbildung den entsprechenden Schichtwiderstand. Die mittleren n_s -Werte der beiden Proben von $7,39 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ und $7,76 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ liegen schon nah an den in Meilenstein M7.7 spezifizierten $> 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Die Beweglichkeiten liegen mit $2074 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ und $1878 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, auch aufgrund der geringeren Ladungsträgerdichte, deutlich über dem Zielwert von $1600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. In der Auftragung des Schichtwiderstands wird deutlich, dass die Homogenität der elektrischen Materialeigenschaften noch Potential für Verbesserungen hatte.

Im Projektverlauf wurde eine Vielzahl von Experimenten durchgeführt, mit denen die HEMT-Struktur, der Wachstumsprozess und das Reaktordesign optimiert werden sollten. Abbildung 26 zeigt auf der linken Seite die Standard-HEMT-Struktur, wie sie am Anfang verwendet wurde. Im Folgenden wird beispielhaft gezeigt, wie sich die elektrischen Eigenschaften der Pufferstruktur verändern, wenn die GaN-Schicht unter wechselnden Bedingungen und mit variabler Schichtdicke abgeschieden wird. Die Tabelle auf der rechten Seite von Abbildung 26 gibt die einzelnen Parameter an, die variiert wurden.

GaN cap 3 nm
25%AlGaIn Barrier 20 nm
AlN 1 nm
GaN 1.5 μm
AlGaIn3 400 nm around 25% Al
AlGaIn2 200 nm around 50% Al
AlGaIn1 125 nm around 70% Al
High temp AlN 100 nm
Low temp AlN 30 nm
Si (111)

	GaN buffer thickness		
	~1.9 μm	~2.4 μm	~2.8 μm
standard GR	A_1	D_1	E_1
standard GR, different satellite design	A_4		
high GR (~2.0 $\mu\text{m}/\text{hr}$)	B_3		
high GR, low GaN buffer pressure (50 mbar)	C_3		

Abbildung 26: Links: Standard-HEMT-Struktur, wie sie bei AIXTRON für die Hardware und Prozessqualifikation verwendet wurde. Zur Optimierung der elektrischen Puffereigenschaften wurden Prozessbedingungen und Dicke der GaN Pufferschicht variiert – Tabelle rechts. GR steht für Wachstumsrate.

Für die Proben A_1, D_1 und E_1 wurde die Dicke der GaN-Schicht von ursprünglich 1,5 μm auf 1,9 μm , 2,4 μm und 2,8 μm erhöht. Probe A_4 wurde im gleichen Experiment wie Probe

A_1 abgeschieden, aber mit einem veränderten Substratteller. Bei Probe B_3 wurde die Wachstumsrate für die GaN Schicht erhöht, bei Probe C_3 sowohl die Wachstumsrate erhöht als auch der Prozessdruck reduziert.

Alle Proben wurden hinsichtlich der elektrischen Puffereigenschaften untersucht. Dazu wurden Leitfähigkeitsmessungen und Messungen der Durchbruchspannung an isolierten Bauelementstrukturen durchgeführt.

Zur Bestimmung der Widerstandswerte des Puffers wurde zwischen zwei isolierten Transistorstrukturen der Leckstrom bei 40 V und bei 100 V gemessen. Die Transistorstrukturen hatten auf dem Wafer einen Abstand von 6 μm . Abbildung 27 zeigt die Leckströme, die bei 40 V auf den einzelnen Wafern gemessen wurden sowie den Vergleich zu einer kommerziellen Probe, die unter den gleichen Bedingungen prozessiert wurde. Man sieht, dass die beiden Proben mit dickerem GaN Puffer wesentlich höhere Leckströme aufweisen als die restlichen Proben mit 1,9 μm dickem Puffer. Auch die strukturellen Eigenschaften dieser Proben waren wesentlich schlechter. Während die „dünnen“ Proben nur in einem sehr schmalen Randbereich, für das Wachstum auf Si, typische Risse aufweisen, nimmt die Rissbildung mit steigender GaN Schichtdicke stark zu.

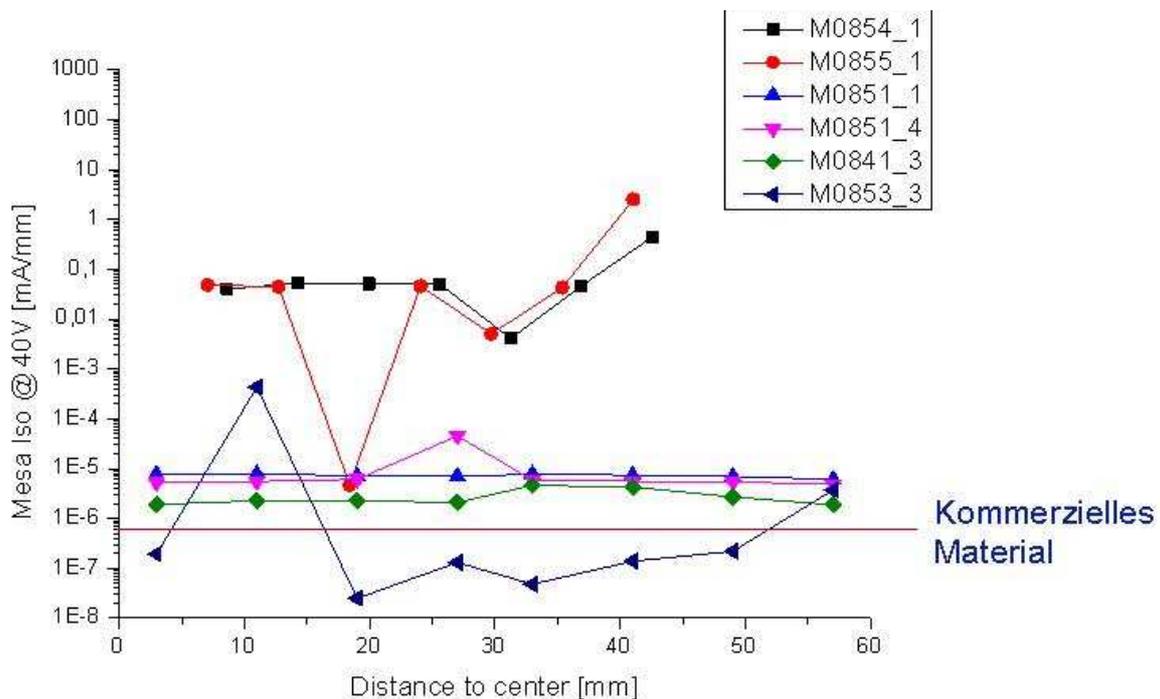


Abbildung 27: Leckströme zwischen zwei isolierten Transistoren als Funktion der Position auf dem 150 mm Substrat. Der Abstand zwischen den Transistoren betrug 6 μm . Die rote Linie gibt den Vergleichwert für kommerzielles Material an, das auf die gleiche Weise prozessiert wurde.

Die dünneren Strukturen zeigen dagegen relativ niedrige Leckströme. Die beste Probe, mit dem GaN Wachstum bei niedrigem Druck und mit hoher Rate, liegt sogar deutlich unterhalb der kommerziellen Referenz.

Die zweite wichtige Kenngröße für den Puffer ist die Durchbruchspannung. Hier wurde sowohl die laterale als auch die vertikale Durchbruchspannung gemessen. In Tabelle 2 werden die jeweiligen Werte der hier untersuchten Proben mit älteren Serien und der kommerziellen Referenz verglichen. Die „J“ Proben entsprechen der Standard-HEMT-Struktur wurden aber in einem anderen Reaktor abgeschieden, die „M“ Proben sind Standard HEMTs aus dem „Neuland“ Reaktor aber mit Variationen in Hardware und Prozessführung. Die Tabelle zeigt zum einen, dass mit optimalen Parametern hochohmige Puffer, mit Werten im Bereich der kommerziellen Referenz, demonstriert wurden und damit M7.6 erfüllt wurde. Sie zeigt aber auch, dass eine sehr exakte Abstimmung von Struktur, Prozess und Reaktordesign notwendig ist um entsprechend gute Resultate zu erzielen.

Tabelle 2: Laterale und vertikale Durchbruchspannungen für die hier untersuchten Proben A,B,C, D. Zum Vergleich werden auch die Werte älterer Versuchsserien und der kommerziellen Referenz gezeigt.

Wafer	Lateral Breakdown Field [V/ μm]	Vertical Breakdown Field [MV/cm]	assumed sheet thickness (Vertical Breakdown) [μm]
kommerzielles Material	45,00	3,50	2
J1	34,00	3,50	2
J2	39,00	3,80	2
J3	28,00	3,20	2
M1	41,54	2,02	2
M2	25,71	1,95	2
M3	12,34	2,3	2
Hohe Rate → B_3	41,39	2,8	2,8
A_1	24,43	1,89	2,8
Hohe Rate UND geringer Druck → A_4	29,54	1,82	2,8
C_3	47,31	2,7	2,8
D_1	36,69	1,83	3,3
E_1	16,92	1,39	3,7

Zudem war die maximale Dicke der Strukturen mit „Standardpuffer“ (Abbildung 28) noch relativ begrenzt. Wie oben beschrieben konnten mit 1,9 μm dicken GaN Schichten in der

Pufferstruktur noch rissfreie HEMTs hergestellt werden, mit zunehmender GaN-Schichtdicke von 1,9 μm über 2,4 μm auf 2,8 μm kam es im Randbereich der Proben aber zu massiver Rissbildung und zu einer drastischen Verschlechterung der Durchbruchspannungen. Da die absoluten Durchbruchfeldstärken der späteren Transistoren aber von der Gesamtpufferdicke abhängen, wurde versucht, die Strukturen unter Beibehaltung der guten strukturellen und elektrischen Eigenschaften der dünnen Puffer, dicker zu machen. Das Ergebnis ist in Abbildung 28 zu sehen. Die linke Seite der Abbildung zeigt nochmal die Ausgangsstruktur, wie sie als Standardstruktur auf 100 mm und 150 mm Si Substraten verwendet wurde (Probe D_1 mit einer 2,4 μm dicken GaN Schicht). Das Candela Bild unter der Struktur zeigt die Rissbildung im Randbereich des Wafers. Das rechte Candela Bild der optimierten Struktur weist dagegen keine Risse mehr auf. Der Hauptunterschied in den beiden Strukturen liegt darin, dass in dem optimierten Aufbau die dicke GaN Schicht durch dünne AlN-Zwischenschichten unterbrochen wird.

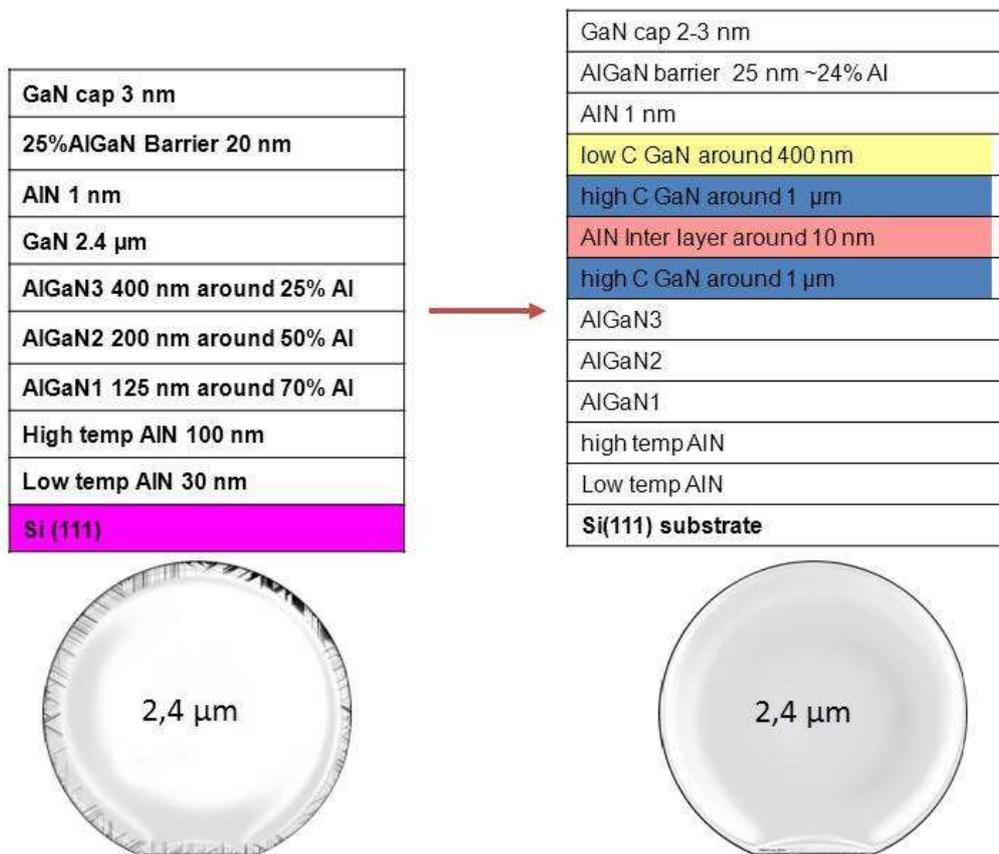


Abbildung 28: Schematischer Schichtaufbau und Candela Bild für "Standardpuffer" auf Si (links) und für einen auf größere Schichtdicken optimierten Puffer mit AlN Zwischenschichten. Der GaN Kernbereich der Pufferstrukturen hat eine Dicke von 2,4 μm , die Gesamtdicke der HEMT Strukturen beträgt ca. 3,4 μm .

Die Wafer mit den neuen Pufferstrukturen wurden hinsichtlich der elektrischen Puffereigenschaften mit dem gleichen, oben beschriebenen, Verfahren untersucht.

Abbildung 27 zeigt zum Vergleich die Leckströme der alten (links) und der neuen Strukturen (rechts). Der linke Teil des Graphen zeigt den Leckstrom als Funktion der Position auf dem Wafer. Der Graph entspricht der Abbildung 27 und wurde weiter oben besprochen. Die beiden Proben mit dickerem GaN Puffer (rote und schwarze Kurve) hatten wesentlich höhere Leckströme aufgewiesen als die restlichen Proben mit 1,9 μm dicken GaN-Pufferschichten. Der rechte Teil des Graphen zeigt die Leckströme von fünf Wafern (M1-M3, Q1, Q2) die mit verschiedenen Variationen in der neuen Pufferstruktur abgeschieden wurden. In allen fünf Proben hat das GaN im Puffer eine Dicke von ca. 2,4 μm . Die verschiedenen Messpunkte eines Wafers wurden an unterschiedlichen Positionen auf dem Weg von der Mitte zum Rand aufgenommen. Man erkennt, dass, mit Ausnahme von M3, die Leckströme für die dicken Strukturen in derselben Größenordnung liegen wie bei den besten dünnen Standardstrukturen und wie bei der kommerziellen Referenz.

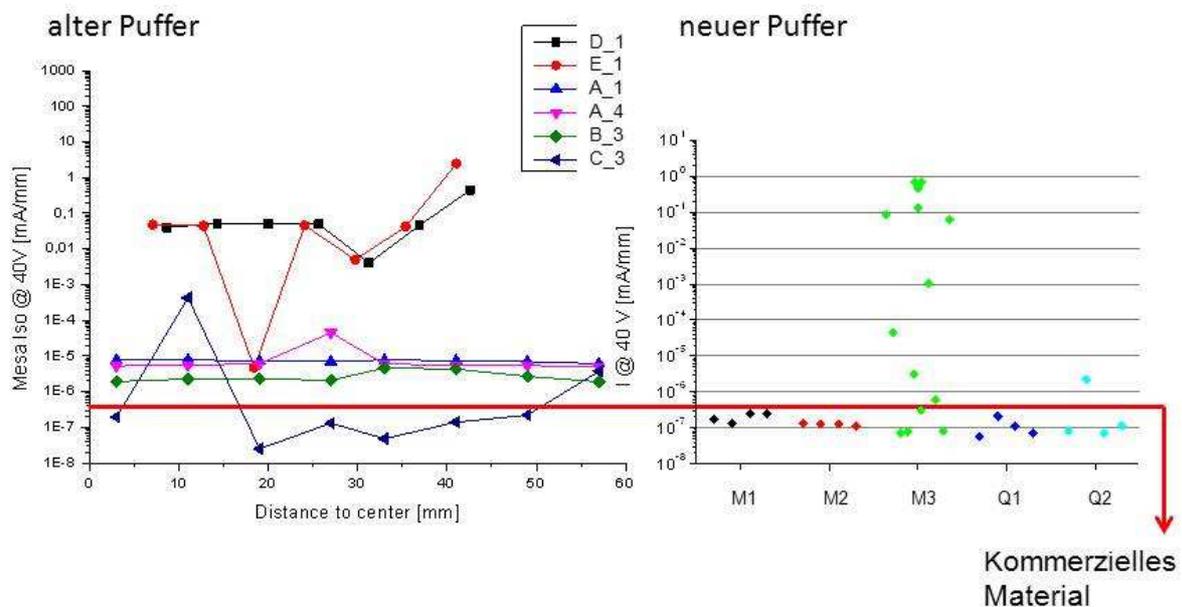


Abbildung 29: Leckströme zwischen zwei isolierten Transistoren mit Standardpuffer als Funktion der Position auf dem 150 mm Substrat (links) und für fünf verschiedene dickenoptimierte Pufferstrukturen (rechts). Der Abstand zwischen den Transistoren betrug 6 μm . Die rote Linie gibt den Vergleichwert für kommerzielles Material an, das auf die gleiche Weise prozessiert wurde.

In Tabelle 3 wurden die jeweiligen Werte für die laterale und vertikale Durchbruchspannung der neuen Proben ergänzt, um sie mit den älteren Serien und der kommerziellen Referenz aus Tabelle 2 zu vergleichen. Die Tabelle zeigt, dass mit optimalen Parametern auch mit den dicken Strukturen hochohmige Puffer, mit Werten im Bereich der kommerziellen Referenz, demonstriert wurden und damit M7.6 auch für die dicken Strukturen erfüllt wurde.

Tabelle 3: Laterale und vertikale Durchbruchspannungen der GaN/AlGaN HEMTs auf 150 mm Si Substraten. Zum Vergleich werden auch die Werte älterer Versuchsserien und der kommerziellen Referenz gezeigt.

Wafer	Lateral Breakdown Field [V/ μm]	Vertical Breakdown Field [MV/cm]	assumed sheet thickness: (Vertical Breakdown) [μm]
kommerzielles Material	45,00	3,50	2
J1	34,00	3,50	2
J2	39,00	3,80	2
J3	28,00	3,20	2
N1	41,54	2,02	2
N2	25,71	1,95	2
N3	12,34	2,3	2
B_3	41,39	2,8	2,8
A_1	24,43	1,89	2,8
A_4	29,54	1,82	2,8
C_3	47,31	2,7	2,8
D_1	36,69	1,83	3,3
E_1	16,92	1,39	3,7
M1	34,08	1,87	3,4
M2	5,03	1,71	3,4
M3	30,41	2,27	3,4
Q2	45,93	2,7	3,4

Referenz

Im Rahmen der Pufferoptimierung wurde auch Meilenstein M7.7 „HEMT Struktur auf 2“ (100 mm) Si mit $n > 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ und $\mu \sim 1600 \text{ Vs/cm}^2$ erfüllt – allerdings auf 150 mm Si Substraten. Auf dem 5. Statustreffen wurden beispielhaft die positionsabhängigen Messwerte von einer AlGaN/GaN HEMT Struktur auf einem 150 mm Si Wafer vorgestellt. Die mittlere Elektronenbeweglichkeit lag bei $1700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, die Ladungsträgerkonzentration bei $1,2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

Parallel zur Pufferoptimierung auf 150 mm Si Substraten wurde im letzten Projektabschnitt mit der Prozessentwicklung mit der neuen 5x200 mm Konfiguration begonnen. Hier wurde zunächst der Prozess für die dünneren Standard AlGaN/GaN HEMT Strukturen von der 8x150 mm Konfiguration übertragen. Mit dem neuen Fünffachinjektor und optimierten Wachstumsparametern konnten in Bezug auf strukturelle und optische Eigenschaften sehr homogene Wafer demonstriert werden. Abbildung 30 zeigt beispielhaft ein Photolumineszenz-Mapping über alle fünf 200 mm Wafer eines voll bestückten

Wachstumsexperiments. Der mittlere Al-Gehalt in der AlGaN Barriere lag bei 21,5% bei einer absoluten Standardabweichung von nur 1,3%.

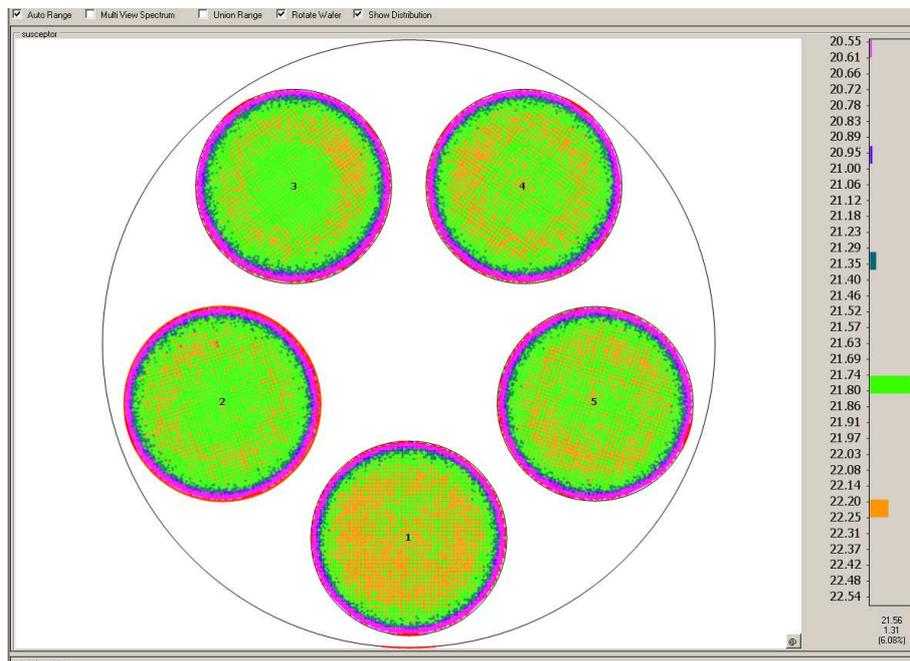


Abbildung 30: Photolumineszenz-Mapping an Standard AlGaN HEMT Strukturen auf Si. Die Wafer stammen alle aus einem voll bestückten Wachstumsexperiment mit der neuen 5x200 mm Konfiguration. Der mittlere Al-Gehalt in der AlGaN Barriere lag bei 21,5% bei einer absoluten Standardabweichung von nur 1,3%.

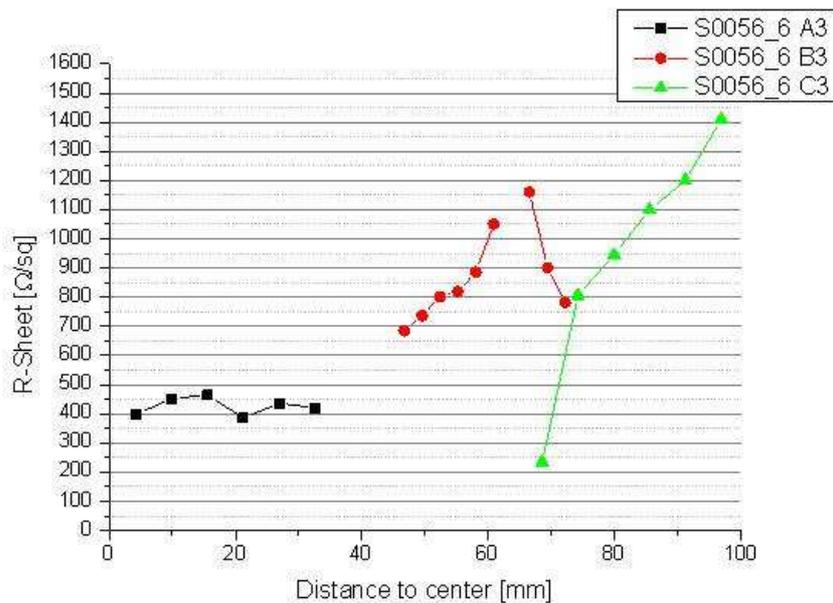


Abbildung 31: Schichtwiderstand eines AlGaN Standard HEMTs auf 200 mm Si Substrat als Funktion der Position auf dem Wafer.

Bis zum Abschluss des Projektes wurde aber nur einer der Wafer elektrisch vermessen. Wie man in Abbildung 31 sieht, besteht hier in Bezug auf die Homogenität noch Optimierungspotential. Der Graph zeigt den Schichtwiderstand als Funktion der Position auf dem Wafer. Während im Waferzentrum mit $425 \Omega/$ Werte im Bereich der HEMT Strukturen auf 150 mm Si gemessen wurden, steigt dieser zum Waferrand hin stark an. Die Ursache hierfür wird zurzeit noch untersucht. Die korrespondierenden Messwerte für Ladungsträgerkonzentration und –beweglichkeit im Waferzentrum liegen mit $n_s = 7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ und $\mu = 2150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ auch im Bereich der Referenzproben auf 150 mm Si Substraten.

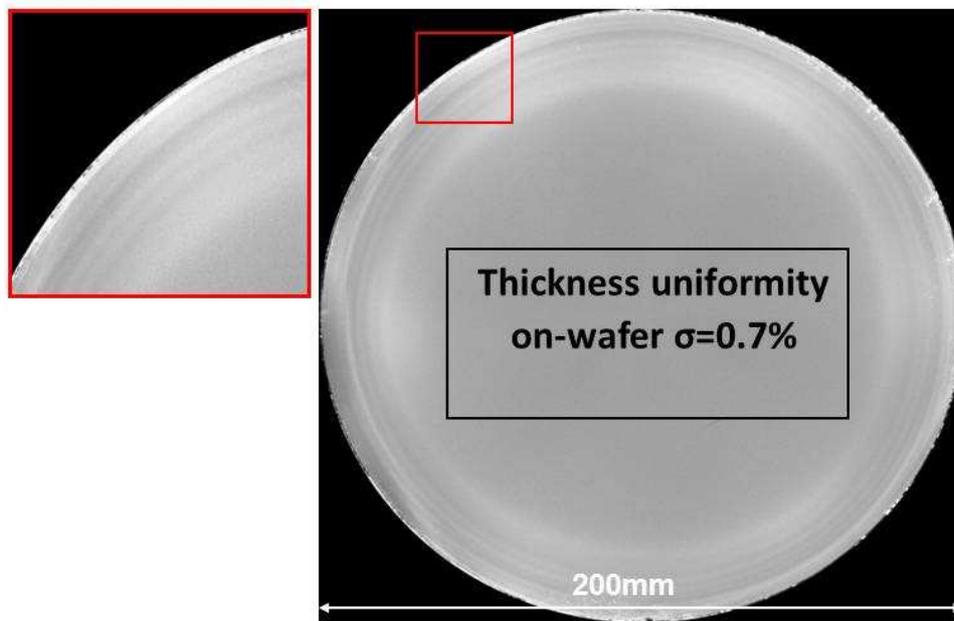


Abbildung 32: Candela Bild einer 6 μm dicken Pufferstruktur auf einem 1,15 mm dicken 200 mm Si Substrat.

Aufbauend auf der Pufferentwicklung auf den 150 mm Si Substraten wurde auch auf den 200 mm Substraten mit der Optimierung von dicken Pufferschichten begonnen. Abbildung 32 zeigt das Candela Bild einer 6 μm dicken Pufferstruktur auf einem 1,15 mm dicken 200 mm Si Substrat. Trotz der großen Schichtdicke sind nur im absoluten Randbereich des Wafers kleinere Risse zu erkennen. In der auch nach Projektende fortlaufenden Entwicklung werden mit den optimierten Puffern komplette HEMT Strukturen abgeschieden werden.

AP-AIX 7 Korrelation externer Prozessdaten mit Showerhead-Anlagendesign

Dieses Arbeitspaket konnte nicht in der ursprünglich geplanten Form durchgeführt werden, da AZZURRO MOCVD Anlagen der US Firma VECCO gekauft hat, die der wesentliche

Konkurrent von AIXTON auf dem Weltmarkt ist. Neben relevanten eigenen Prozessenerfahrungen mit einem 3x2 Zoll R&D Showerhead Reaktor, konnten bis zu einem gewissen Grad aber auch externe Prozessdaten aus einem europäischen Forschungsprojekt ausgewertet werden. Durch den Wegfall der engen Kooperation mit AZZURRO hat sich der Arbeitsaufwand in AP-AIX8, Prozessentwicklung im Showerhead Reaktor auf 200/300 mm erhöht. Es haben sich für das Gesamtprojekt aber keine gravierenden negativen Folgen ergeben.

AP-AIX 8: Prozessentwicklung GaN/AlGaN auf Si im Showerhead Reaktor auf 200/300 mm

Die Ziele in AP-AIX 8 entsprechen denen von AP-AIX 6 aber in einem Showerhead Reaktor auf 200 mm Si-Substraten und ggf. auch versuchsweise auf 300 mm. Voraussetzung ist auch hier wieder erst mal die Suszeptorentwicklung. Wie schon unter AP-AIX 1 angekündigt, wird im Folgenden exemplarisch die simulationsgestützte Suszeptorentwicklung für 200 mm Si-Substrate beschrieben. Die meisten der hier gezeigten Ergebnisse für den 1x200 mm Showerhead Reaktor sind auf die Beschaffenheit der Satelliten für 200 mm Substrate im 5x200 mm Pflanzenreaktor übertragbar.

Es wurde schon mehrfach ausgeführt, dass sich beim Wachstum von GaN-basierenden Materialien auf großen Si-Substraten ein Verbiegen der Substrate während des Prozesses nicht vermeiden lässt und dass dies einen negativen Einfluss auf die Temperaturhomogenität an der Substratoberfläche hat. Bei den kleineren Substratdurchmessern waren die Radien der Verbiegung relativ gering und durch eine Ausformung der Substrattaschen mit einem konstantem Radius beherrschbar. Bei den 200 mm Substraten sind die entstehenden Radien zum einen natürlich größer, zum anderen haben kleine Effekte beim Wachstum eine größere Auswirkung auf die Verbiegung. Das führt dazu, dass die Verbiegung der großen Substrate nicht so exakt vorhergesagt werden kann, wie bei den kleineren und deswegen mit Substrattaschen mit konstantem Radius nur relativ schlechte Ergebnisse erzielt werden konnten. Aus Vorversuchen zur Abscheidung von GaAs auf großen Si Substraten war schon bekannt, dass man das Problem dadurch minimieren kann, dass man die Substrate nur auf einem äußeren Ring auflegt (Abbildung 33 oben links). Durch die Auflage nur im Randbereich besteht von vornherein ein gewisser Spalt zwischen Substrat und Substrattasche, der die Verbiegung des Substrats aufnehmen kann. Der Spalt muss dabei so groß sein, dass das Substrat selbst im Stadium der größten Verbiegung die Substrattasche nicht berührt. Im Fall einer Berührung würde lokal ein sehr großer Wärmeübertrag stattfinden wodurch im schlimmsten Fall das Substrat zerspringen würde. Es muss also ein Kompromiss gefunden werden, zwischen möglichst tiefer Tasche, um solch

einen Kontakt zu verhindern und einem möglichst geringen Spalt um die Heizung des Substrats durch den Abstand zum Suszeptor so wenig wie möglich zu beeinflussen. Die wesentlich höheren Temperaturen bei der Abscheidung von GaN, im Vergleich zum GaAs, machen das Design der Substrattaschen für GaN-Prozesse sehr viel schwieriger.

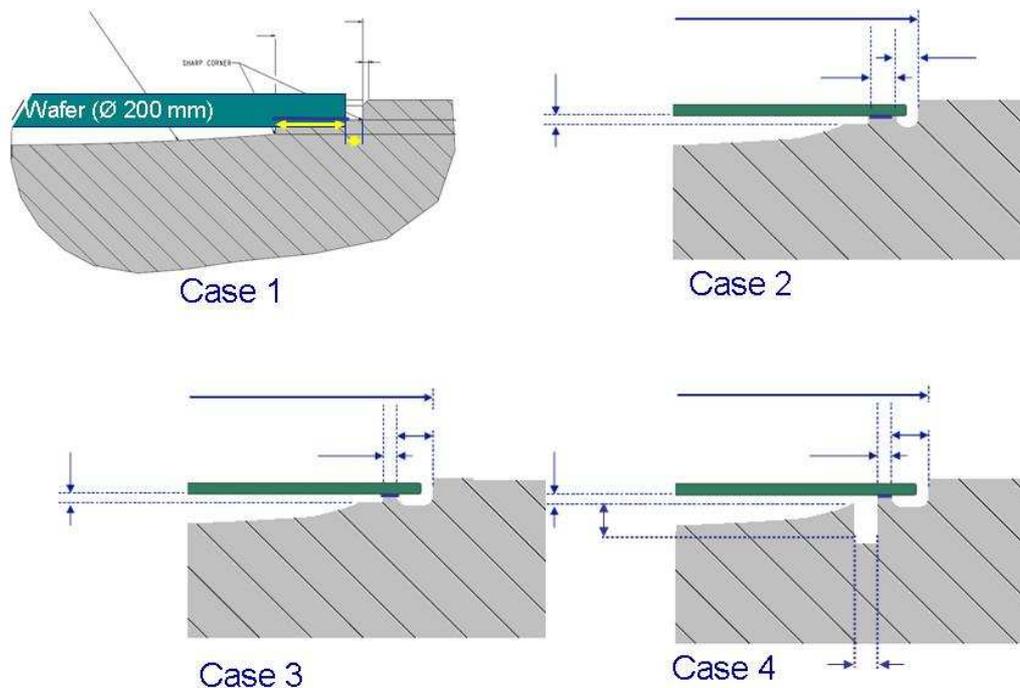


Abbildung 33: Vier verschiedene Designvarianten für die Substrattaschen des 200 mm Suszeptors für die Showerhead Anlage. Durch die sukzessive Reduktion der Auflagefläche sollte der Wärmeübertrag im Randbereich der Substrate reduziert werden.

Mit Hilfe von numerischen Simulationen wurde das Substrattaschendesign optimiert. Abbildung 33 zeigt beispielhaft 4 verschiedene Designvarianten für die Substrattaschen. Bei der 1. Variante oben links handelt es sich in etwa um die Version wie sie für die GaAs Abscheidung auf 200 mm Si verwendet wurde. Hier liegt das Substrat auf einem relativ breiten Ring im Randbereich auf. Der Taschenboden weist eine gewisse Krümmung auf. Zusätzlich besteht ein weiterer Spalt zwischen Substratrand und dem Rand der Substrattasche, der auch eine seitliche Ausdehnung des Substrats erlaubt. Wie später noch gezeigt wird, führt die breite Auflage bei den hohen GaN-Wachstumstemperaturen zu einer sehr starken Temperaturerhöhung in diesem Bereich. Deswegen wurde mit den weiteren Designvarianten versucht, den Temperaturübertrag im Randbereich der Substrate zu reduzieren. Bei der 2. Variante, Abbildung 33 oben rechts, wurde durch die beidseitige Wegnahme von Material ein schmaleres Auflagegesteg geschaffen, bei Variante 3 wurde die Stegbreite noch weiter reduziert (Abbildung 33 unten links) und beim 4. Design wurde auf

Basis von Variante 3 ein zusätzlicher Graben vor dem Steg zur weiteren Temperaturentkopplung eingelassen.

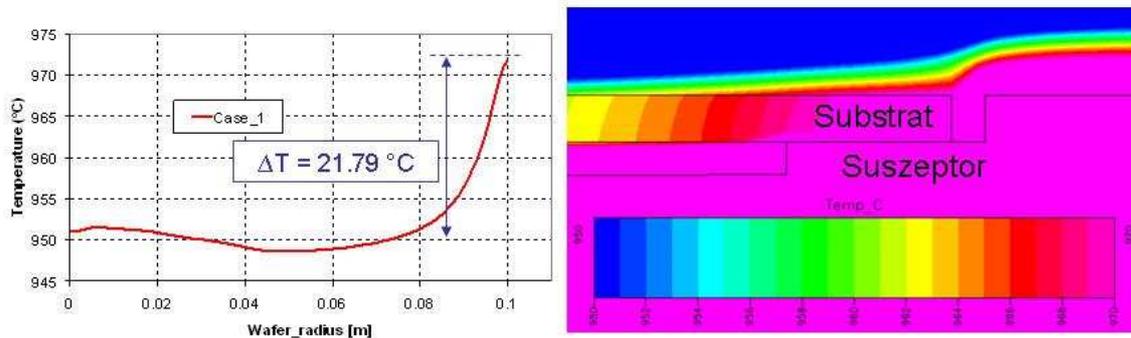


Abbildung 34: Auf der linken Seite ist für Designvariante 1 der Temperaturverlauf auf dem Substrat als Funktion der Position, von der Substratmitte aus, dargestellt. Die Farbdarstellung rechts zeigt den Temperaturübertrag vom Suszeptor in das Substrat im Randbereich.

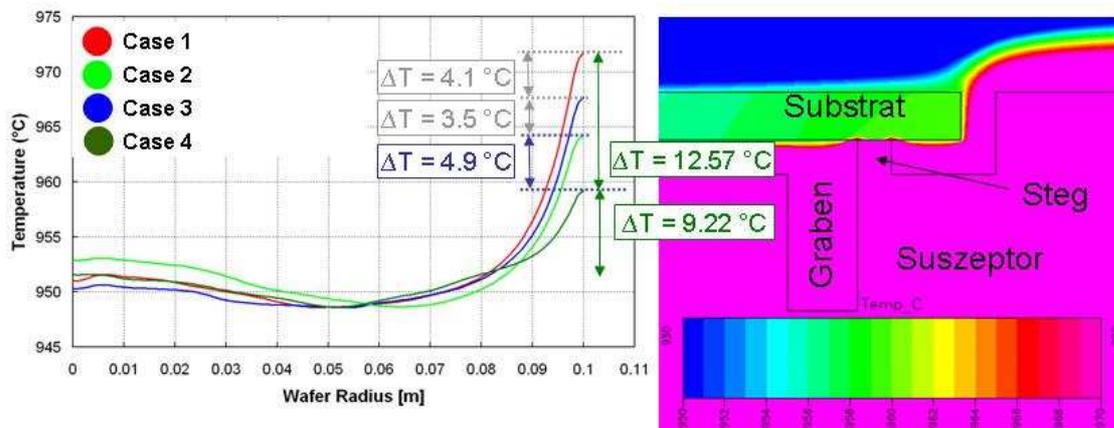


Abbildung 35: Auf der linken Seite ist für die Designvarianten 1-4 der Temperaturverlauf auf dem Substrat als Funktion der Position, von der Substratmitte aus, dargestellt. Die Farbdarstellung rechts zeigt den Temperaturübertrag vom Suszeptor in das Substrat im Randbereich für Variante 4.

In Abbildung 34 sieht man die schon erwähnte starke Temperaturerhöhung im Randbereich für die erste Designvariante. Links ist der Temperaturverlauf als Funktion der Position auf dem Substrat zu sehen. Die „0“ entspricht der Substratmitte. Im Randbereich hat man einen Temperaturanstieg von fast 22 °C, was für jeden Prozess ein Ausschlusskriterium ist. Der starke Temperaturanstieg wird auch in der Farbdarstellung auf der rechten Seite von Abbildung 34 deutlich. Hier sieht man, dass über die gesamte Auflagefläche die sehr hohe Suszeptortemperatur in das Substrat übertragen wird. Im Gegensatz dazu sieht man in Abbildung 35, dass im 4. Fall, mit dem schmalstem Auflagesteg und dem zusätzlichen Graben, ein sehr homogener Temperaturübertrag vom Suszeptor auf das Substrat stattfindet. Der Temperaturverlauf im linken Bereich der Abbildung zeigt, dass mit dieser letzten Variante nur noch ein Temperaturanstieg von 9 °C im Randbereich auftritt. In den gleichen Graphen wurden zum Vergleich auch die sukzessiven Verbesserungen aufgenommen, die mit den Designvarianten 2 und 3 erzielt wurden.

In einer weiteren Designserie wurde die Krümmung der Substrattaschen optimiert. Da für die Simulationen ein ebenes Substrat angenommen wurde, nahm die Temperaturinhomogenität auf dem Substrat mit steigender Krümmung der Substarttasche zu. Das beste Ergebnis wurde mit einer ebenfalls ebenen Tasche erzielt. Da sich das Substrat während des Prozesses aber in jedem Fall Krümmen wird, wurde für die erste zu realisierende Designvariante ein mittlerer Radius als Kompromiss gewählt.

Viele der Ergebnisse die hier für die Suszeptorentwicklung erzielt wurden konnten für die Optimierung der 5x200 mm Konfiguration des Planetenreaktors übernommen werden. In Bezug auf die weiterführende Prozessentwicklung, hin zum optimierten Bauelement, wurde im Rahmen von Neuland der Fokus aber komplett auf den Planetenreaktor verschoben, da hier das größere Interesse der industriellen Projektpartner lag. Die Prozessentwicklung im Showerheadreaktor wurde außerhalb des Projektes fortgeführt.

AP-AIX 9: Studie neue Anlagenkonzepte

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung von Anlagenkonzepten für die Steigerung der Effizienz und die Senkung der Prozesskosten für reproduzierbare Produktionsprozesse mit hohem Durchsatz für GaN- basierte Elektronik auf Si. Die Ergebnisse sollten als wissenschaftliche Grundlage für die nachfolgende Technologieentwicklungen genutzt werden. Die Arbeiten basierten auf den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitspakete und den Produktionsanforderungen der Endanwender. Alle Beteiligten gehen davon aus, dass Effizienz- und Durchsatzsteigerungen in Zukunft nicht mehr ausschließlich über die Skalierung der Reaktor- und Substratgrößen zu erzielen sind.

Tabelle 4: Zielsetzungen für das Design zukünftige MOCVD Anlagen und die geplanten Methoden für die Zielerreichung.

Zielsetzung	Methode
Reduktion Epitaxiekosten durch GaN auf Si	im Rahmen von Neuland optimierte Hardware (z.B. neuer Gaseinlass) und Prozesse
Taktzeitverkürzung	Automatisierung → In-situ Reinigung
Kostenreduktion für Verbrauchsmaterialien	- In-situ Reinigung - Automatisierung - optimierte Materialien / z.B. massive SiC Satelliten
Verlängerte Wartungsintervalle	In-situ Reinigung, neue Materialien
Erhöhte Ausbeute	verbesserte In-situ Diagnostik z.B. TTC (Top Temperature Control , AP3) / In-situ Reinigung

Tabelle 4 stellt die in Zusammenarbeit mit den Endanwendern definierten Zielsetzungen für zukünftige Anlagen und die geplanten Methoden für die Zielerreichung gegenüber. Die rechte Seite der Tabelle zeigt, dass es in Zukunft vor allem um die drei Themen Automatisierung, in-situ Reinigung des Reaktors und eine verbesserte In-situ Diagnostik gehen wird. Da die in-situ Reinigung auch eine Grundvoraussetzung für eine effektive Automatisierung ist wurden hier schon während der Projektlaufzeit konkret dran gearbeitet. D.h. hier wurde schon mit der prototypenhaften Umsetzung der Studienergebnisse begonnen. Durch die in-situ Reinigung erreicht man darüber hinaus erhebliche Verbesserungen in verschiedenen Bereichen des Produktionsprozesses. Zunächst kann man vor jedem Produktionslauf gleiche Startbedingungen herstellen, was entscheidende Bedeutung für die Reproduzierbarkeit und Ausbeute der Prozesse hat. Zudem werden durch die in-situ Reinigung, auch ohne Automatisierung, die Wartungsintervalle erheblich verlängert. Zwischen den Produktionsläufen muss die Hardware nicht mehr getauscht werden, was die Taktzeit verkürzt und häufig auftretende Bedienerfehler vermeidet, mit direktem Einfluss auf Reproduzierbarkeit, Reduktion von Ersatzteilkosten und Partikeln im Prozess. Für die in-situ Reinigung der Reaktoren wurden verschiedene Gase und Prozessführungen getestet.



Abbildung 36: Fotos eines beschichteten Planetenreaktors nach einem typischen Abscheidungsprozess für eine AlGaIn-basierte Bauelementstruktur (links) und nach der rezeptgesteuerten in-situ Reinigung (rechts). Die rechten Reaktorkonditionen entsprechen denen des Ausgangszustandes vor dem Abscheidungsprozess.

Abbildung 36 zeigt das Ergebnis, das mit optimierter Chemie und Prozessführung zu erzielen ist. Die linken Bilder zeigen das Reaktorinnere nach einem typischen Abscheidungsprozess für eine AlGaIn-basierte Bauelementstruktur. Das rechte Bild zeigt den Reaktor nach der in-situ Reinigung. Hier wurde der Reaktor durch die rezeptgesteuerte Reinigung in seinen Ausgangszustand zurückversetzt.

II.2 Fortschreibung des Verwertungsplans

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Das Risiko der hier angestrebten Anlagen und Prozessentwicklung wurde als groß eingeschätzt, da die Anforderungen an die zu entwickelnde Technologie eine hohe wissenschaftliche und technische Herausforderung darstellten. Die hohen Anforderungen der Industrie an die Reproduzierbarkeit und Homogenität der Abscheidung setzte enge Grenzen für das Design der Anlagen und Prozesse. Aufgrund der von den Partnern bereits gesammelten Erfahrungen auf diesem Themengebiet wurden die Erfolgsaussichten jedoch positiv bewertet. Die Ergebnisse zur Anlagentechnologie werden im Anschluss an das Projekt von AIXTRON als Ausgangspunkt zur Entwicklung neuer MOCVD-Produktfamilien aufgegriffen. Die Ergebnisse werden sowohl in die nächste Generation der horizontalen Planetenreaktoren als auch in die der vertikalen Closed Couple Showerhead Reaktoren einfließen. Damit wird AIXTRON an dem Marktwachstum teilhaben, das im Bereich der GaN Hochleistungselektronik erwartet wird.

Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die theoretisch erwartete Durchbruchspannung von GaN konnte an einem Bauelement schon näherungsweise erreicht werden. Es sind auch nach Projektende weiterhin Verbesserungen an der Pufferstruktur für den Hochfrequenzbetrieb als auch bei Passivierungsschichten in der Prozessierung notwendig, die aber als lösbar gelten. Unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten können alle noch offenen Probleme als lösbar angesehen werden.

Ergebnisse aus diesem Projekt werden an einigen Stellen direkt in Forschung und Lehre einfließen. Das erfolgt durch die Lehraufgaben des Projektleiters von AIXTRON (Prof. Dr. Michael Heuken) an der RWTH und über die beteiligten Projektpartner. Soweit möglich werden von den Industriepartnern Studenten in die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten einbezogen.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

AIXTRON wird über den Verkauf und die fortlaufende Weiterentwicklung der im Rahmen des Projektes entwickelten MOCVD-Technologie wirtschaftlich profitieren. Die Projektergebnisse bzgl. der Optimierung der Technologie hin zu möglichst geringen "Cost of Ownership" wird auf alle AIXTRON Produkte übertragen werden.

Zur marktreifen Entwicklung dieser Anlagentechnologien werden nach Projektabschluss weitere 1 - 2 Jahre notwendig sein. Nach erfolgreichem Abschluss dieses Projektes werden für die eigentliche Produktentwicklung weitere Investitionen von ca. 3 - 5 Mio. Euro von AIXTRON aufgebracht. Die in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse dienen dabei als unverzichtbare Grundlage. Es wird erwartet, dass die neuen Anlagengenerationen mittelfristig die heutigen Produktionsanlagen ersetzen werden. Damit kam dem Projekt für AIXTRON eine existentielle Bedeutung zu.

Die Projektergebnisse werden helfen, Arbeitsplätze sowohl bei AIXTRON als auch bei den zu einem großen Teil regionalen Zulieferfirmen zu schaffen und bestehende Arbeitsverhältnisse zu sichern.

Alle Rechte an der neuen Anlagentechnologie die in diesem Projekt entwickelt wird, werden im Rahmen der gesetzlichen Vorschriften von AIXTRON zur weiteren wirtschaftlichen Verwertung beansprucht.

.

II.3 Veröffentlichungen

keine

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht	
3a. Titel des Berichts Verbundprojekt: Neuartige Leistungs-Bauelemente mit hoher Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit auf Basis von Verbindungshalbleitern mit großer Bandlücke (NEULAND), Teilvorhaben: Erforschung einer MOCVD-Technologie für die industrielle Herstellung von GaN-basierten Hochspannungsbaulementen für die Leistungselektronik		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Dr. Christoph Giesen, Dr. Bernd Schineller, Prof. Dr. Michael Heuken		5. Abschlußdatum des Vorhabens 30.04.2013
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum 25.10.2013
		7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) AIXTRON SE Kaiserstr. 98 52134 Herzogenrath		9. Ber.Nr. Durchführende Insitution
		10. Förderkennzeichen *) 16N10729
		11a. Seitenzahl Bericht 55
		11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		12. Literaturangaben
		14. Tabellen 4
		15. Abbildungen 36
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Das Ziel des AIXTRON Teilvorhabens war die Erforschung einer MOCVD-Technologie für die industrielle Herstellung von GaN-basierten Hochspannungsbaulementen für die Leistungselektronik. Die wissenschaftlich-technischen Arbeitsziele umfassten sowohl MOCVD Prozessentwicklung für Nitrid-basierende HEMT Strukturen auf Si-Substraten als auch die MOCVD Reaktorentwicklung und -optimierung für die Herstellung entsprechender Strukturen auf produktionstauglichen Mehrscheibenanlagen für Substratgrößen zwischen 100 und 200 mm. Die Arbeiten bei AIXTRON gliederten sich in 9 Arbeitspakete. Sowohl beim Reaktordesign als auch bei der Prozessentwicklung standen bei AIXTRON Abscheidungsprozesse unter Produktionsbedingungen mit hoher Ausbeute bei geringen Kosten im Fokus und nicht die Güte der Bauelemente als solche. Es wurden 2 neue Reaktorkonfigurationen für die Abscheidung von Nitriden auf 8x150 mm und 5x200 mm Si Substraten entwickelt und optimiert. Neben den Suszeptoren wurden spezifische Gaseinlässe für die unterschiedlichen Konfigurationen entworfen und erfolgreich getestet. Alle Teile und Prozesse wurden hinsichtlich Partikelvermeidung optimiert. Ein neues Temperaturmanagementsystem erlaubt die in-situ Korrektur von Temperaturabweichungen. Der größte Teil der Reaktoroptimierung wurde auf Basis von Simulationen durchgeführt. HEMT Strukturen, die mit optimierter Technologie auf 150 mm Substraten hergestellt wurden, zeigten in Bezug auf Schichtwiderstand und Durchbruchspannungen, vertikal und lateral, vergleichbare Eigenschaften wie kommerzielle Wafer aus kleineren Reaktoren. An nicht passivierten Proben wurden mittlere Elektronenbeweglichkeit von $1700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mit $n = 1,2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ gemessen. Auf $6 \mu\text{m}$ dicken Pufferstrukturen konnten rissfreie GaN Schichten mit geringen Bow Werten realisiert werden. Am Ende stand die Definition einer optimalen Technologie für die industrielle Herstellung von HEMT Strukturen auf 150 mm und 200 mm Si-Substraten sowie eine Designstudie für zukünftige Anlagenkonzepte auf der Basis von Kundenerwartungen.		
19. Schlagwörter MOCVD, Verbindungshalbleiter, AlGaIn, HEMT, Si Substrate, Hochleistungselektronik		
20. Verlag		21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report	
3a. Report Title Joined project: New cost effective high power electronic devices with high efficiency, based on compound semiconductors with large band gaps. Task: Development of MOCVD technology for industrial production of GaN based transistors for electronic high power applications		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dr. Christoph Giesen, Dr. Bernd Schineller, Prof. Dr. Michael Heuken		5. End of Project 30.04.2013
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date 25.10.2013
8. Performing Organization(s) (Name, Address) AIXTRON SE Kaiserstr. 98 52134 Herzogenrath		7. Form of Publication Final Report
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		9. Originator's Report No.
		10. Reference No. 16N10729
		11a. No. of Pages Report 55
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References
14. No. of Tables 4		14. No. of Tables
		15. No. of Figures 36
		15. No. of Figures
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract AIXTRONs main objective was the development of an MOCVD technology for the industrial production of GaN based transistors for high power electronics. The task included the process development for the deposition of Nitride based HEMT structures on Si-substrates as well as the MOCVD reactor development and optimization for the deposition of such device structures in industrial scale using multi-wafer reactors for 100 to 200 mm substrates. The AIXTRON work program was divided into 9 sub-tasks. The focus at AIXTRON was on production processes and equipment leading to highest efficiency and yield at lowest costs, it was not on the final device quality. AIXTRON has developed and optimized two new reactor configurations for the deposition of GaN based materials on 8x150 mm or 5x200 mm Si substrates. Respective sandwich susceptors and specific gas inlets for both configurations have been developed and successfully tested. All reactor parts and processes have been optimized to minimize particle formation. A new temperature management system allows an in-situ temperature control. The reactor optimizations have been assisted by numerical simulations. HEMT structures, deposited on 150 mm Si substrates, using the new optimized technology, have shown the same performance in terms of sheet resistance and break through voltage, vertical and lateral, as commercial device structures from small scale reactors. Non passivated structures have shown electron mobility of 1700 cm ² /Vs with n = 1,2x10 ¹³ cm ⁻² . Crack free GaN layers have been demonstrated on top of 6µm thick buffer structures with low bow values. Finally the best technology has been defined, available at the end of the project, for the industrial production of GaN based HEMT structures on multiple 150 mm and 200 mm Si substrates and a design study has been presented which translates today's customer demands into future reactor technology.		
19. Keywords MOCVD, compound semiconductor, GaN, AlGaIn, HEMT, Si substrate, high power electronics		
20. Publisher		21. Price