

BMBF Verbundprojekt LeitBAN

Förderrichtlinie: Forschung für neue Mikroelektronik (*ForMikro*)



Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I: Kurzbericht

Zum Teilvorhaben

Systematische Entwicklung von ohmschen Kontakten für AlN Bauelemente und deren elektrische und optische Charakterisierung

Akronym: ForMikro-LeitBAN

Förderkennzeichen: 16ES1114

Projektlaufzeit: 01.10.2019 – 30.06.2024

Institut: TU Bergakademie Freiberg, Institut für Angewandte Physik (IAP)

Projektleitung Teilvorhaben: Prof. Dr. Johannes Heitmann

Ort/Datum: Freiberg, den 18.12.24

Transistoren auf AlN Basis (AlN Buffer, GaN Kanal und AlN Barriere) lassen sich im Vergleich zu Standard AlGaIn/GaN HEMTs (high electron mobility transistoren) weitaus kompakter herstellen. Dies ermöglicht effizient geschaltete Energiewandler bzw. eine effiziente mm-Wellen Leistungsverstärkung. Im Projekt LeitBAN, welches innerhalb der Förderrichtlinie ForMikro (Forschung für neue Mikroelektronik) vom BMBF gefördert wurde, konnten erfolgreich Transistoren auf Basis von AlN realisiert werden. Die gesamte Wertschöpfungskette vom Wafer, Einzelprozessentwicklung sowie die Fertigung von Bauelementen bis hin zu Schaltungsprototypen wurde umgesetzt. Das Konsortium (Abbildung 1) bestand aus dem Ferdinand-Braun-Institut (FBH), dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB), der Universität Erlangen-Nürnberg (LEB), der TU Berlin (TUB), der Brandenburgisch Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) und der TU Bergakademie Freiberg (IAP). Eine Industriebeteiligung erfolgte durch Infineon, III/V-Reclaim und United Monolithic Semiconductors (UMS).

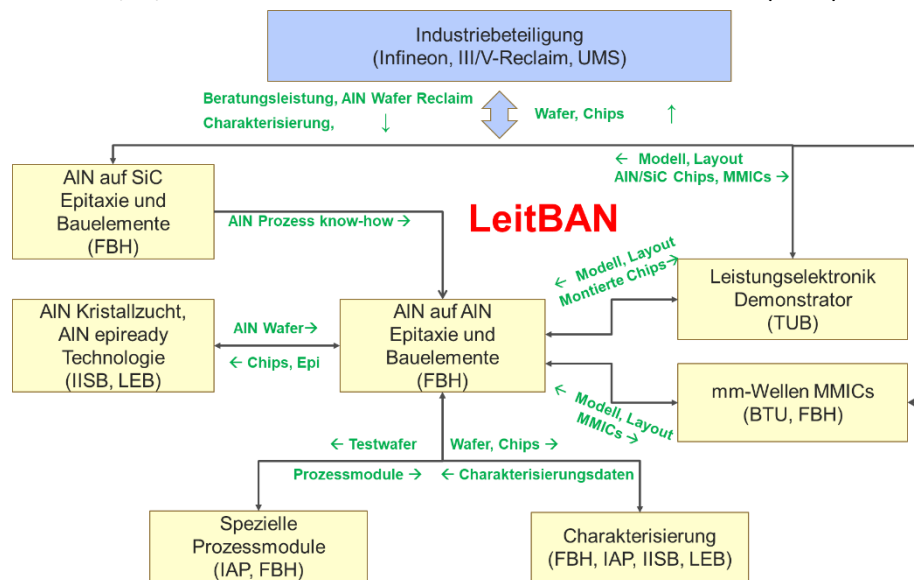


Abbildung 1: Zusammenarbeit der Projektpartner innerhalb des Gesamtvorhabens LeitBAN.

Im Teilvorhaben des IAP lag der Forschungsschwerpunkt auf der systematischen Untersuchung von ohmschen Kontakten für AlN-Bauelemente. Darüber hinaus wurden das Grundmaterial sowie Bauelemente sowohl elektrischen als auch optisch charakterisiert.

Die Herstellung von niederohmigen Source/Drain-Kontakten auf Al-reichen Barrieren ist eine Herausforderung, da AlN eine sehr große Bandlücke von 6,2 eV, bei einer gleichzeitig extrem geringen Elektronenaffinität von nur 0,6 eV aufweist. Es gibt daher keine Metalle, welche eine ausreichend niedrige Austrittsarbeit besitzen, um einen ohmschen Kontakt direkt nach Abscheidung zu erzeugen. Entsprechend ist nach der Metallabscheidung ein thermischer Prozess bei ca. 800°C nötig, um Legierungen zu bilden und ggf. eine Dotierung der Barriere zu erzeugen. Bei verwandten III/V-Halbleitern wie GaN und $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ mit einem typischen Al-Gehalt von $x \leq 0.25$ existiert diese Problematik ebenso, ist aufgrund der kleineren Bandlücke jedoch weniger stark ausgeprägt. Ausgehend von dem für AlGaIn/GaN etabliertem Kontaktschema Ti/Al/Ni/Au, wurde im Teilprojekt durch die gezielte Anpassung der Schichtdicken und eine Substitution des Titans der Kontaktwiderstand reduziert. Weitere im Projekt untersuchte Möglichkeiten zur Verbesserung des Kontaktwiderstands stellten eine lokale Rückätzung der Barriere mittels

Atomlagenätzen und die lokale Dotierung der Source/Drain-Gebiete mittels Ionenimplantation dar. In beiden Fällen wurde eine Reduzierung des Kontaktwiderstands gezeigt. Das Projektziel eines Kontaktwiderstand kleiner $0,2 \Omega\text{mm}$ wurde sowohl mit Recess, Implant als auch durch Auswahl eine geeigneten Kontaktstapels erreicht (Abbildung 2a/b). Zusätzlich wurden Au-freie V/Al/Ti/TiN-Kontakte entwickelt, welche neben geringen Kontaktwiderständen von bis zu $<0.1 \Omega\text{mm}$ (bei $x = 25\%$) eine für die Prozessintegration vorteilhafte geringe Oberflächenrauheit aufweisen. Abschließend fand der Transfer der entwickelten Prozesse an das FBH statt.

Der zweite Schwerpunkt der Arbeiten im Teilprojekt lag auf der defektspektroskopischen und optischen Charakterisierung der hergestellten Bauelemente und Teststrukturen. Die umfassende optische Eingangscharakterisierung der AlN Substrate für die Bauelementepitaxie diente als Rückkopplung für die Kristallzüchtung an der FAU. Zur Untersuchung von Aufwärmeeffekten im Betrieb der AlN-Bauelemente wurde ein spezieller Probenhalter entwickelt und ein Versuchsaufbau für *operando* Raman-Messungen realisiert. Damit konnten neben am IAP hergestellten Teststrukturen auch die vom FBH zur Verfügung gestellten, im Vollprozess gefertigten HEMTs inkl. Feldplattentechnologie und Metallisierungslagen untersucht werden. Eine Verschiebung der Ramanmoden je nach Betriebszustand des Transistors konnte nachgewiesen werden (Abbildung 2c/d). Die Ergebnisse der Raman-Messungen sollen zukünftig mit *operando* nanoXRD-Messungen korreliert werden, um eine Kalibrierung der orts aufgelösten Temperaturmessung zu ermöglichen. Dazu wurden nanoXRD-Messungen am ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) in Grenoble durchgeführt (Experiment MA-6425).

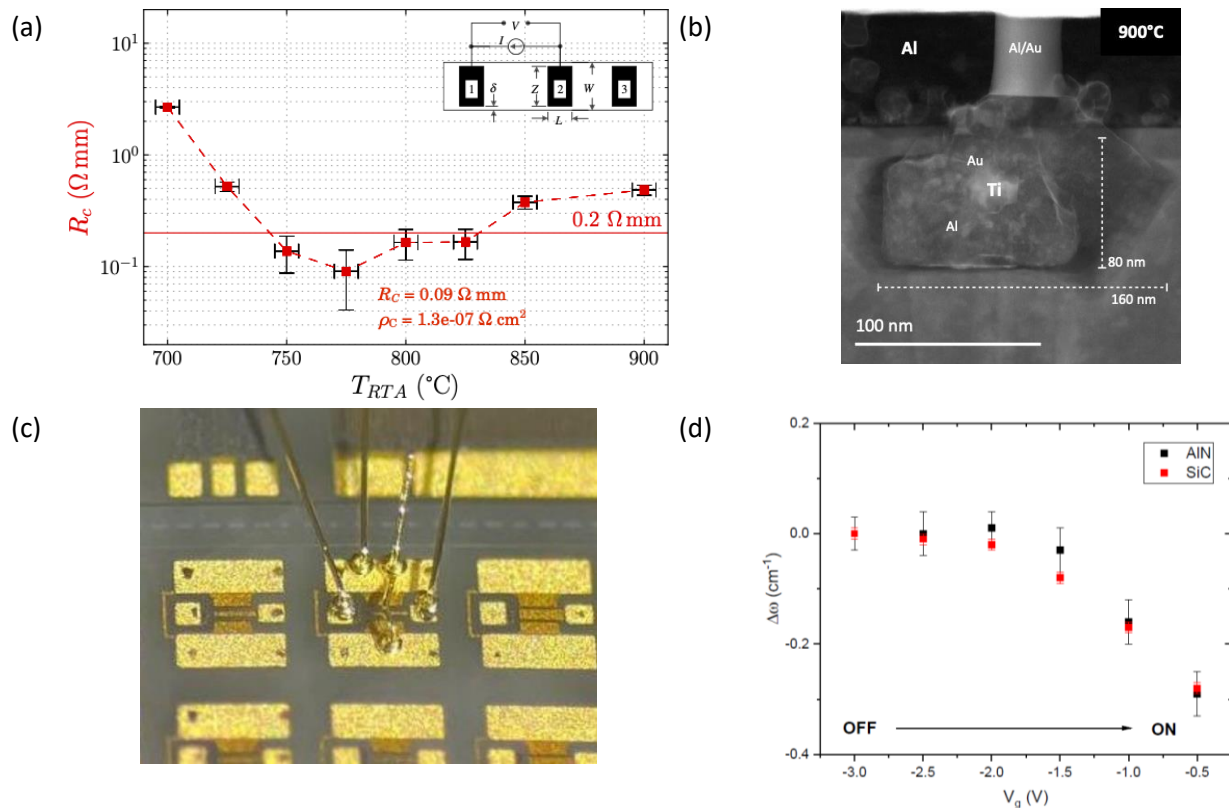


Abbildung 2: (a) Kontaktwiderstand über RTA-Temperatur für $\text{Al}_{0,31}\text{Ga}_{0,69}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}$. (b). TEM-Aufnahme der Kontakt/Halbleiter-Grenzfläche nach RTA bei 900°C mit lokalem Durchbruch. (c) Gebondeter HEMT für *operando* Ramanmessungen (d) Relative Verschiebung der Phononenmoden von AlN und SiC bei Stromfluss im angeschalteten Zustand des HEMTs.

BMBF Verbundprojekt LeitBAN

Förderrichtlinie: Forschung für neue Mikroelektronik (*ForMikro*)



Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II: Eingehende Darstellung

Zum Teilvorhaben

Systematische Entwicklung von ohmschen Kontakten für AlN Bauelemente und deren elektrische und optische Charakterisierung

Akronym: ForMikro-LeitBAN

Förderkennzeichen: 16ES1114

Projektlaufzeit: 01.10.2019 – 30.06.2024

Institut: TU Bergakademie Freiberg, Institut für Angewandte Physik (IAP)

Projektleitung Teilvorhaben: Prof. Dr. Johannes Heitmann

Ort/Datum: Freiberg, den 18.12.24

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Projektablauf und Meilensteine.....	5
3	Dokumentation der Ergebnisse.....	6
	AP 4.1.1 Festlegung von Layout und optimalem Prozessfluss	6
	AP 4.2.1 Konzeption und Abstimmung zu ohmschen Kontakten auf AIN	6
	AP 4.2.2 Systematisches Materialscreening	6
	AP 4.2.3 Recess ohmsche Kontakte.....	8
	AP 4.2.4 Implantationstests zur Erzeugung einer hohen lokalen n-Dotierung.....	9
	AP 4.2.5 Angepasste Kontakte auf modifizierten AIN-Oberflächen	10
	AP 4.2.6 Elektrische Charakterisierung der hergestellten Kontakte.....	10
	AP 4.2.7 Mikrostrukturelle Aufklärung der Formierung ohmscher Kontakte für AIN	14
	AP 4.3.2 Übertragung der entwickelten Prozessmodule auf FBH-Prozesslinie	18
	AP 4.3.4 Testrun: AIN mm-Wellen-Bauelemente auf 1-Zoll AIN.....	19
	AP 4.3.5 Testrun: AIN Hochvolt-Bauelemente auf 1-Zoll AIN	19
	AP 7.3.1 Elektrische Defektspektroskopie	19
	AP 7.3.2 Optische Defektspektroskopie	20
	AP 7.3.3 Untersuchung von Aufwärmeeffekten in aktiven Bauelementen	21
4	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	22
5	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	22
6	Fortschreibung des Verwertungsplans	23
7	Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	23
8	Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	23
9	Literaturverzeichnis.....	24

1 Einleitung

High Electron Mobility Transistoren (HEMTs) basieren heute standardmäßig auf AlGaN/GaN-Heterostrukturen. Ziel des Verbundprojekts LeitBAN war es Heterostrukturen mit Aluminiumnitrid Buffer und Al-reicher Barrierschicht herzustellen und auf diesen entsprechende elektronische Bauelemente zu realisieren. Durch den Einsatz von AlN ergibt sich eine Reihe von Vorteilen, wie eine kompaktere Bauweise, eine höhere Durchbruchspannung sowie geringere Verluste der leistungselektronischen und mm-Wellen Transistoren. Abbildung 1 demonstriert diese Verhältnisse anhand des theoretischen, bei Auslegung auf eine bestimmte Durchbruchspannung erreichbaren, Einschaltwiderstands für verschiedene Halbleiter. Er entspricht bei höheren Spannungsklassen weitgehend dem elektrischen Widerstand der lateralen Driftzone. Gegenüber lateralen Bauelementen mit GaN-Buffer ergibt sich eine Reduktion des Widerstands um mindestens den Faktor 10. Im Umkehrschluss können Bauelemente mit AlN-Buffer bei gleichem Widerstand eine deutlich größere Durchbruchspannung erreichen. Es ist jedoch zu beachten, dass im realen Bauelement die Source/Drain-Kontakte einen zusätzlichen Beitrag zum Widerstand liefern. Dieser Beitrag nimmt insbesondere für mm-Wellen HEMTs mit entsprechend kleiner Kanallänge zu.

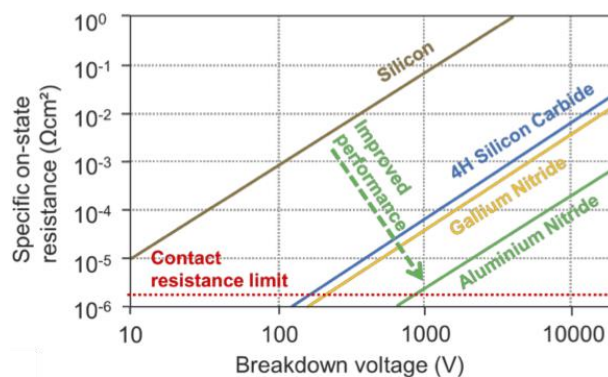


Abbildung 1: Vergleich des spezifischen Einschaltwiderstands verschiedener Halbleiterfamilien, inklusive der derzeitigen Begrenzung der Technologie durch Übergangswiderstände an Source- und Drain-Kontakten. Daten der Firma Hextech (<http://www.hexatechinc.com/applications.html>).

Ein wesentlicher Punkt des hier vorgestellten Teilprojekts war daher die systematische Untersuchung der Ausbildung von ohmschen Kontakten bei Al-reichen AlGaN/GaN/AlN Heterostrukturen. Die Herstellung von niederohmigen Source/Drain-Kontakten auf Al-reichem Barrieren ist eine Herausforderung, da AlN eine sehr große Bandlücke von 6,2 eV (Yamashita, 1979), bei einer gleichzeitig extrem geringer Elektronenaffinität von nur 0,6 eV (Goldberg, 2001) aufweist. Es gibt daher keine Metalle, welche eine ausreichend geringe Austrittsarbeit besitzen, um einen ohmschen Kontakt direkt nach Abscheidung zu erzeugen. Bei verwandten III/V-Halbleitern wie GaN und Al_xGa_{1-x}N mit einem typischen Al-Gehalt von $x \leq 0.25$ existiert diese Problematik ebenso, ist aufgrund der kleineren Bandlücke jedoch weniger stark ausgeprägt (Blank, 2007). Ein geringer Kontaktwiderstand konnten für diese Materialien durch Abscheidung mehrlageriger Metallstapel und anschließende Temperaturbehandlung bei bis zu 850°C erzielt werden. Als Metallisierung hat sich eine Schichtabfolge aus Ti/Al/Ni/Au etabliert (Fan, 1996). Titan diffundiert dabei in den Halbleiter und bildet TiN. Dadurch entstehen leitfähige Pfade und der Halbleiter wird im Bereich unter dem Kontakt zusätzlich stark dotiert (Daele, 2005). Vergleichbare Ergebnisse

konnten neben Titan auch mit Vanadium und Molybdän erzielt werden (D. Selvanathan, 2004). Beide Materialien bieten den Vorteil einer geringeren Temperatur welche zur Kontaktformierung benötigt wird. Es konnte gezeigt werden, dass der erreichbare Kontaktwiderstand neben den verwendeten Metallen stark von den jeweiligen Schichtdicken abhängt und mit der Mikrostruktur des Kontakts korreliert (Schmid, 2015). Die ohmsche Kontaktierung von AlN ist bisher wenig untersucht. Die zum Projektbeginn bekannten ersten Arbeiten übernahmen die Ti/Al/Ni/Au-Metallisierung (Erlbacher, 2012; Okumura, 2018). Die erreichten Kontaktwiderstände waren im Vergleich zu AlGaN/GaN-Bauelementen jedoch deutlich erhöht (Li, 2017).

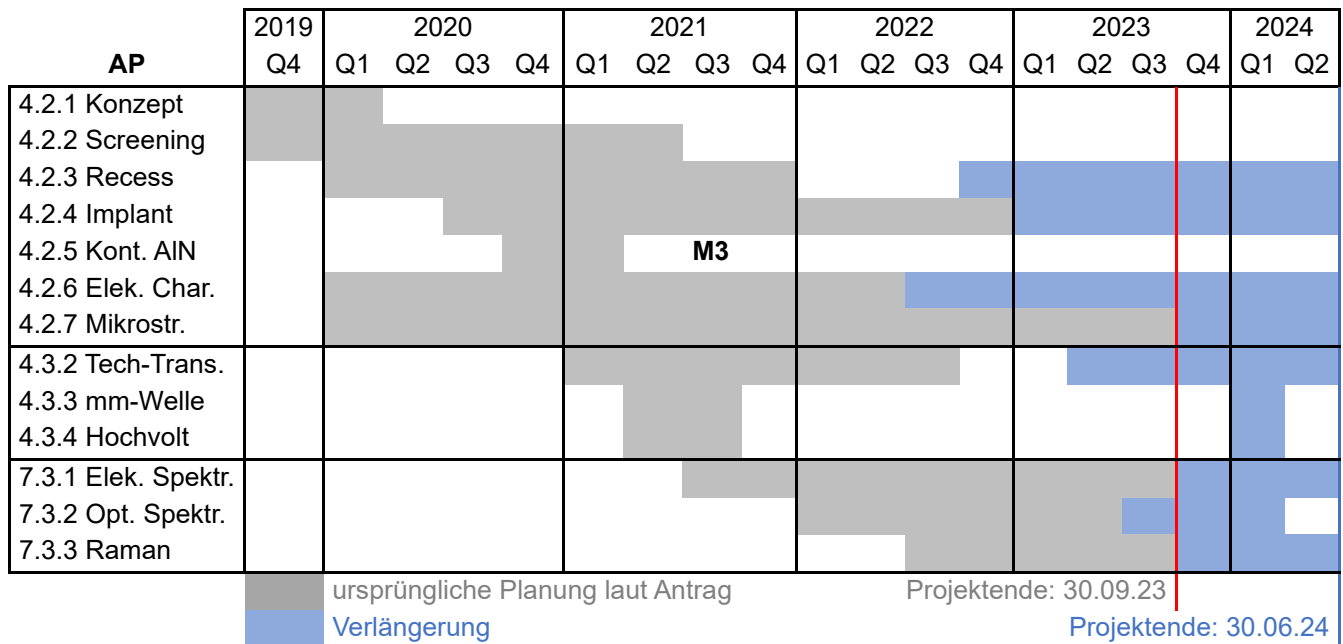
Ausgehend von dem für AlGaN/GaN etabliertem Kontaktschema, sollte im Teilprojekt durch die gezielte Anpassung der Schichtdicken und eine Substitution des Titans der Kontaktwiderstand reduziert werden. Weitere im Projekt untersuchte Möglichkeiten zur Verbesserung des Kontaktwiderstands stellten eine lokale Rückätzung der Barriere mittels Atomlagenätzen (ALE, atomic layer etching) und die Dotierung der Source/Drain-Gebiete mittels Ionenimplantation dar. Im Rahmen des Teilprojekts wurde am IAP die systematische Entwicklung von ohmschen Source/Drain-Kontakten auf AlN (AP 4.2) vorangetrieben. Der Fokus der Arbeiten lag auf der Prozessentwicklung zur Herstellung von Ohmkontakten, der Fertigung von Teststrukturen und einem umfassenden Materialscreening. Im Vergleich zu industrienahen Reinräumen konnte auf eine höhere Flexibilität hinsichtlich der Integration neuer Materialien zurückgegriffen werden. Die hergestellten Kontakte wurden elektrisch charakterisiert und die erhaltenen Resultate flossen in die kontinuierliche Weiterentwicklung derselben ein. Um den Mechanismus der Kontaktformierung aufzuklären, wurden mikrostrukturelle Untersuchungen mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) durchgeführt. Der anschließende Transfer des entwickelten Prozesses zur Herstellung ohmscher Kontakte mit niedrigem Kontaktwiderstand auf AlN erfolgte in enger Absprache mit dem Kooperationspartner Ferdinand-Braun-Institut (FBH) und mündete schließlich in der Implementierung des Prozesses in die Bauelementtechnologie des FBH.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten im Teilprojekt lag auf der defektspektroskopischen und optischen Charakterisierung der hergestellten Bauelemente und Teststrukturen. Im AP 7 (Charakterisierung und Zuverlässigkeit) wurde am Institut für Angewandte Physik der TU Bergakademie Freiberg (IAP) die optische Charakterisierung der AlN Substrate und AlN Bauelementepitaxie mittels defektspektroskopischer Methoden durchgeführt (AP 7.3). Die umfassende Eingangskarakterisierung der AlN Substrate für die Bauelementepitaxie diente als Rückkopplung für die Kristallzüchtung an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Zur Untersuchung von Aufwärmeeffekten im Betrieb der AlN-Bauelemente wurde weiterhin ein spezieller Probenhalter entwickelt und ein Versuchsaufbau für *operando* Raman-Messungen realisiert. Damit konnten neben am IAP hergestellten Teststrukturen auch die vom FBH zur Verfügung gestellten, im Vollprozess gefertigten HEMTs inkl. Feldplattentechnologie und Metallisierungslagen untersucht werden. Die Ergebnisse der Raman-Messungen sollen zukünftig mit *operando* nanoXRD-Messungen korreliert werden, um eine Kalibrierung der ortsaufgelösten Temperaturmessung zu ermöglichen. Dazu wurden im Oktober 2024 nanoXRD-Messungen am ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, Experiment MA-6425) in Grenoble durchgeführt. Die Daten werden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Abschlussberichts noch ausgewertet.

2 Projektablauf und Meilensteine

Der ursprüngliche Projektablauf sah eine dreijährige Laufzeit vom 01.10.2019 bis zum 30.09.2023 vor. Die Bearbeitung des Projektes LeitBAN, sowohl im Konsortium als auch am IAP war von widrigen Umständen begleitet. Für das IAP besonders einschränkend, war der für insgesamt etwa vier Monate komplett gesperrte Laborzugang und der auch danach noch stark eingeschränkte Betrieb während der Covid-19 Pandemie. Durch Verzögerungen in den Lieferketten konnte eine neue Kammer für Atomlagenätzen erst in Q4/2022 in Betrieb genommen werden. Auf ähnliche Weise verzögerten sich Reparaturen, da Ersatzteile kaum lieferbar waren. So Betrug die Lieferzeit für eine defekte Anlagensteuerung des Metallverdampfers 12 Wochen. Da alle Projektpartner mit vergleichbaren Herausforderungen konfrontiert waren, führte das insbesondere zu Verzögerungen bei institutionsübergreifenden Arbeitspaketen wie dem Technologietransfer für die Ohmkontakte an das FBH. Aus diesen Gründen wurde eine Aufstockung der Projektmittel und Verlängerung des Projekts bis zum 30.06.2024 beantragt, welche durch den Fördergeber bewilligt wurde. Tabelle 1 zeigt den ursprünglichen und finalen Balkenplan der APs inkl. Projektverlängerung. Durch die Projektverlängerung konnten alle Arbeitspakete im ursprünglich vorgesehenen Umfang bearbeitet werden. Die Projektziele wurden erreicht.

Tabelle 1: Ursprünglicher (grau) und finaler Balkenplan (blau) inkl. der Projektverlängerung bis zum 30.06.2024. Dargestellt sind nur die AP des Gesamtvorhabens unter Beteiligung des IAP.



Das IAP war im Wesentlichen an Meilenstein M3 beteiligt, welcher die Demonstration von AlN-Bauelementen mit 3 W/mm @ 30 GHz enthält. Eine Voraussetzung für M3 war ein Kontaktwiderstand kleiner 0.2 Ωmm. Im Rahmen des vorliegenden Teilprojektes wurde ein Kontaktwiderstand von $R_c = 0,1 \Omega\text{mm}$ bei einer nominellen $\text{Al}_{0,31}\text{Ga}_{0,69}\text{N}$ -Barriere erreicht und somit das in AP 4.2 gesetzte Ziel von mindestens $R_c = 0,2 \Omega\text{mm}$ deutlich übertroffen.

3 Dokumentation der Ergebnisse

AP 4.1.1 Festlegung von Layout und optimalem Prozessfluss

Es wurden verschiedene Layouts mit Teststrukturen zur Entwicklung von ohmschen Kontakten erstellt. Diese enthalten u.a. die Strukturen für die Transferlängenmethode (TLM), Kontakt-Endwiderstand-Strukturen (CER), Hall bzw. van-der-Pauw-Strukturen, Kondensatoren unterschiedlicher Fläche und HEMTs mit einer Variation der Gate-Weite und Kanallänge. Die TLM-Strukturen wurden ebenfalls in einem am FBH entwickelten Maskensatz integriert, sodass ein direkter Vergleich von am FBH und IAP hergestellten Proben und der dazu angewandten Fertigungsprozesse umgesetzt werden konnte. Das fertige Maskenlayout ist in Abbildung 2 dargestellt.

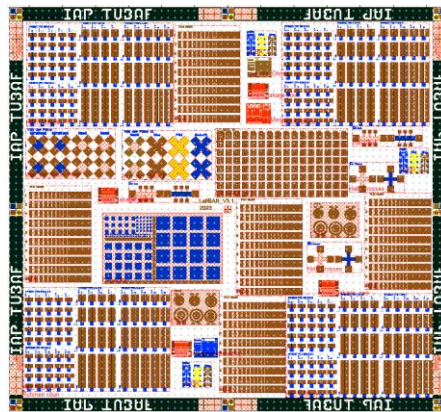


Abbildung 2: Maskenlayout der Teststrukturen zur elektrischen Charakterisierung der am IAP prozessierten ohmschen Kontaktstapel und des AlGaN/GaN/AlN-Heterostruktur.

AP 4.2.1 Konzeption und Abstimmung zu ohmschen Kontakten auf AlN

Gemeinsam mit dem Ferdinand-Braun-Institut (FBH) wurden regelmäßige Abstimmungen getroffen hinsichtlich Probenlieferungen, geplanter Versuche, zulässiger Prozessparameter und Materialien, sowie Oberflächenmodifikationen und Dotierstoffkonzentrationsvariationen der Substrate. Darüber hinaus wurde die mögliche Integration der Einzelprozesse des IAP in den Gesamtprozess am FBH geplant (AP 4.3.2). Insbesondere mussten dazu bei der Materialauswahl für den Kontaktstapel die unterschiedlichen Restriktionen der Reinräume am IAP und FBH beachtet werden. Um die Vergleichbarkeit der elektrischen Charakterisierung zwischen den unterschiedlichen Partnern des Konsortiums sicherzustellen, wurden die Parameter für Kontaktwiderstandsmessungen und die zu verwendenden Teststrukturen im Konsortium institutsübergreifend festgelegt.

AP 4.2.2 Systematisches Materialscreening

Etablierte Kontaktstapel aus dem GaN System sollten hinsichtlich ihres Integrationspotenzials für AlN untersucht und gezielt so verändert werden, dass zum einen das benötigte thermische Budget für die Kontaktformierung als auch der Kontaktwiderstand selbst minimiert werden. Die neu entwickelte Prozessführung fand im zentralen Reinraumlabor der TU Freiberg statt. Es wurde eine systematische Studie zur Optimierung der Schichtdicken des Metallstapels als auch zur Optimierung der Prozessparameter für

die thermische Kontaktformierung mittels Rapid Thermal Annealing (RTA) im Hinblick auf möglichst kurze Zeit und geringe Temperatur vorgenommen. Da zu Projektbeginn nur eine geringe Anzahl an Proben durch die Projektpartner zur Verfügung gestellt werden konnten, wurden zunächst Kontaktstapel auf eigenen Referenzsubstraten mit 25% AlGaN-Barriere hergestellt und untersucht. Die prozessierten Kontakte wurden kontinuierlich mittels TLM- und CER-Messungen elektrisch charakterisiert und die Kontaktzusammensetzung sowie die Schichtdickenverhältnisse angepasst.

Bei Heterostrukturen mit 3 nm GaN-Cap, einer 24 nm dicken Al_{0,25}Ga_{0,75}N-Barriere, 2 µm GaN-Buffer und Saphir-Substrat konnte mittels einer angepassten und per Elektronenstrahl- und thermischem Verdampfen abgeschiedener V/Al/Ni/Au-Metallisierung ein Kontaktwiderstand von 0,1 Ωmm erreicht werden. Dafür wurde ein RTA-Prozess mit einer Haltephase von 30 s bei 775°C verwendet. Untersucht wurden u.a. der Einfluss des Verhältnisses der Ti/Al und V/Al Schichtdicken sowie die Auswirkung unterschiedlicher Al/Ti/Al Stapel mit Ni/Au-Capping. Außerdem konnte durch die geeignete Wahl der Schichtdichtdicken des Metallstapels die Oberflächenrauheit des Kontakts nach dem RTA-Prozess deutlich reduziert werden (Abbildung 3). Insbesondere durch das Weglassen der Ni-Schicht und den Austausch von Au durch Ag konnte die arithmetische Rauheit S_a der V-basierten Kontakte von 140 nm auf unter 20 nm reduziert werden. Dies ermöglicht eine bessere Prozessintegration besonders bei kleinen Strukturbreiten für mm-Wellen Bauelemente. Eine zu große Rauheit würde zu Problemen bei der Fokussierung nachfolgender Belichtungsschritte führen und unter Umständen eine zusätzliche Planarisierung erfordern.

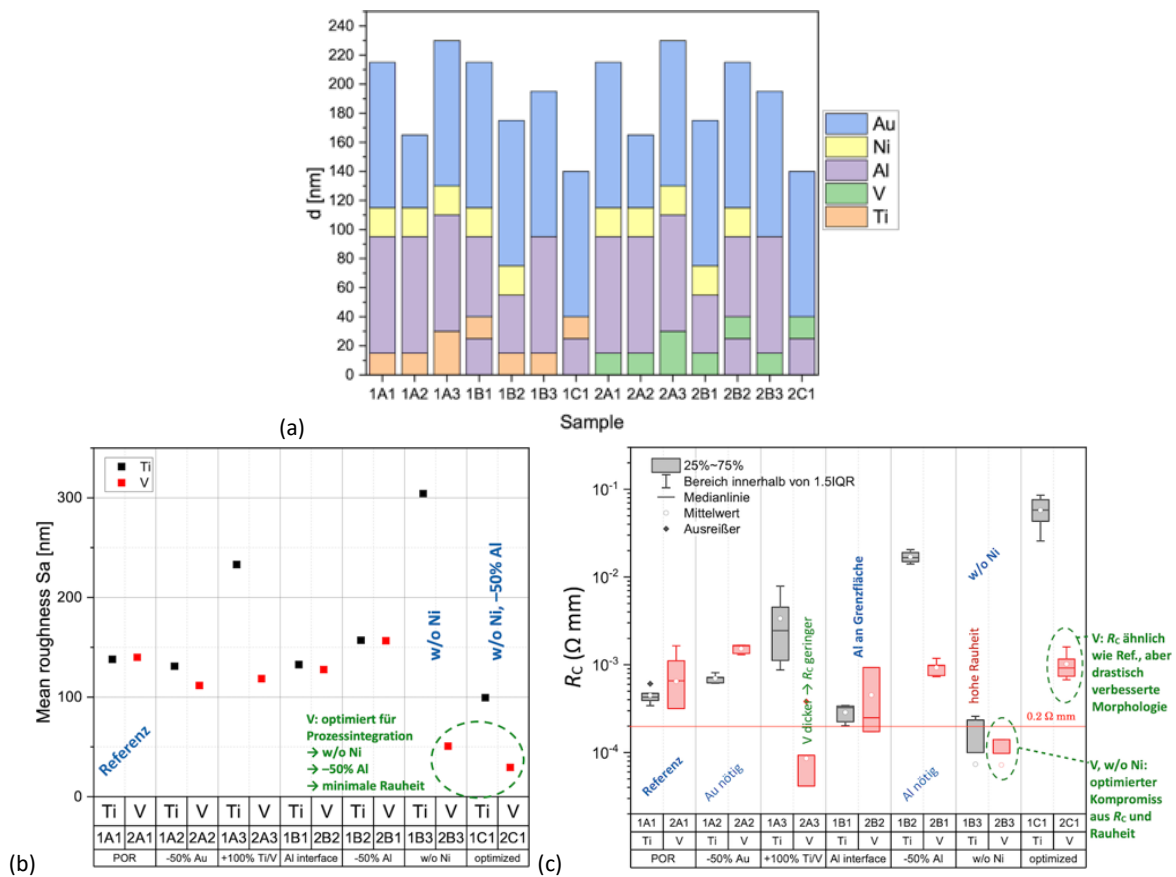


Abbildung 3: (a) Variation der Schichtdicken von Au-basierten Kontakten auf IAP-Referenzsubstrat, (b) arithmetische Rauheit S_a und (c) Kontaktwiderstand nach Kontaktformierung durch RTA bei 775°C.

Gleichzeitig wurden per Sputterabscheidung Au-freie Ti/Al/Ti/TiN und V/Al/Ti/TiN Kontaktstapel auf IAP-Referenzsubstraten hergestellt, die Kontaktformierung wurde bei 700...900°C für 300 s in N₂ durchgeführt. Für die Au-freie Kontaktierung wurde mit V/Al/Ti/TiN (30/100/20/80 nm) nach RTA bei 800°C der geringste Kontaktwiderstand von <0,1 Ωmm erreicht (siehe Abbildung 4). Die weitere elektrische Charakterisierung des Au-freien Stapels ist in AP 4.2.6 dokumentiert. Die Untersuchungen der Kontaktstapel auf vom FBH gelieferten AlGaN-Heterostrukturen mit erhöhtem Al-Gehalt (>30%) bzw. auf AlN-basierten Heterostrukturen sind in AP 4.2.5 dokumentiert.

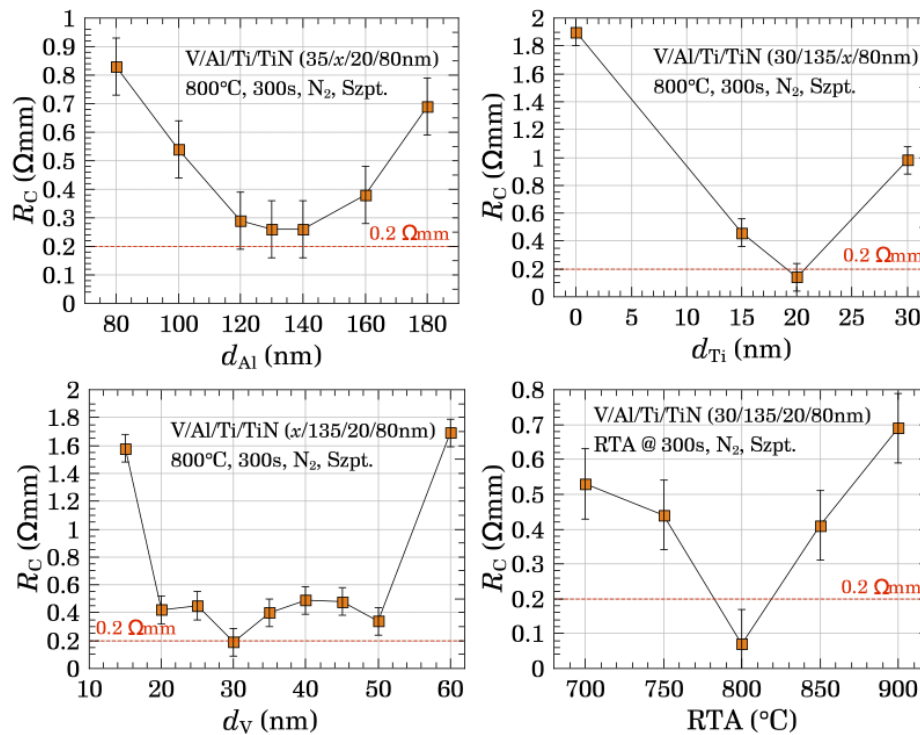


Abbildung 4: Optimierung Au-freier V/Al/Ti/TiN-Kontaktstapel auf dem AlGaN-Referenzsubstrat.

AP 4.2.3 Recess ohmsche Kontakte

Es sollte geprüft werden, ob R_C durch eine lokale Rückätzung der Barrierschicht vor Kontaktabscheidung weiter reduziert werden kann. Dazu wurden Substrate mit einer Heterostruktur aus Al_{0,31}Ga_{0,69}N/GaN/AlN auf SiC verwendet. Die Rückätzung sollte mittels ALE durchgeführt werden. Die ALE-Kammer stand durch Lieferverzögerungen erst spät im Projekt zur Verfügung, weshalb nur eine relativ geringe Zahl an Prozessen durchgeführt werden konnte. Aus Vorversuchen mittels reaktiven Ionenätzen (ICP-RIE) wurde festgestellt, dass die Ätzrate von reinem AlN bei ca. (20-25) % der Ätzrate von GaN liegt. Die Strukturierung erfolgte dabei unter Verwendung einer Hartmaske aus 100 nm SiO₂, welches per CVD abgeschieden wurde. Dies wurde erforderlich, da der Cl-basierte Ätzprozess den sonst für RIE verwendeten Photolack angreift. Der ALE-Prozess besteht aus einem Modifikationsschritt der Oberfläche mit Cl/BCl₃-Plasma, danach erfolgt ein Spülschritt mit Ar und schließlich das Entfernen der modifizierten Schicht mit einem Ar-Plasma. Der gesamte Zyklus wurde zwischen 20- und 80-mal wiederholt. Anschließend wurden sowohl für die geätzten Proben als auch für eine Referenzprobe ohne Ätzung die ohmschen Kontakte abgeschieden. Der Kontaktstapel bestand aus Zr/Al/Ni/Au mit den Dicken 30/80/20/100 nm, wobei Zr und Al gesputtert

wurden. Als RTA-Temperatur wurde 800°C gewählt, die Ergebnisse sind in Abbildung 5 gezeigt. Komplette ohne Hartmaske und ALE wurde ein R_c von $0.43\ \Omega\text{mm}$ erreicht. Ohne ALE aber mit Hartmaske ist der Kontaktwiderstand mit $2\ \Omega\text{mm}$ sehr hoch. Dieses Problem könnte durch eine Modifikation des CVD-Prozesses für die Hartmaske evtl. gelöst werden. Durch ALE konnte der R_c wieder deutlich verringert werden. Der geringste Wert von $0.19\ \Omega\text{mm}$ wurde nach Ätzung von 20 Zyklen erreicht. Die ALE ist damit eine vielversprechende Möglichkeit den R_c für Al-reiche Barrieren weiter zu reduzieren.

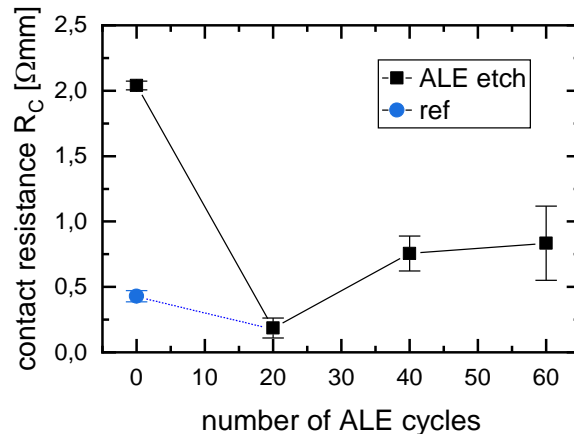


Abbildung 5: Kontaktwiderstand für Zr/Al/Ni/Au mit 30/80/20/100 nm Schichtdicke nach RTA bei 800°C für unterschiedliche ALE Zyklenzahl. Der geringste R_c wird für 20 Zyklen ALE erreicht.

AP 4.2.4 Implantationstests zur Erzeugung einer hohen lokalen n-Dotierung

Im Rahmen des Technologietransfers der ohmschen Kontaktierung (AP 4.3.2) stellte das FBH einen vorstrukturierten Wafer zur Verfügung. Dieser wurde geviertelt. Zwei Viertel wurden am FBH im Bereich der Source/Drain-Kontakte mit Silizium implantiert. Anschließend fand die Abscheidung der ohmschen Kontakte am IAP statt. Es wurde jeweils ein Kontaktstapel Ti/Al/Ni/Au und Zr/Al/Ni/Au mit den Dicken 30/80/20/100 nm abgeschieden. Die Deposition der Metalle erfolgte mittels Elektronenstrahlverdampfen, lediglich im Falle der Zr-haltigen Probe wurden Zr und Al gesputtert. Der lift-off Prozess fand am FBH statt. Die Proben wurden anschließend bei unterschiedlichen Temperaturen für 300 s getempert, um die ohmschen Kontakte zu formieren. In Abbildung 6 sind R_c und R_{sh} im Vergleich zu Ti/Al/Ni/Au-Kontakten ohne Implantation dargestellt. Unabhängig ob Zr oder Ti das Interface zum Halbleiter bildet, wird der geringste Kontaktwiderstand von $0,3\ \Omega\text{mm}$ nach RTA bei 800°C erreicht. Der niedrigste Wert für den nicht implantierten Ti/Al/Ni/Au-Kontakt liegt dagegen bei rund $0.7\ \Omega\text{mm}$ nach RTA bei 850°C . Im Gegensatz dazu liegt der R_{sh} für die implantierten Proben deutlich über denen der nicht implantierten Probe. Ursache dafür kann das hohe thermische Budget sein, welches für die Aktivierung des Dotierstoffes aufgewandt wurde und zu einer Schädigung der Heterostruktur führt. Eine Reduktion des R_c auf $0.21\ \Omega\text{mm}$ konnte für dieselbe Heterostruktur auch durch eine Anpassung des Metallstapels, der Schichtdicken und des RTA-Profiles erreicht werden, ohne dass ein zusätzlich Implantationsschritt nötig wurde (Abbildung 12, S. 14).

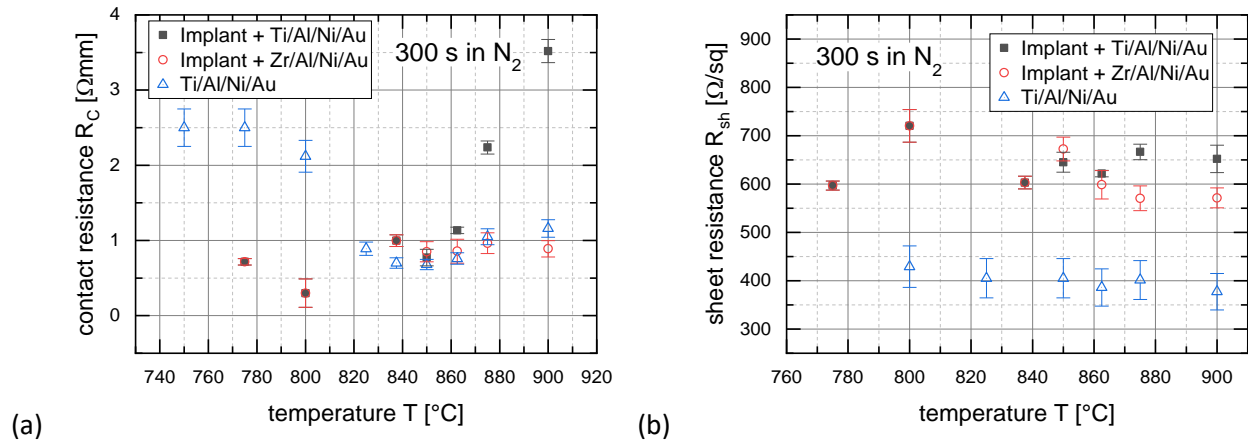


Abbildung 6: (a) Erreichter Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der Temperatur für (Ti/Zr)/Al/Ni/Au-Kontakte mit und ohne Implantation der Source/Drain-Gebiete. (b) Schichtwiderstand des 2DEG nach Kontaktformierung.

AP 4.2.5 Angepasste Kontakte auf modifizierten AlN-Oberflächen

Vom FBH wurden Heterostrukturen mit modifizierten Barrieren zur Verfügung gestellt. Variiert wurden die Barrieredicke und der Al-Gehalt. Ausgehend vom in AP 4.2.2 entwickelten Kontaktstapel wurden die Einzeldicken und damit die Gesamtzusammensetzung des Kontaktstapels auf den modifizierten Substraten systematisch untersucht. Die Reduktion der Dicke des Nitridbildners (Ti oder V) wurde mit einer systematischen Untersuchung des notwendigen thermischen Budgets kombiniert, um am Ende einen minimierten Kontaktwiderstand bei minimalem thermischem Budget auf AlN-basierten Substraten zu erreichen.

Für die elektrische Charakterisierung wurden spezielle Teststrukturen (TLM) im Reinraum hergestellt. Die TLM-Bereiche wurden mittels einer Mesa-Struktur isoliert, das SiN-Cap durch Reactive Ion Etching (RIE) geöffnet, die Oberfläche nasschemisch gereinigt, die Kontakte mittels Elektronenstrahlverdampfung (Au-basiert) oder Sputtern (Au-frei) abgeschieden und die Kontaktformierung mittels RTA durchgeführt. Mit Ti/Al/Ni/Au (15/80/20/100 nm) wurde nach RTA bei 775 $^{\circ}\text{C}$ ein Kontaktwiderstand von $R_C = 0,14 \Omega\text{mm}$ erreicht, was das Projektziel von 0,2 Ωmm übertrifft (bzw. unterschreitet). Die elektrischen Daten und mikrostrukturellen Untersuchungen der angepassten Kontakte finden sich in AP 4.2.6 und AP 4.2.7.

AP 4.2.6 Elektrische Charakterisierung der hergestellten Kontakte

Die in AP 4.2.2 und AP 4.2.5 hergestellten Kontakte wurden elektrisch charakterisiert. Dafür wurden die speziellen Teststrukturen und Testbauelemente aus AP 4.1.1 verwendet. Mittels Strom-Spannungskennlinien, TLM, CER und Test-HEMTs wurden sowohl der ohmsche Charakter als auch der Kontaktwiderstand selbst und ergänzende Eigenschaften der hergestellten Kontakte untersucht.

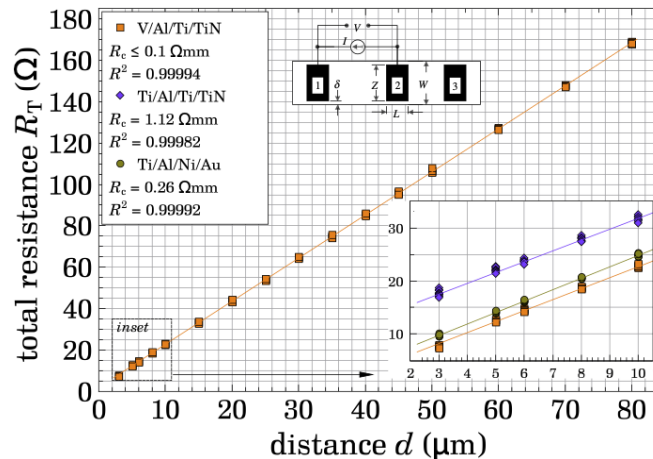


Abbildung 7: TLM an Au-freien Kontakten auf Referenz-Heterostruktur mit $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ -Barriere. Ein Kontaktwiderstand von $<0.1 \Omega\text{mm}$ konnte erreicht werden. (Garbe, 2023)

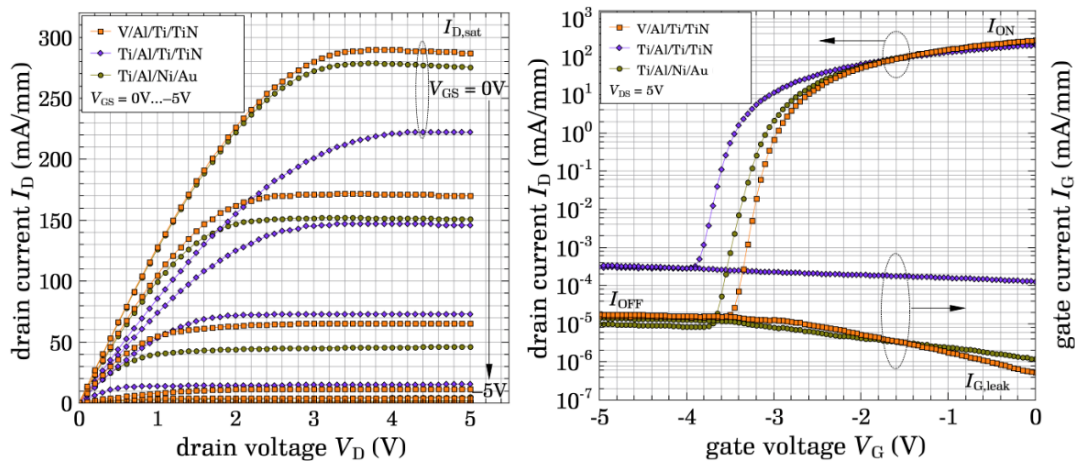


Abbildung 8: Ausgangskennlinie und Transferkennlinie eines Test-Bauteiles (planarer HEMT). (Garbe, 2023)

Auf Referenz-Heterostrukturen mit 25% Al-Gehalt konnte mittels Au-freier V/Al/Ti/TiN-Kontaktierung nach einer Formierung bei 800°C ein Kontaktwiderstand von $<0.1 \Omega\text{mm}$ erreicht werden (Abbildung 7). Außerdem wurden zu Testzwecken planare HEMTs prozessiert und elektrisch charakterisiert (Abbildung 8). Die Ausgangskennlinie zeigte einen hohen Sättigungsstrom vom 270 mA/mm , der selbst den der Probe mit Au-basierten Kontakten übertraf. Die Transferkurve wies ein $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ -Verhältnis von 7 Größenordnungen und niedrige Leckströme auf. Die goldfreien Kontakte sind CMOS-kompatibel und weisen eine Oberflächenrauheit auf, die mindestens eine Größenordnung unter der der Au-basierten Kontakten liegt. Dies ermöglicht eine bessere Prozessintegration für leistungselektronische und insbesondere Hochfrequenzbauelemente mit hohen Anforderungen an den Kontaktwiderstand und die Rauheit. Die Ergebnisse wurden in Applied Physics Letters veröffentlicht (Garbe, 2023). Alle folgenden Experimente fanden auf Heterostrukturen mit AlN-Buffer und unterschiedlichen Al(Ga)N-Barrieren statt, welche im Rahmen des Vorhabens vom Projektpartner FBH geliefert wurden.

Probenserie 1: Vom FBH wurde eine AlGaIn/GaN/AlN-Heterostruktur auf SiC-Substrat geliefert. Die Dicke der AlGaIn-Barriere betrug 17 nm , der mittlere Al-Gehalt ca. $x = 0.31$ (ermittelt durch FBH aus XRD-Messungen). Dies liegt über dem durchschnittlichen Al-Gehalt der Referenzprobe ($x = 0.25$). Ferner weisen Untersuchungen des FBH darauf hin, dass der Al-Gehalt in Richtung der Oberfläche ansteigt, was zu einer

Erhöhung der Barriere für den Stromtransport führen sollte. Die bisher auf den Referenz-Heterostrukturen entwickelten ohmschen Kontakte wurden auf den zur Verfügung gestellten Substraten mittels Elektronenstrahlverdampfen abgeschieden. Als aussichtsreichster Stapel wurde Ti/Al/Ni/Au mit den Schichtdicken 15/80/20/100 nm genutzt. Die Kontaktformierung wurde anschließend mittels RTA bei unterschiedlichen Temperaturen im Bereich von 700°C bis 900°C für 300 s in N₂ durchgeführt. Dabei wurde ein Kontaktwiderstand von 0,1 Ωmm erreicht, und das Projektziel von 0,2 Ωmm deutlich übertroffen.

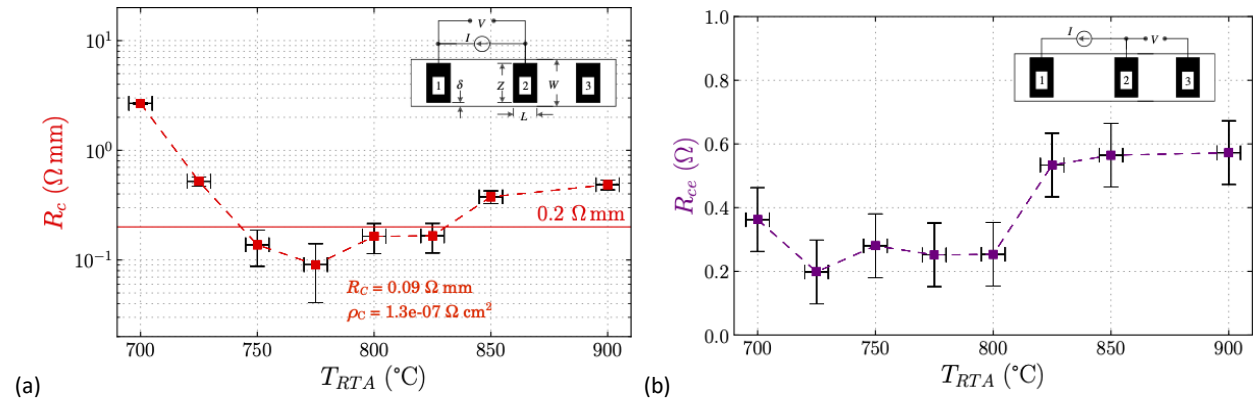


Abbildung 9: (a) Berechneter Kontakt(front)widerstand R_c zwischen Kontakt-Pad und Kanal, und (b) Kontakt-End-Widerstand zwischen Kontakt-Pad und Halbleitermaterial darunter für unterschiedliche Temperaturen im RTA-Schritt.

Neben dem Kontaktwiderstand wurde auch der Schichtwiderstand des 2D-Elektronengases (2DEG) in Abhängigkeit der Formierungstemperatur ermittelt und die Methode zur Kontakt-Endwiderstandsmessung (CER) am IAP etabliert (Abbildung 9). Diese ermöglichen eine separate Bestimmung der Schichtwiderstände des Halbleiters (2DEG) unter und zwischen den ohmschen Kontakten. Es konnte gezeigt werden, dass der Schichtwiderstand unter dem Kontakt durch Legierungsbildung deutlich geringer als im ungestörten Bereich der Heterostruktur ist (Abbildung 10). Dies ist auf Grund der Legierungsbildung zwischen Metall und Halbleiter nachvollziehbar, steht jedoch im Gegensatz zu der gängigen Annahme für die Auswertung der TLM-Strukturen, welche den Schichtwiderstand des Halbleiters als konstant annimmt. Effektiv führt die Reduktion des Schichtwiderstands unter dem Kontakt zu einer erhöhten Transferlänge bzw. einer weit homogenen Stromdichte unter dem Kontakt als bisher angenommen.

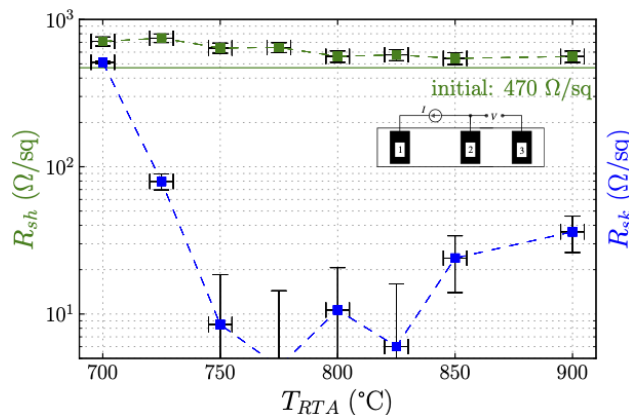


Abbildung 10: Schichtwiderstand im 2DEG (grün) und im Halbleitermaterial unter dem Kontakt-Pad (blau) für unterschiedliche Temperaturen im RTA-Schritt.

In einem weiteren Versuch auf vom FBH gelieferten Heterostrukturen mit einer nominellen AlN-Barriere von 8 nm wurde ein Kontaktwiderstand von $0,25 \Omega\text{mm}$ erzielt, dieser Wert liegt 25% über dem in AP 4.2 gesetzten Ziel von $0,2 \Omega\text{mm}$. Bei einer weiteren $\text{Al}_{0,31}\text{Ga}_{0,69}\text{N}$ -Barriere von 10 nm wurde ein Kontaktwiderstand von $0,7 \Omega\text{mm}$ erzielt. Die erzielten Kontaktwiderstände korrelieren nicht direkt mit dem Al-Gehalt in der Barriere oder der Barrierendicke. Die in AP 4.2.7 dargestellten Ergebnisse der mikrostrukturellen Charakterisierung legen nahe, dass es einen Zusammenhang zwischen der Ausbildung einer lokalen Kontaktierung und Versetzungen gibt. Weiterhin dürfte die Ausbildung des ohmschen Kontakts und der intermetallischen Phasen vom Verhältnis der Schichtdicken von AlGaN-Barriere zum Metallstapel abhängen. Im Vorhaben standen allerdings nicht genügend Proben mit unterschiedlicher Heterostrukturen zur Verfügung um dies detaillierter zu untersuchen.

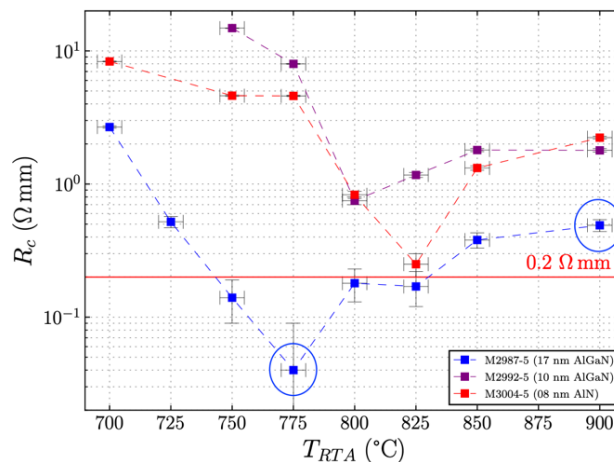


Abbildung 11: Kontaktwiderstand zu den ersten, vom FBH gelieferten Heterostrukturen mit unterschiedlichen AlGaN-Barrerien und nomineller AlN-Barriere für unterschiedliche Temperaturen im RTA-Schritt. TEM-Untersuchungen wurden an den blau eingekreisten Proben vorgenommen.

Probenserie 2: Bei einer angepassten Heterostruktur mit 14 nm $\text{Al}_{0,31}\text{Ga}_{0,69}\text{N}$ -Barriere (mit 2 nm GaN:Si-Cap, GaN-Channel und AlN-Buffer auf Saphir-Substrat) konnte mittels Ti/Al/Ni/Au-Kontaktierung ein R_c von $0,3 \Omega\text{mm}$ erreicht werden. Der RTA-Schritt fand bei 800°C für 300 s in N_2 in einem SiC-Suszeptor statt. Es konnte gezeigt werden, dass die Legierungszusammensetzung des Metallstapels aus den Referenzversuchen (Probenserie 1) auf das FBH-Material mit erhöhtem Al-Gehalt übertragen werden kann. Ein optimaler Kontaktwiderstand wurde nach RTA bei 775°C erreicht, höhere Temperaturen führten zu einer Degradation der Leitfähigkeit im 2DEG und erhöhten damit den Schichtwiderstand unter dem Kontakt, was wiederum zu einem erhöhten Kontaktwiderstand führte. Mit den optimierten Au-freien gesputterten V/Al/Ti/TiN-Kontakten konnte hingegen nur ein Kontaktwiderstand von $2.18 \Omega\text{mm}$ erreicht werden. Die Ursache scheint im höheren Aluminiumgehalt der Barriere und dem im Vergleich zu den Au-haltigen Kontakten unterschiedlichem Kontaktierungsmechanismus zu liegen. Au-freie Kontakte bilden keine Durchbrüche zum 2DEG und sind deshalb auf eine effektive Dotierung des Substratmaterials angewiesen, welche bei erhöhtem Al-Gehalt erschwert wird.

Probenserie 3: Bei Proben auf Saphir-Substrat mit AlGaN-Barriere (Al-Gehalt $x = 0,3$) konnte mit optimierten Ti/Al/Ti/TiN-Stapeln ein Kontaktwiderstand von $0,45 \Omega\text{mm}$ erreicht werden. Die Proben zeigten einen mit $<500 \Omega/\text{sq}$ deutlich reduzierten Schichtwiderstand im Vergleich zu Proben mit AlGaN-Referenzbarriere (Al-Gehalt $x=0,25$, $R_{\text{sh}} \approx 550 \Omega/\text{sq}$).

Probenserie 4: Auf Proben auf SiC-Substrat mit AlGaN-Barriere (Al-Gehalt $x = 0,31$) konnte ein Kontaktwiderstand von $0,4 \Omega\text{mm}$ erreicht werden. Eine starke Abhängigkeit des Kontaktwiderstands von der Al-Dicke im Ti/Al/Ni/Au-Kontaktstapel wurde festgestellt. Die Substrate zeigten einen, im Vergleich zur Probenserie 3, nochmals geringeren Schichtwiderstand von $400 \Omega/\text{sq}$.

Probenserie 5: Auf Proben auf SiC-Substrat mit AlGaN-Barriere (Al-Gehalt $x = 0,31$) konnte mit Ti/Al/Ni/Au (30/80/20/100 nm) ein Kontaktwiderstand von $0,68 \Omega\text{mm}$ erreicht werden nach einem RTA-Schritt bei 850°C für 300 s in N_2 . Außerdem wurden Zr-basierte Kontaktstapel hergestellt, wobei Zr/Al gesputtert und Ni/Au per Elektronenstrahlverdampfen prozessiert wurde. Mit Zr/Al/Ni/Au (30/80/20/100 nm) konnte nach RTA bei 825°C ein im Vergleich zum Ti-Stapel reduzierter Kontaktwiderstand von $0,21 \Omega\text{mm}$ erreicht werden (Abbildung 12).

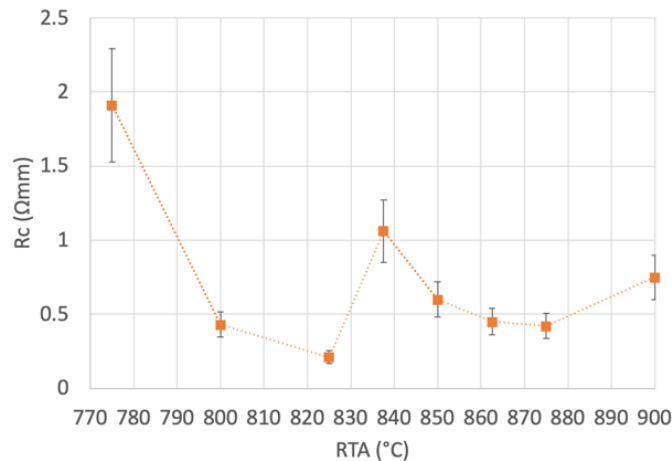


Abbildung 12: Erreichter Kontaktwiderstand für unterschiedliche RT-Temperaturen und Zr/AlNi/Au-Kontakte (30/80/20/100 nm) bei einer $14 \text{ nm Al}_{0,31}\text{Ga}_{0,69}\text{N}$ Barriere.

Durch die im Projektverlauf signifikant verbesserte Qualität der Epitaxie, der damit reduzierten Defektdichte und den hohen Al-Gehalt der Barriere wird die Ausbildung eines niederohmigen Kontakts ohne zusätzlichen Prozessschritten zur Modifikation der Kontaktbereiche vor der Metallisierung erschwert. Neben dem Rückätzen der Barriere (AP 4.2.3) oder einer lokalen Dotierung durch Implantation (AP 4.2.4), lieferten Versuche mit einem Zr-basierten Kontaktstapel vielversprechende erste Ergebnisse.

AP 4.2.7 Mikrostrukturelle Aufklärung der Formierung ohmscher Kontakte für AlN

In enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IISB und dem Lehrstuhl für Elektronische Bauelement (LEB) der Friedrich-Alexander-Universität wurden die Korrelationen der strukturellen Defekte und deren Einfluss auf die elektrischen Kenngrößen untersucht. Darüber hinaus wurde am IAP die Oberflächenrauheit der Kontakte mittels Laser-Konfokalmikroskopie verglichen.

Laser-Konfokalmikroskopie: Untersuchungen zeigten eine Zunahme der Rauheit bei Zunahme der Dicke der abgeschiedenen Metallstapel, wobei die Rauheit erst in Folge der Legierungsbildung mit dem Substrat

und nach der Kontaktformierung entsteht. Die geringste Rauheit für Ti/Al/Ni/Au-Kontakte lag bei 92 nm (Abbildung 13). Die Rauheit konnte durch die Verwendung eines Au-freien V/Al/Ti/TiN-Kontaktstapels um mehr als 96% auf 4 nm reduziert werden. Diese Kontakte weisen somit eine besonders gute Eignung für die Herstellung von Hochfrequenzbauelementen mit kleinen Strukturbreiten auf.

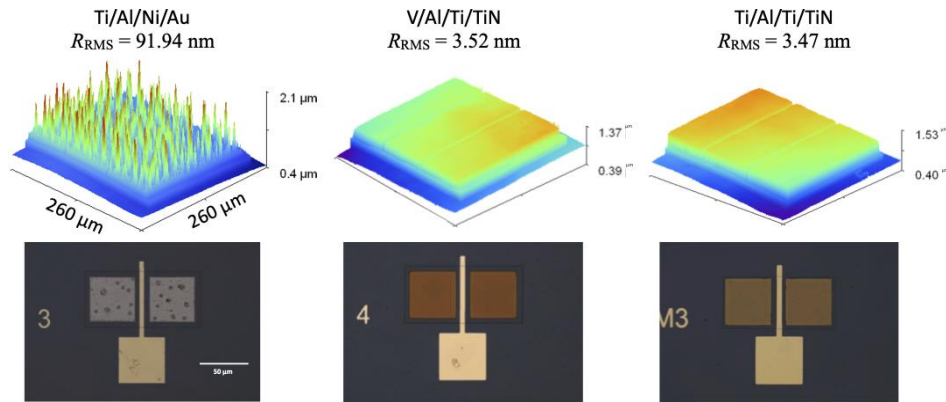


Abbildung 13: Konfokalmikroskopische Untersuchungen an verschiedenen Au-basierten und Au-freien Kontaktstapeln auf Referenz-Heterostrukturen (Garbe, 2023).

Transmissionselektronenmikroskopie (TEM): Weitere Proben wurden mit Hilfe des LEB am TEM mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) und Elektronenenergieverlustspektroskopie (EELS) untersucht. Bei Au-freien Ti/Al/Ti/TiN-Kontakten bildete sich hauptsächlich Al_3Ti , welches von einer Ti_2AlN MAX-Phase in Richtung GaN-Cap und TiN-Cap eingeschlossen wird. Die Schichten wachsen epitaktisch und damit geschlossen und sowie sehr homogen auf (Abbildung 14). Dennoch ist die Leitfähigkeit von Ti_2AlN anisotrop und geringer als für TiN (Haddad, 2008; Zhou, 2000). Am GaN/ Ti_2AlN -Interface bleibt trotz HCl-Reinigung eine dünne Sauerstoffbarriere zurück, die den Elektronentransport über die Grenzfläche limitiert. Der Kontaktwiderstand zum 2DEG ist bei diesem Kontaktstapel erhöht.

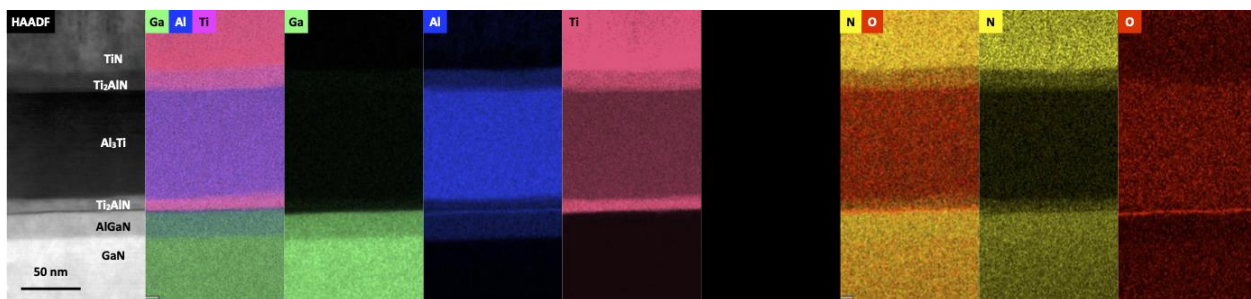


Abbildung 14: HAADF und EDX an Au-freien Ti/Al/Ti/TiN Kontaktstapeln auf Standard AlGaIn-Substrat. (Garbe, 2023)

Im Gegensatz dazu liegt bei V/Al/Ti/TiN-Kontakten das Vanadium an der Metall/Halbleiter-Grenzfläche in Clustern vor und bindet den verbliebenen Sauerstoff lokal (Abbildung 15). Weite Bereiche der Grenzfläche sind dadurch vollständig frei von Sauerstoff, wodurch die Ausbildung eines niederohmigen GaN/ $Al_3(V,Ti)$ -Kontaktes ermöglicht wird. Das TiN-Capping wächst säulenartig und durch die lokalen Vanadium-Cluster leicht verspannt auf.

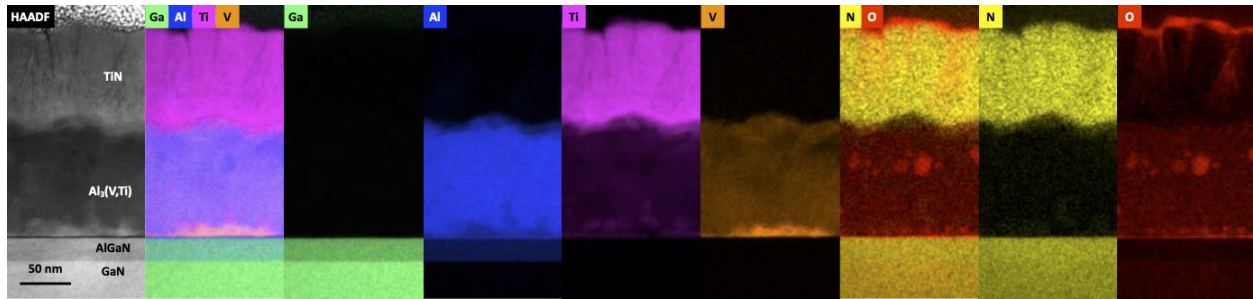


Abbildung 15: HAADF und EDX an Au-freien V/Al/Ti/TiN Kontaktstapeln auf Standard AlGaIn-Substrat. (Garbe, 2023)

Mittels HAADF-STEM konnte die epitaktische Beziehung der gebildeten Phasen im Ti/Al/Ti/TiN-Stapel gezeigt werden (Abbildung 16). Zu erkennen ist die kubische Al_3Ti -Phase, eingebettet in die hexagonale Ti_2AlN -MAX-Phase. Der geringe Lattice-Mismatch zwischen Ti_2AlN und Al_3Ti wird durch wellenartiges Wachstum kompensiert. (Han, 2020)

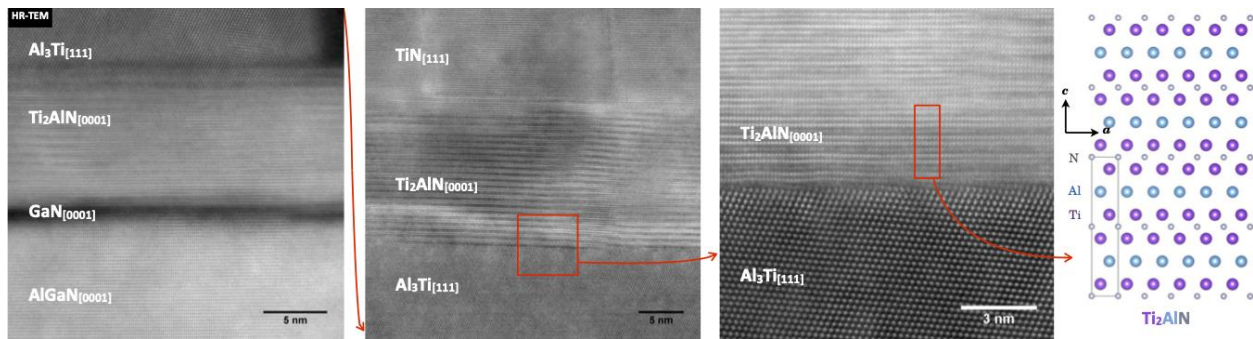


Abbildung 16: HAADF-STEM an Au-freien Ti/Al/Ti/TiN Kontaktstapeln auf Standard AlGaIn-Substrat.

Im V/Al/Ti/TiN-Stapel zeigt sich hingegen das tetragonale $Al_3(V,Ti)$, welches Spannungen im Gitter aufweist, eine lokal unterschiedliche V:Ti Zusammensetzung hat, und Spuren von Sauerstoff enthält. Das TiN-Cap zeigt kolumnare Kristallite und polykristalline Eigenschaften. Die Kristallite sind leicht zueinander verkippt, TiN-Domänen mit Kleinwinkelkorngrenzen sind gut zu erkennen (Abbildung 17).

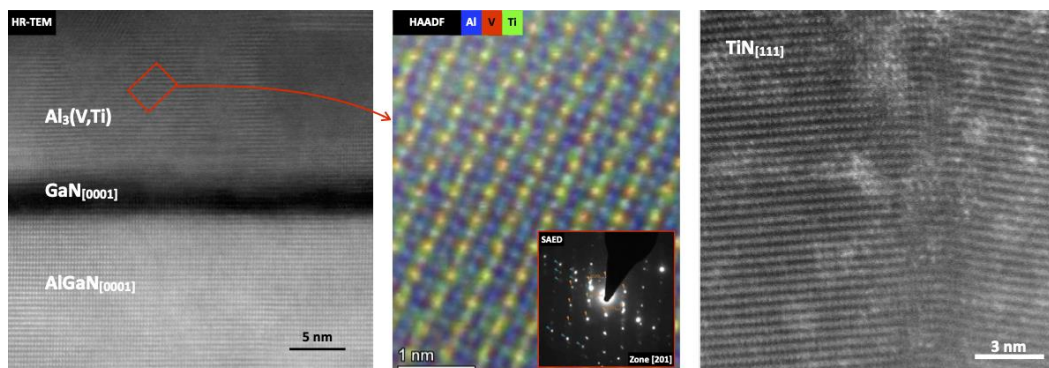


Abbildung 17: HAADF-STEM, SAED und HAADF/EDX an Au-freien V/Al/Ti/TiN Kontaktstapeln auf Standard AlGaIn-Substrat. Im TiN Capping sind Verkipfungen einzelner Körner und Kleinwinkel-Korngrenzen sichtbar.

Während bei Au-freien Kontaktstapeln ein epitaktisches Aufwachsen der Metalle auf die Heterostruktur beobachtet wurde, konnte gezeigt werden, dass es bei Au-haltigen Kontakten zu lokalen Durchbrüchen zum 2DEG kommt. Dies führt zu einer direkt, elektrisch leitfähigen Verbindung zwischen Kontaktmetallisierung und 2DEG. Abbildung 18 zeigt die schematische Schichtstapel und die per Focused-Ion-Beam (FIB) präparierte TEM-Lamelle von Ti/Al/Ni/Au auf AlGaN/GaN/AlN/SiC nach der Kontaktformierung bei 775°C. Zum Vergleich wurden Untersuchungen an einer nicht getemperten als auch einer bei 900°C getemperten Probe durchgeführt.

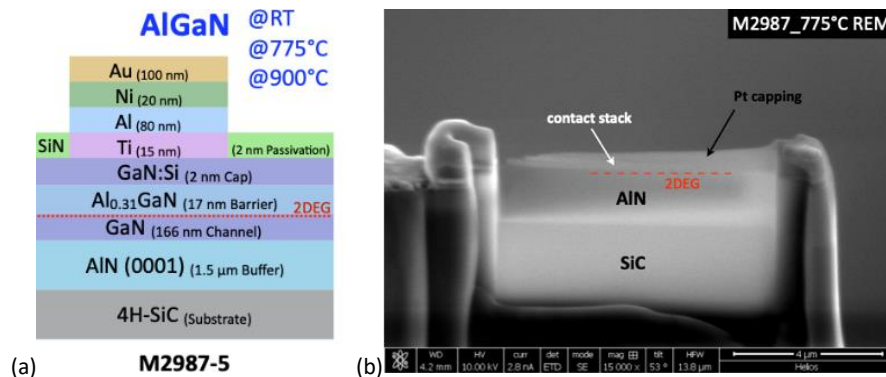


Abbildung 18: (a) Schematische Darstellung des Au-Kontaktstapels auf Al_{0.31}Ga_{0.69}N/GaN/AlN und (b) REM-Aufnahme einer per FIB-präparierten TEM-Lamelle durch Kontaktstapel und Heterostruktur.

Abbildung 19 zeigt für die nicht getemperte Probe ein einkristallines, nahezu defektfreies Substrat mit sehr guten Epitaxie-Eigenschaften. Ti aus dem Kontaktstapel wächst nanokristallin und sehr gleichmäßig auf, Al wächst mit großen einkristallinen Domänen unterschiedlicher Orientierung säulenförmig auf.

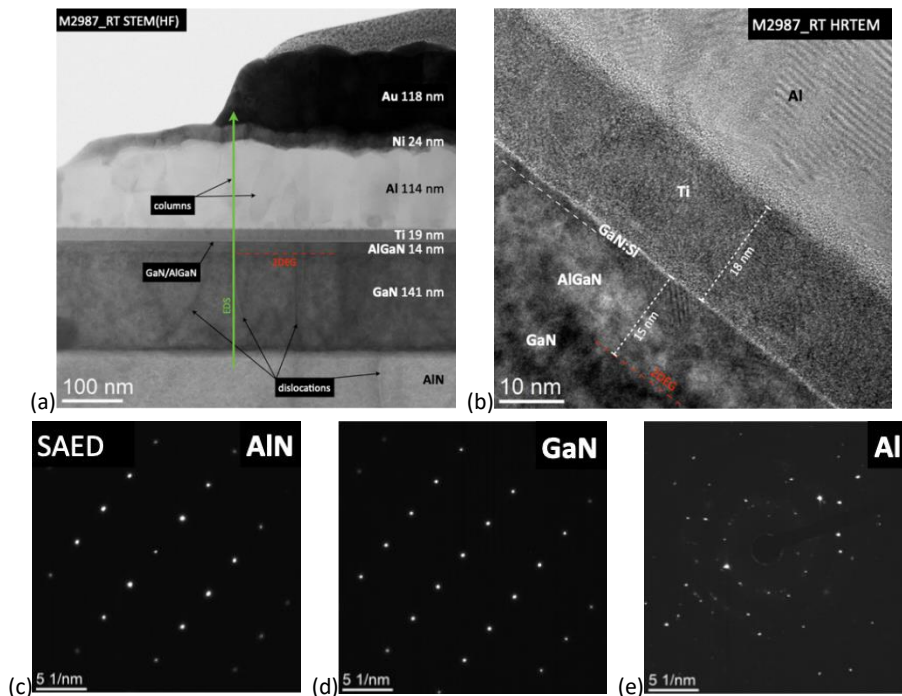


Abbildung 19: (a) STEM/EDS-Übersicht des nicht getemperten Au-haltigen Kontaktstapels auf Al_{0.31}Ga_{0.69}N/GaN/AlN vor der Kontaktformierung (RTA). Das Al zeigt ein säulenförmiges Wachstum, Versetzungen im Substrat sind sichtbar. (b) HR-TEM der Grenzfläche Heterostruktur/Kontaktstapel, und SAED-Aufnahmen von AlN (c), GaN (d) und Al (e).

Nach dem thermischen RTA-Formierungsschritt bilden sich im Vergleich zur nicht getemperten Probe große Ti/Au-Durchbrüche vom Metallstapel in den GaN-Kanal aus (Abbildung 20). Die lokalen Durchbrüche reichen bei steigender RTA-Temperatur tiefer und besitzen eine größere laterale Ausdehnung (Abbildung 20). Ein Optimum des R_c wurde bei 775°C erzielt. Bei höheren RTA-Temperaturen (900°C) wird durch das Wachstum der Durchbrüche die Heterostruktur und damit das 2DEG geschädigt. Dies führt zu einem erhöhten Schichtwiderstand unter dem Kontakt und damit zu einem höheren RC (vgl. AP 4.2.6). Die elektrischen und strukturellen Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Kontaktformierungs-Temperatur (RTA), Tiefe der lokalen Durchbrüche, resultierender Kontaktwiderstand R_c , und resultierender Schichtwiderstand im Halbleitermaterial unter dem Kontakt (R_{sk}).

RTA [°C]	Tiefe Durchbruch [nm]	R_c [$\Omega \cdot \text{mm}$]	R_{sk} [Ω/sq]
775	45	0.09	4.4
900	80	0.50	36.8

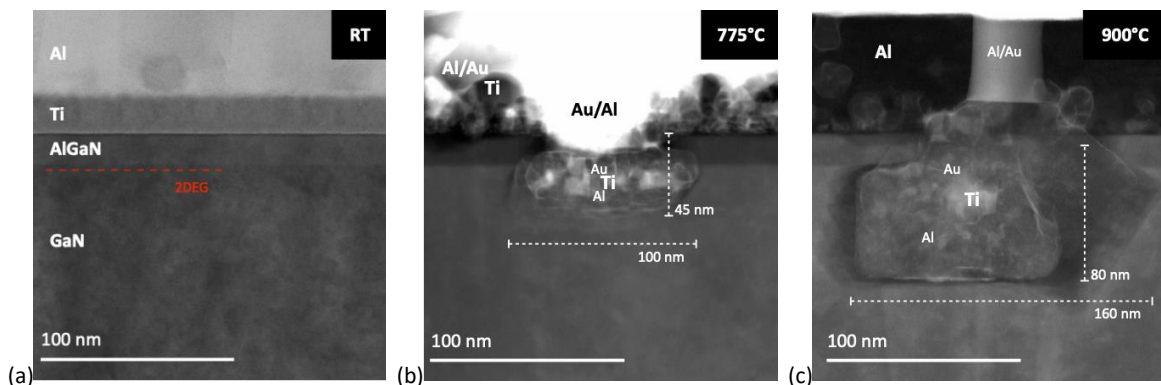


Abbildung 20: TEM-Aufnahmen zeigen die Metall/Halbleiter Grenzfläche für den Au-haltigen Kontakt (a) vor dem Anneal. (b) Nach RTA bei 775°C bilden sich metallische Durchbrüche zum 2DEG aus. (c) Nach RTA bei 900°C wachsen die Durchbrüche weiter an und schädigen das 2DEG.

AP 4.3.2 Übertragung der entwickelten Prozessmodule auf FBH-Prozesslinie

Zusammen mit dem FBH wurde die Integration der am IAP entwickelten Prozessmodule für niederohmige Kontakte in den Gesamtprozess der FBH-Prozesslinie vorgenommen. Dabei galt es vor allem die unterschiedlichen thermischen Budgets der RTA-Systeme von IAP und FBH zu vergleichen. Dafür wurden in einem Kreuzvergleich durch das FBH vorstrukturierte Wafer bereitgestellt und zwei unterschiedliche Metallstapel am IAP abgeschieden. Die Wafer wurden anschließend zurück ans FBH transferiert, wo der lift-off durchgeführt und die Wafer in Shots gesägt wurden. Die Shots wurden anschließend am IAP oder am FBH mit den jeweiligen RTA-Rezepten getempert. Der geringste erreichte Kontaktwiderstand betrug in guter Übereinstimmung jeweils 0,5 Ωmm , wobei dieser Wert am FBH bei 800°C und am IAP bei 875°C erreicht wurde (Abbildung 21). Die Unterschiede ergeben sich aus den verwendeten RTA-Systemen, welche auf Grund ihrer Heizleistung, dem verwendeten Suszeptor und der Art der Temperaturmessung (Thermoelement bzw. Pyrometer) unterschiedlich träge sind. Es ist davon auszugehen, dass die reale

Temperatur am Kontakt für das Erreichen desselben Kontaktwiderstands identisch ist. Die am IAP entwickelten und hier verwendeten Stapelfolgen und Schichtdicken der ohmschen Kontakte wurden ans FBH transferiert.

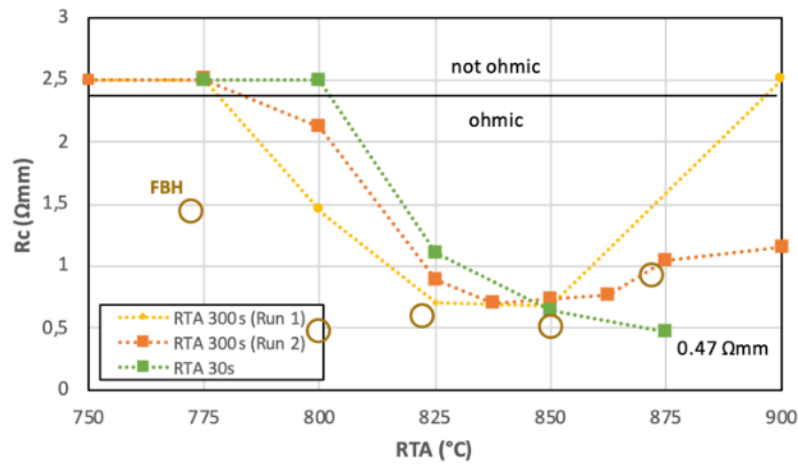


Abbildung 21: Kontaktwiderstände der am IAP hergestellten optimierten Ti/Al/Ni/Au-Stapel auf $\text{Al}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}$ -Heterostruktur nach RTA für 300 s und 30 s. Zum Vergleich sind die Ergebnisse nach dem RTA am FBH angegeben (offene Kreise).

AP 4.3.4 Testrun: AlN mm-Wellen-Bauelemente auf 1-Zoll AlN

Das IAP stellte dem FBH die Prozessmodule für die ohmschen Kontakte zur Verfügung (s. AP 4.3.2) und begleitete die Prozesse.

AP 4.3.5 Testrun: AlN Hochvolt-Bauelemente auf 1-Zoll AlN

Das IAP stellte dem FBH die Prozessmodule für die ohmschen Kontakte zur Verfügung (s. AP 4.3.2) und begleitete die Prozesse.

AP 7.3.1 Elektrische Defektspektroskopie

Die Durchführung von DLTS-Messungen erfordert sowohl die Herstellung eines gut leitfähigen ohmschen, als auch eines sperrenden Schottky-Kontakts. Soll der ohmsche Kontakt auf AlN hergestellt werden, ist i.d.R. eine n-Dotierung mit Si notwendig. Eine Dotierung mittels Implantation stand am FBH erst sehr spät im Projekt zur Verfügung (s. Verzögerung, Kapitel 2). Weiterhin waren keine n-dotierten AlN-Einkristalle am LEB verfügbar. Durch die genannten Verzögerungen war es den Projektpartnern nicht mehr möglich spezielle Hetero-Strukturen oder AlN-Substrate nur für DLTS-Messungen herzustellen. Der Fokus wurde daher auf das Erreichen der übergeordneten Projektziele und Meilensteine gerichtet. Als Ausgleich wurde die nicht von den Verzögerungen betroffene *operando* Ramanmethode (AP 7.3.3) stärker vorangetrieben. Zusätzlich wurde ein Antrag für eine Messzeit am ESRF in Grenoble bewilligt. Die dort durchgeführten nanoXRD-Messungen werden zur Kalibrierung der Raman-Messungen herangezogen. Am IAP steht mittlerweile jedoch ein Kryostat für temperaturabhängige Messungen von 5 K bis 800 K zur Verfügung. Optisch können Defekte mit einer Wellenlänge von 213 nm (5.82 eV) oder größer angeregt werden. Die Durchführung von optisch angeregten (O-DLTS) und DLTS-Messungen bei höheren Temperaturen, ist somit zumindest bei Al-reichen AlGaN-Schichten möglich.

AP 7.3.2 Optische Defektspektroskopie

Die optische Untersuchung der Aluminium-Nitrid-Wafer (AlN) wurde mithilfe der Photolumineszenzspektroskopie (PL) durchgeführt. Dabei wurden Anregungswellenlängen von 325 nm, 442 nm und 532 nm verwendet, um verschiedene energetische Übergänge zu charakterisieren. Defektcluster mit einer Ausdehnung von mehreren Mikrometern konnten detektiert werden.

Die Analyse der Photolumineszenz-Spektren zeigt das Vorhandensein unterschiedlicher Defektspezies. Aus Literaturwerten können PL-Signale im Bereich von 620 nm Sauerstoff-Vakanz-Komplexen $(V_{Al}^-O_N)^-$ zugeordnet werden. Aluminium-Vakanzen zeigen laut Literaturwerten charakteristische Emissionen im Wellenlängenbereich von 450 nm (V_{Al}^{3-}) und 494 nm (V_{Al}^{2-}) . Ein Übergang von V_{Al}^{3-} zu V_{Al}^{2-} könnte zu dem PL-Signal bei 515 nm führen. Der optische Übergang innerhalb der Defektbanden des Kohlenstoff-Vakanz-Komplexes $(C_N V_N)$ wird mit einem PL-Signal bei einer Wellenlänge von 590 nm in Verbindung gebracht. Die verschiedenen Defektspezies treten flächig auf und scheinen als eine Art Hintergrundverunreinigung über den gesamten Wafer verteilt zu sein. Die Ursache für einzelne Defekt-Cluster mit erhöhter PL-Intensität bleibt jedoch noch ungeklärt. Strukturelle Defekte könnten die Akkumulation von Punktdefekten begünstigen.

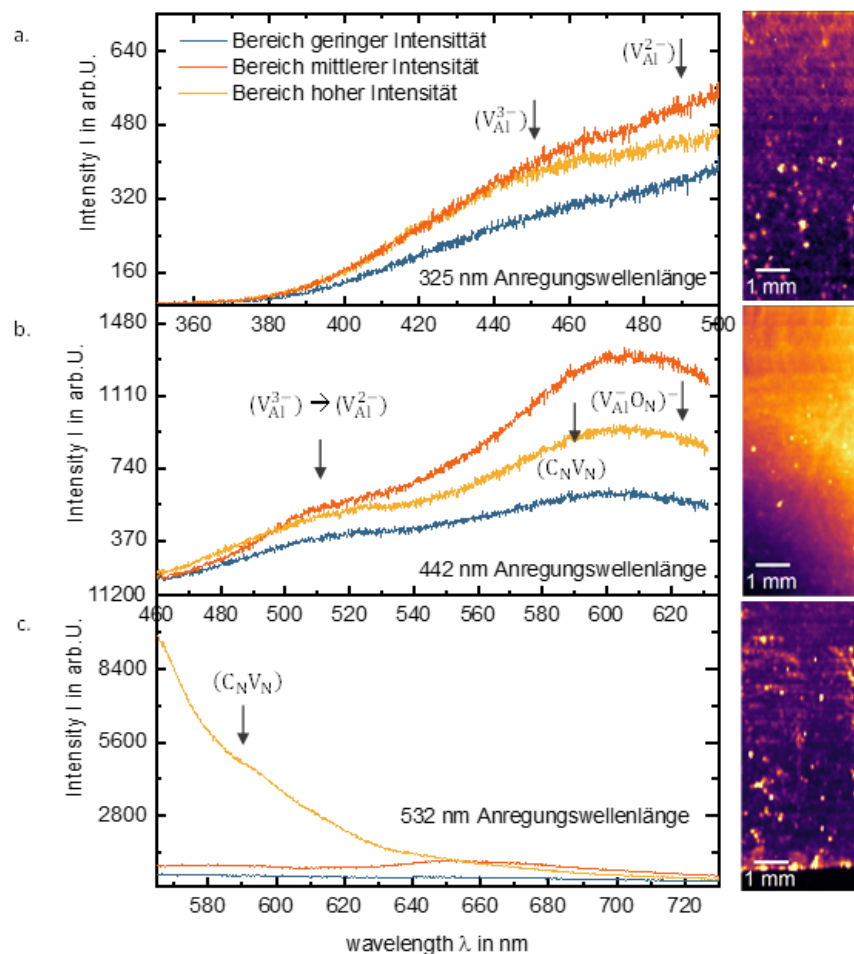


Abbildung 22: Links sind repräsentative Spektren des AlN-Wafers bei verschiedenen Anregungswellenlängen dargestellt. Rechts befinden sich die zugehörigen Intensitätsmappings bei den folgenden Wellenlängen: a. 440 nm sowie b. und c. 615 nm.

AP 7.3.3 Untersuchung von Aufwärmeeffekten in aktiven Bauelementen

Ein Setup für *operando* Raman-Messungen an AlN-basierten Leistungstransistoren wurde im Rahmen des Vorhabens entwickelt und realisiert. Der Laser kann dabei durch die Substratrückseite eingekoppelt und innerhalb des Kanals fokussiert werden. Dadurch werden Messungen in Bereichen ermöglicht, die durch die Isolation bzw. Gate- oder Feldplattenmetallisierung von der Vorderseite nicht zugänglich sind (Abbildung 23). Die laterale Auflösung liegt im Bereich von etwa $1\ \mu\text{m}$. Mit dem Versuchsaufbau ist eine orts aufgelöste Messung innerhalb des Kanals möglich, da der typische Source-Drain-Abstand der vom FBH zur Verfügung gestellten Leistungsbauelemente bei etwa $(10\text{-}20)\ \mu\text{m}$ lag. Die Anregung erfolgte mittels eines frequenzverdoppelten Nd:YAG Lasers bei $532\ \text{nm}$ Wellenlänge.

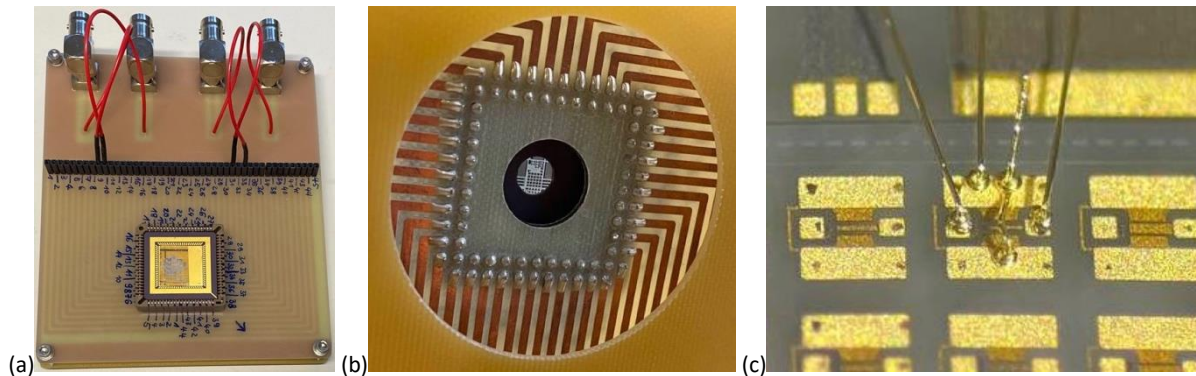


Abbildung 23: Angefertigter Probenhalter für *operando* Raman-Messungen: (a) Probenhalter, (b) Rückseite des Probenhalters mit Öffnung für Laser, (c) Kontaktierung eines HEMTs mit Bonddrähten.

Messungen an den vom FBH zur Verfügung gestellten Transistoren wurden für unterschiedliche Geometrien und Feldplatten sowie bei unterschiedlichen Betriebszuständen (V_{ds} , V_{gs}) durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass es im angeschalteten Zustand zu einer Verschiebung der Phononenmoden von AlN und SiC (Substrat) kommt, was auf eine lokale Erwärmung des Bauelements schließen lässt (Abbildung 24). Der Effekt tritt bei gleicher V_{ds} nicht auf, wenn $V_{gs} < V_{th}$. Das SiC-Substrat dient auf Grund seiner guten Wärmeleitfähigkeit als Wärmesenke.

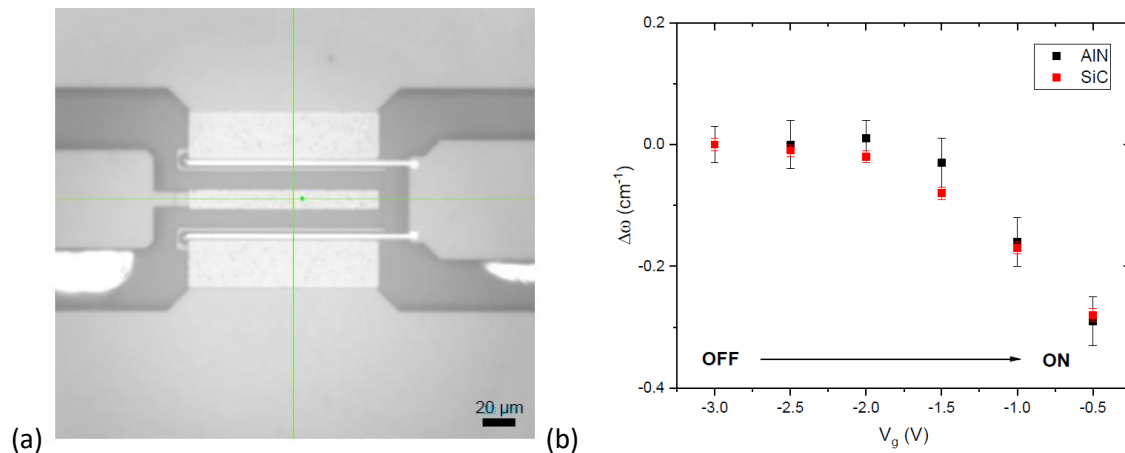


Abbildung 24: (a) Die Lichtmikroskopische Aufnahme des Transistors durch die Substratrückseite ermöglicht den Blick unter die Feldplatten. (b) Relative Verschiebung der Phononenmoden von AlN ($657,9\ \text{cm}^{-1}$) und SiC ($776,8\ \text{cm}^{-1}$) bei Stromfluss im angeschalteten Zustand.

Entlang des Kanals konnten dagegen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Da die Wärmeleitfähigkeit von AlN hoch ist, stellt sich innerhalb des Kanals zumindest bei der gegebenen Bauteilgeometrie (Gateweite von $100\ \mu\text{m}$) und Stromdichte eine homogene Temperatur ein. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass bei Transistoren mit größer Gateweite und mehreren parallelen Gates die Wärme nicht mehr ausreichend abgeführt werden kann und Temperaturgradienten auftreten. Die Ergebnisse wurden als Posterbeitrag auf der GADEST 2024 vorgestellt und sind Teil einer erfolgreich abgeschlossenen studentischen Projektarbeit. Weiterhin soll durch die Ergebnisse der nanoXRD-Messungen, die am ESRF in Grenoble durchgeführt wurden, eine Temperaturkalibrierung der Raman-Messungen ermöglicht werden. Der Antrag auf Messzeit am ESRF wurde im Jahr 2023 gestellt. Die Messungen konnten schließlich im Oktober 2024 durchgeführt werden. Die Daten werden zum Zeitpunkt der Berichtabgabe noch ausgewertet. Erste Ergebnisse sind in Abbildung 25

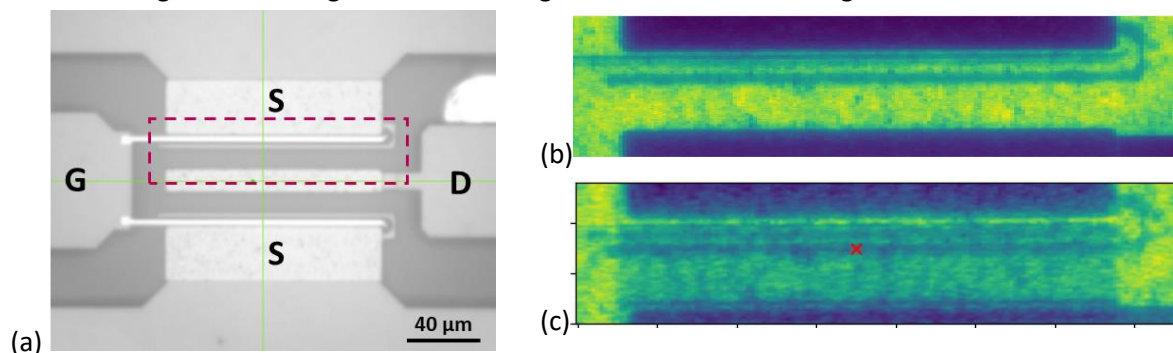


Abbildung 25: (a) Lichtmikroskopische Aufnahme des kontaktierten HEMTs von der Substratoberseite mit Bereich für die nanoXRD-Messung. (b) Summe der Intensität des (11-2-6) Reflexes in GaN/AlGaN (c) Lokal kompressive Verspannung der GaN-Schicht im Kanal.

4 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die bewilligten Mittel des Teilprojekts inkl. Projektpauschale betragen $460.053,60\ \text{€}$. Es entstanden Aufwendungen von $347.223,87\ \text{€}$ für Personal, $29.438,49\ \text{€}$ für Verbrauch (Reinraum, Chemikalien, Prozessgase, Metalle, Messspitzen und sonstiges) sowie $5.935,85\ \text{€}$ für Reisekosten. Die Projektpauschale betrug $76.519,64\ \text{€}$.

5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Projektarbeiten wurden im beantragten Umfang inkl. der sechsmonatigen Verlängerung geleistet. Die Verlängerung wurde notwendig, da einige Arbeiten auf Grund äußerer Umstände wie der Covid19-Pandemie und Lieferschwierigkeiten nur mit erheblicher Verzögerung möglich waren. Das IAP war im Wesentlichen an Meilenstein M3 beteiligt, welcher erfüllt wurde. Darüber hinaus wurde der Technologietransfer für die ohmschen Kontakte an das FBH vollzogen.

6 Fortschreibung des Verwertungsplans

Ein wesentlicher Trend in der Leistungselektronik ist der zunehmende Einsatz und die Forschung auf dem Bereich von wide- und ultra-wide-bandgap Materialien. Dabei stellen HEMTs mit Al-reicher AlGa_N-Barriere und AlN-Buffer nur einen ersten Schritt dar. Mit zunehmender Bandlücke wird insbesondere die ohmsche Kontaktierung der Source/Drain-Gebiete erschwert. Der zukünftige Einsatz von Materialien wie Ga₂O₃, AlN und Diamant erfordert ein tiefgehendes Verständnis der Kontaktbildungsmechanismen. Durch die im Projekt LeitBAN durchgeführten Untersuchungen konnte ein grundlegendes Verständnis der ohmschen Kontaktbildung auf AlGa_N/Ga_N aufgebaut werden, welches den Partnern für zukünftige Forschungsarbeiten und Entwicklungen zur Verfügung steht. Methoden zur elektrischen, defektspektroskopischen und mikrostrukturellen Charakterisierung wurden entwickelt und stehen nun ebenfalls zur Verfügung. Neben einer Promotion wurden im Rahmen des Vorhabens drei studentische Arbeiten abgeschlossen, sowie drei Publikationen und fünf Konferenzbeiträge veröffentlicht. Das im Projekt erworbene Know-how kommt damit der Ausbildung von Doktoranden und Studenten zu Gute und ermöglicht dem IAP die Fortführung der Arbeiten in weiteren Förderprojekten und Industriekooperationen. Die *operando* Raman-Messung zur orts aufgelösten Temperaturbestimmung soll zukünftig methodisch weiterentwickelt und mittels der Ergebnisse der nanoXRD-Messungen kalibriert werden.

7 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Laufe des Projekts wurden uns keine wesentlichen Fortschritte auf dem Gebiet des Teilvorhabens bekannt, welche einer Verwendung der erreichten Ergebnisse im Wege stehen oder widersprechen würden. Insbesondere die Herstellung von Au-freien, CMOS-kompatiblen ohmschen Source-/Drain-Kontakten mit einem Kontaktwiderstand $< 0.1 \Omega\text{mm}$ und einer sehr geringen Rauheit stellt ein wesentliches Projektergebnis dar. Vergleichbar geringe Kontaktwiderstände werden sonst nur durch zusätzliche Prozessschritte wie Ionenimplantation, Rückätzen der Barriere und/oder Ga_N regrowth erreicht. Für Au-haltige Kontakte konnte darüber hinaus auch bei Al-reicher Barriere ein sehr geringer R_c von unter $0.2 \Omega\text{mm}$ erzielt werden.

8 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Folgende wissenschaftliche und studentische Arbeiten sind im Rahmen des Projektes entstanden:

- Promotion: Valentin Garbe: "Highly Efficient CMOS Compatible Ohmic Contacts for WBG Nitride Power Devices" (verteidigt am 13.12.2024)
- Projektarbeit: J. Schwarz: "*Operando analysis of investigation of self-heating effects on AlN-based HEMTs on SiC by micro Raman spectroscopy*", 14.08.2023
- Projektarbeit: N. Siebdrath: "*Analysis of self-heating effects in High Electron Mobility Transistors using micro Raman thermometry*", 06.05.2022
- Masterarbeit: Junfeng Zhang: „*Ohmic Contacts to AlN/GaN Heterostructures*“, 10.02.2021

Folgende Konferenzbeiträge sind im Rahmen des Projektes entstanden:

- 2021: Compound Semiconductor Week (CSW 2021) Stockholm/online, Vortrag:
V. Garbe, A. Schmid, S. Seidel, B. Abendroth, E. Mehner, H. Stöcker, S. Leone, P. Doering, J. Heitmann: *“Formation of Au-free ohmic contacts and their influence on the 2DEG in AlGaN/GaN-heterostructures”*
- 2022: E-MRS Fall Meeting 2022 in Warschau, Poster:
N. Siebdrath, C. Röder, A. Schmid, J. Heitmann: *“Analysis of self-heating effects in high electron mobility transistors using micro-Raman thermometry”* (G.P1.8)
- 2022: International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2022) in Berlin, Poster:
V. Garbe, P. Döring, A. Schmid, J. Heitmann: *“On the Formation Mechanism of Au-free Ohmic Contacts for AlGaN/GaN-HEMTs”* (PP 135, Poster Session 2)
- 2024: GaN-Marathon 2024 Verona/Italien, Poster:
V. Garbe, S. Seidel, A. Schmid, U. Bläß, E. Meissner, J. Heitmann: *„Formation mechanism of V/Al/Ti/TiN ohmic contacts for AlGaN/GaN HEMTs“*
- 2024: Gettering and Defect Engineering in Semiconductor Technology (GADEST 2024), Poster:
C. Röder, J. Schwarz, A. Schmid, O. Hilt, Franziska C. Beyer, und J. Heitmann: *“Operando analysis of self-heating effects on AlN-based HEMTs on SiC by confocal micro-Raman spectroscopy”*

Folgende Publikationen sind im Rahmen des Projektes entstanden:

- V. Garbe, A. Schmid, J. Heitmann, et al.: *“Au-Free Ohmic Contacts and their Impact on Sub-Contact Charge Carrier Concentration in AlGaN/GaN Heterostructures”*, Phys. Status Solidi B, **259**, 2100312 (2022). <https://doi.org/10.1002/pssb.202100312>
- Seidel S., Garbe V., Schmid A., Heitmann, J.: *“High- κ Gate Oxide Integration and Ohmic Contact Development for AlGaN/GaN MISHEMTs”*, ECS Trans., **108**(2), 1050-1050 (2022). <http://dx.doi.org/10.1149/10802.0003ecst>
- V. Garbe, S. Seidel, A. Schmid, U. Bläß, E. Meissner, and J. Heitmann, *“Ultra-low resistance Au-free V/Al/Ti/TiN ohmic contacts for AlGaN/GaN HEMTs”*, Applied Physics Letters, **123**(20), 203506 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0171168>

9 Literaturverzeichnis

- Blank, T. V. (2007). *Semiconductors* 41, 1263–1292. doi:10.1134/S1063782607110012
- D. Selvanathan. (2004). *J. Vac. Sci. Technol. B* 22, 2409. doi:10.1116/1.1798811
- Daele, B. v. (2005). *Appl. Phys. Lett.* 87, 61905. doi:10.1063/1.2008361
- Erlbacher, T. (2012). *Phys. Status Solidi C* 9, 968-971. doi:10.1002/pssc.201100341
- Fan, Z. (1996). *Appl. Phys. Lett.* 68, 1672. doi:10.1063/1.115901
- Garbe, V. (2023). *Appl. Phys. Lett.* 123(20), 203506. doi:10.1063/5.0171168
- Goldberg, Y. (2001). Properties of Adv. Semicon. Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. *John Wiley & Sons, Inc., New York*, 31-47.
- Haddad, N. (2008). *J. of Appl. Phys.* 104(2), 023531. doi:10.1063/1.2960340
- Han, X. (2020). *Composites Part B: Engineering* 185, 107794. doi:10.1016/j.compositesb.2020.107794
- Li, X. (2017). *J. Semicond.* 38, 116002. doi:10.1088/1674-4926/38/11/116002
- Okumura, H. (2018). *Jpn. J. Appl. Phys.* 57, 04FR11. doi:10.7567/JJAP.57.04FR11
- Schmid, A. (2015). *Appl. Phys. Lett.* 106, 53509. doi:10.1063/1.4907735
- Yamashita, H. (1979). *J. Appl. Phys.* 50, 896. doi:10.1063/1.326007
- Zhou, Y. (2000). *Phys. Rev. B* 61(19), 12570–12573. doi:10.1103/PhysRevB.61.12570