Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Fraunhofer
IAF

Verbundvorhaben:	**SALSA** Ferroelektrizität in ScAlN: Von der Entdeckung des Effekts zu disruptiven Bauelementen im Rahmen von **„Forschung für neue Mikroelektronik“**
Zuwendungsempfänger:	Fraunhofer-Gesellschaft **Institut für Angewandte Festkörperphysik**
Förderkennzeichen:	16ES1054
Laufzeit:	01.10.2019 – 31.03.2024
Berichtszeitraum:	01.01.2019– 31.03.2024
Projektleiter:	Dr. M. Mikulla (e-mail: michael.mikulla@iaf.fraunhofer.de)
Bearbeiter:	

Dr. R. Driad
A. Nair
M. Yassine
Dr. P. Waltereit
Dr. M. Mikulla

November 2024

Abschlußbericht

Erfolgskontrollbericht

im Sinne der Nebenbestimmungen für Zuwendungen auf Kostenbasis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (NKBF 98).

Zuwendungsempfänger:	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
Förderkennzeichen:	16ES1054
Vorhabensbezeichnung:	SALSA Ferroelektrizität in ScAlN: Von der Entdeckung des Effekts zu disruptiven Bauelementen Teilprojekt IAF
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2019 – 31.03.2024
Berichtszeitraum:	01.10.2019 – 31.03.2024

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Im Berichtszeitraum wurde am IAF an folgenden Arbeitsinhalten gearbeitet:

- Abscheidung von AlScN-Schichten mittels Magnetron-Sputterns
- Erarbeitung von Strukturierungsverfahren für AlScN-Schichten unter Verwendung von vorstrukturierten dielektrischen Masken
- Prozessierung erster vollständiger HEMT-Bauelemente mit AlScN in der Gate-Struktur
- Untersuchung des Schaltverhaltens von HEMT-Bauelementen mit AlScN in der Gate-Struktur

2. Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten) Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung.

Aufgrund von Verzögerungen in den Rainraumabläufen, Personalfluktuation und der eingeschränkten Verfügbarkeit von zentralen Anlagen (Sputter-Tool) liegen die Arbeiten nicht mehr im Zeitplan. In Abstimmung mit dem Koordinator der Verbundvorhabens wurde deshalb an Antrag auf eine Verlängerung der Projektlaufzeit um 6 Monate beim Projektträger gestellt.

3. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?

Die Aussichten für das Erreichen der Arbeitsziele sind teilweise nicht mehr gegeben. Das Ziel, Schaltverhalten im Transistor nachzuweisen, das sich auf das Umpolen der AlScN-Schicht unter dem Gate-Kontakt zurückführen lässt, konnte nicht erreicht werden.

4. Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind (auch Darstellung der aktuellen Informationsrecherchen nach Nr. 6.1 NKBF 98)?

In der folgenden Veröffentlichung wird über das Schaltverhalten von AlScN-HEMTs berichtet.

"Pulsed E-/D-Mode Switchable GaN HEMTs With a Ferroelectric AlScN Gate Dielectric",

J. Yong Yang et al., IEEE Electron Device Letters (Volume: 44, Issue: 8, August 2023),

DOI: 10.1109/LED.2023.3287913

5. Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?

Die finalen Projektziele konnten nicht erreicht werden.

6. Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans.

Der Verwertungsplan wird nicht weiterverfolgt.

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im Detail

1. Einleitung

Im Rahmen des Einzelvorhabens erforscht das Fraunhofer IAF die Wechselwirkung zwischen gesputterten AlScN-Schichten und dem zweidimensionalen Elektronengas (2DEG) von High-Electron-Mobility-Transistoren (HEMTs) mit dem Ziel, die ferroelektrischen Eigenschaften des AlScN gezielt dafür zu nutzen, um Transistorbauelemente auf Basis des Halbleiters Gallium-Nitrid (GaN) reversibel aus einem selbstleitenden in einen selbstsperrenden Zustand umzuschalten. Die Idee dabei ist es, die Inversion der Polarisation in der AlScN-Schicht auszunutzen, die bei Überschreitung der Koerzitiv-Feldstärke in dem Material spontan umklappt und damit ihr Vorzeichen wechselt. Hierfür ist die Integration von ferroelektrischen AlScN-Schichten, die mittels hochwertiger Sputter-Verfahren erzeugt werden, in den Schichtstapel der HEMT-Bauelemente notwendig. Es muss eine geeignete Strukturierung der Sputterschichten erfolgen, ohne deren Ferroelektrizität zu beeinträchtigen Ferner sind geeignete Elektroden zu prozessieren, um mit genügend hohen elektrischen Feldstärken ein Umschalten der Material-Polarisation im AlScN zu erreichen. Die so hergestellten Transistoren sind elektrisch zu charakterisieren. Danach sind Erkenntnisse bezüglich der Stabilität der Bauelemente und der Reproduzierbarkeit des Schaltverhaltens sowie dessen Frequenzverhaltens zu gewinnen. Die folgende Abbildung zeigt einen prinzipiellen Querschnitt des ferroelektrischen HEMT-Bauelements.

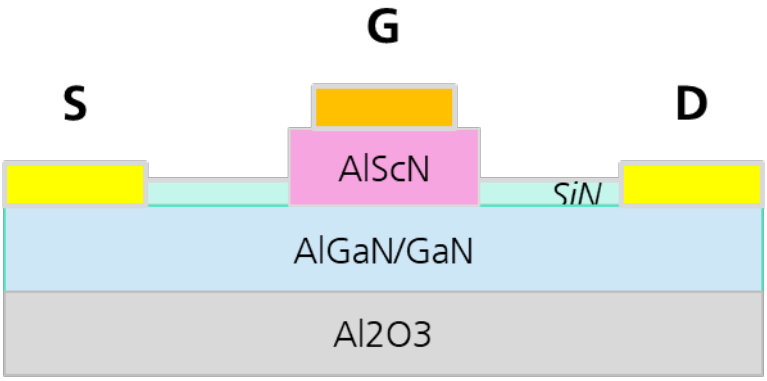


Abbildung 1: Konzeptskizze eines ferroelektrischen HEMT Bauelements mit einer AlScN-Schicht als schaltbarem Element (Darstellung des Bauelement-Querschnitts).

2. Stand der Ferro-Elektrizität von gesputterten AlScN-Schichten am IAF

Gemäß der Konzeptskizze in Abbildung 2 war für diesen Nachweis die Abscheidung von qualitativ hochwertigen ScAlN-Schichten mittels reaktivem Sputtern auf einem mit MOCVD hersgestellten Template bestehend aus einer Pufferschicht und einer undotierten GaN-Schicht vorgesehen. Die für das HEMT-Bauelement notwendige Bereitstellung des 2-DEG sollte durch die Polarisationseigenschaften der ScAlN-Schicht mit einem hohen Sc-Gehalt erfolgen. Die zu erfüllende Aufgabe wurde in zwei Teilaspekte unterteilt, die zunächst getrennt bearbeitet wurden.

1. Herstellung der ScAlN-Schichten auf einem Halbleiter-Schichtstapel ähnlich einer HEMT-Struktur sowie Nachweis der Ferroelektrizität und Einfluß des Schaltverhaltens auf das 2DEG.
2. Integration der gesputterten ScAlN-Schichten in den Herstellungsablauf von HEMT-Bauelementen. Strukturierung mittels Lithographie, Ätzprozessen und dem Aufbringen von metallischen Kontaktschichten.

In den Arbeiten zu Punkt 1. konnten zunächst die ferroelektrischen Eigenschaften des am IAF hergestellten ScAlN nachgewiesen werden. Die Umschaltung der Polarisation in dem Material konnten bis herab zu einer Schichtdicke von 30 nm demonstriert werden. Auch der Nachweiss der Ferroelektrizität dieser Schichten auf n-dotierten GaN-Testschichten konnte erbracht werden. Es zeigte sich jedoch, das der Sputtervorgang zur Abscheidung der ScAlN-Schichten bei den gewählten Parametern zu einer Schädigung des darunter liegenden GaN führte, so das sich kein 2DEG ausbildete. Um hier Abhilfe zu schaffen, wurden die Sputterparameter geändert, und es wurde eine zusätzliche dünne AlGaN-Schicht eingeführt, die ein Separation des empfindlichen 2-DEG von der AlScN-Schicht bewirkt. Bei einem Al-Gehalt von 25 % und einer Dicke von etwa 8 nm für diese Separationsschicht konnte ein 2DEG mit einer Ladungsträgerdichte von etwa $5x10^{12}/cm^2$ und einer hinreichenden Ladungsträger-beweglichkeit erzeugt werden. Dies ist ein wichtiger Zwischenschritt zum ferroelektrischen HEMT-Bauelement. Mit dem so ausgeführten Schichtstapel ergab sich in CV-Messungen eine notwendige Spannung von -1,5 V für die Verarmung des 2DEGs und eine damit verbundene Abschnürung des Kanals. Im folgenden wurde versucht, mit einem Spannungspuls von +20 V zwischen der Oberfläche des Schichtstapels und dem 2DEG einen Schaltvorgang der ferroelektrischen ScAlN-Schicht auszulösen und damit das 2DEG zu "löschen". Die dabei angelegte Feldstärke betrug näherungsweise 6 MV/cm und liegt damit oberhalb der typischen Koerzitiv-Feldstärke des ScAlN von etwa 4 MV/cm. Die in Abbildung 2 (rechts) gezeigte Verschiebung der Messkurven zu positiven Spannungen (rot nach blau) konnte zwar demonstriert werden, aber bislang konnte nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, ob dieses Verhalten tatsächlich durch das Schalten der Polarisation im ferroelektrischen Material verursacht wurde, oder ob z.B. Trapping-Effekte im ScAlN ursächlich dafür sind.

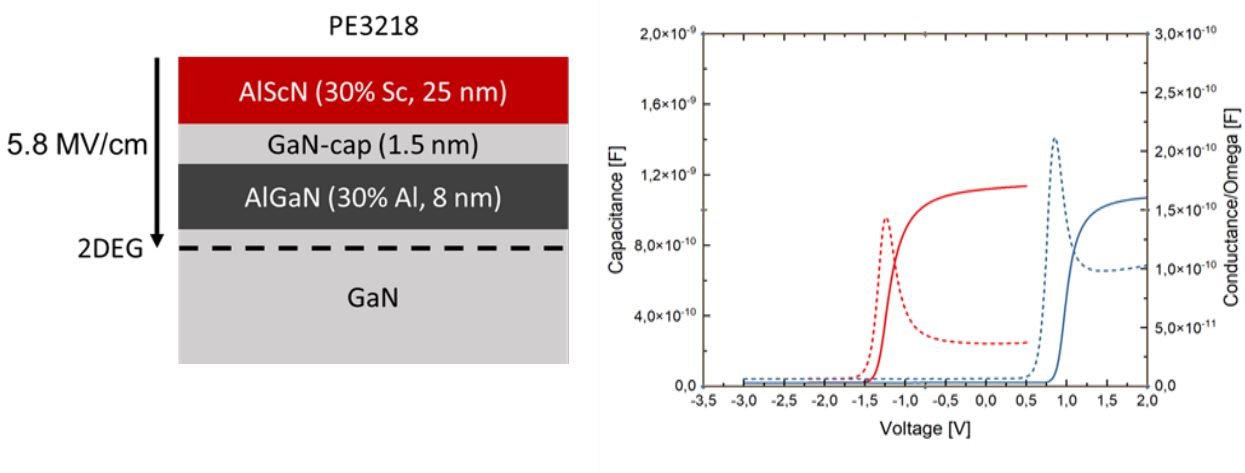


Abbildung 1: Links: Schichstapel zur Verifizierung des Schaltverhaltens von ScAlN in einer HEMT-Struktur. Rechts: Ergebnisse der C-V-Messungen vor Beaufschlagung mit einem Spannungspuls (rot) und nach Beaufschlagung mit einem Spannungspuls (blau) von +20 V. Die angenommene Feldstärke liegt mit 5,8 MV/cm oberhalb der Koerzitiv-Feldstärke des ScAlN.

Zu Punkt 2. wurden verschiedene Ätzverfahren zur Strukturierung der ScAlN-Schichten systematisch untersucht. Insbesondere war zu ermitteln, in wieweit die Maßhaltigkeit der angestrebten Strukturgrößen durch den Ätzprozess erhalten bleibt und ob eine Schädigung der Waferoberfläche resultiert. Die bislang besten Ergebnisse für die hier vorliegenden dünnen Schichten im Bereich von 20 nm bis 40 nm wurden mit 75 prozentiger Phosphorsäure bei einer Temperatur von etwa 80 °C erzielt. Die ScAlN-Schicht wird dadurch vollständig entfernt, ohne erkennbare Schädigung des GaN-Kristalls und die Unterätzung in den Randbereichen der Maske ist sehr gering. Auch die Oberflächenbeschaffenheit des Materials nach dem Ätzprozess ist gut und es bilden sich keine Dekorierungen. Als nächster Schritt ist die Realisierung und Charakterisierung von Ohm-Kontakten in den freigelegten Bereichen geplant.

3. Epitaxie

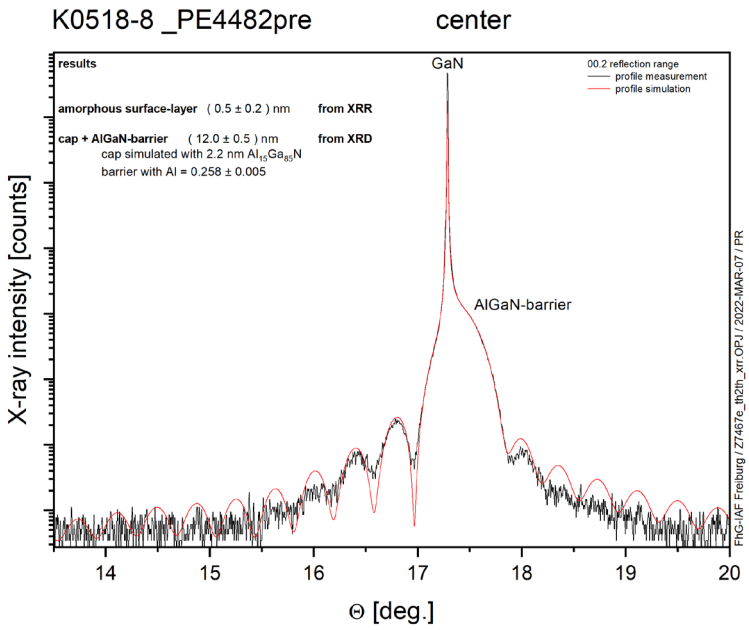
Die für den Nachweis des ferroelektrischen Verhaltens der HEMT-Bauelemente verwendete epitaktisch gewachsene Schichtstruktur ist in der folgenden Abbildung 3 dargestellt.

Schichtdaten

Nr	Schicht	Dotierung	Dicke
8	GaN-Cap	nid	2nm
7	AlGaN-27%	nid	~11nm
6	AlN	nid	~0.1nm
5	GaN-200	nid	400nm
4	GaN-200	nid	1000nm
3	GaN-200	nid	~1300nm
2	GaN Roughening	nid	~300nm
1	GaN Nukleation	nid	20nm

Abbildung 3: Schichtstapel des epitaktisch gewachsenen Ausgangsmaterials.

Auf den Saphir-Substraten wurden Nukleations-Schichten aufgewachsen und die Schichtqualität wurde mit einer etwa 2,5 µm dicken GaN-Pufferschicht optimiert. Die dünne AlN-Schicht bildet zusammen mit der AlGaN-Schicht die Barriere. Das zweidimensionale Elektronengas (2DEG) bildet sich zwischen der Barriere und dem GaN-Puffer aus. Typische Schichtladungsträger-Dichten liegen im Bereich zwischen $1x10^{12}$ / cm^2 und $1x10^{13}$ / cm^2. Die Beweglichkeit der Ladungsträger liegt um 1000 Vs/cm^2. Diese Schichtstapel bilden das Ausgangsmaterial für die Abscheidung des AlScN und der nachfolgenden Bauelement-Prozessierung. Die Material-Qualität der epitaktisch gewachsenen Wafer wurde mittels Röntgen-Diffraktometrie nachgewiesen. Die folgende Abbildung zeigt in der oberen Abbildung 4 ein typisches Messergebnis der Röntgenbeugung. Die AlGaN-Barriereschicht ist deutlich zu erkennen. Im unteren Bild der Abbildung ist das Ergebnis der Röntgenbeugung mit der bereits durch Sputtern aufgebrachten AlScN-Schicht dargestellt. Durch diese zusätzliche Schicht bildet sich ein weiterer Peak in der Messkurve aus.



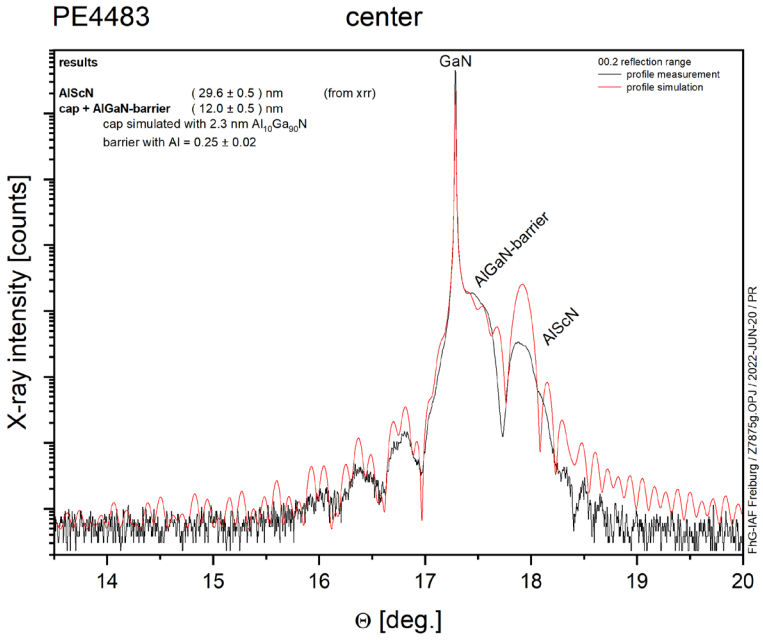


Abbildung 4: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie. Oben Ausgangsmaterial (HEMT-Struktur).

Unten HEMT-Struktur mit zusätzlicher AlScN-Schicht, die mittels eines Sputter-Prozesses aufgebracht wurde.

4. Prozessierung und Charakterisierung von AlScN/AlGaN/GaN-HEMT-Bauelementen

Es wurde der Ansatz der selektiven Abscheidung von AlScN-Schichten im Gate-Bereich weiterverfolgt und es konnten erste vollständige HEMT-Bauelemente demonstriert werden. Abbildung 5 zeigt schematische den Querschnitt und veranschaulicht Details der Prozessfolge. Das AlScN wird dabei ganzflächig auf den Wafer, der mit einer strukturierten SiO2/SiN Maske versehen ist, aufgebracht (links dargestellt). Danach wird die Maske nasschemisch entfernt und es bleiben AlScN-Streifen übrig, auf die dann das Gate-Metall aufgebraucht wird. bislang im Projekt SALSA durchgeführten Untersuchungen zur Strukturierung von dünnen (ca. 20 nm) gesputterten AlScN-Schichten auf epitaktisch hergestellten HEMT-Schichtfolgen zeigen folgende Ergebnisse:

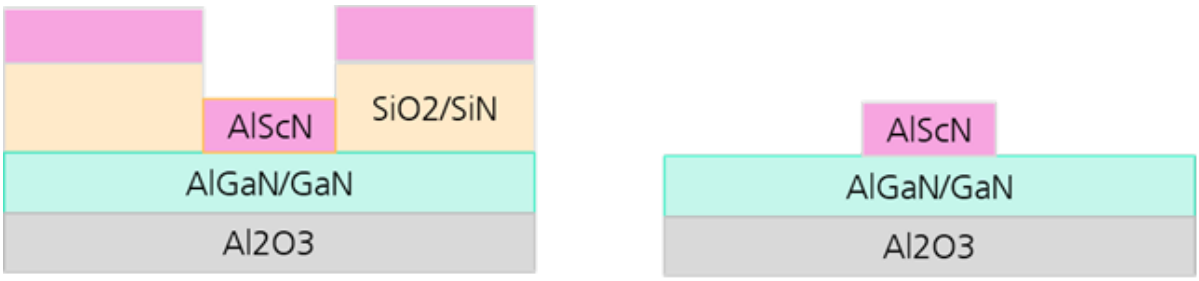


Abbildung 5: Veranschaulichung der „selective area deposition“ von AlScN.

In Abbildung 6 ist links der schematische Querschnitt des vollständigen Bauelements dargestellt und auf der rechten Seite der Abbildung 6 wird die Abfolge der wesentlichen Prozess-Schritte aufgeführt. Die Barriere des Transistors besteht aus der dünnen (11 nm) epitaktische gewachsenen AlGaN-Schicht und der darüber lokalisierten AlScN-Schicht. Zusammen wird durch diese Schichten das zweidimensionale Elektronengas (2DEG) des Kanals bestimmt, dass die wesentlichen elektrischen Eigenschaften des Transistors verursacht.

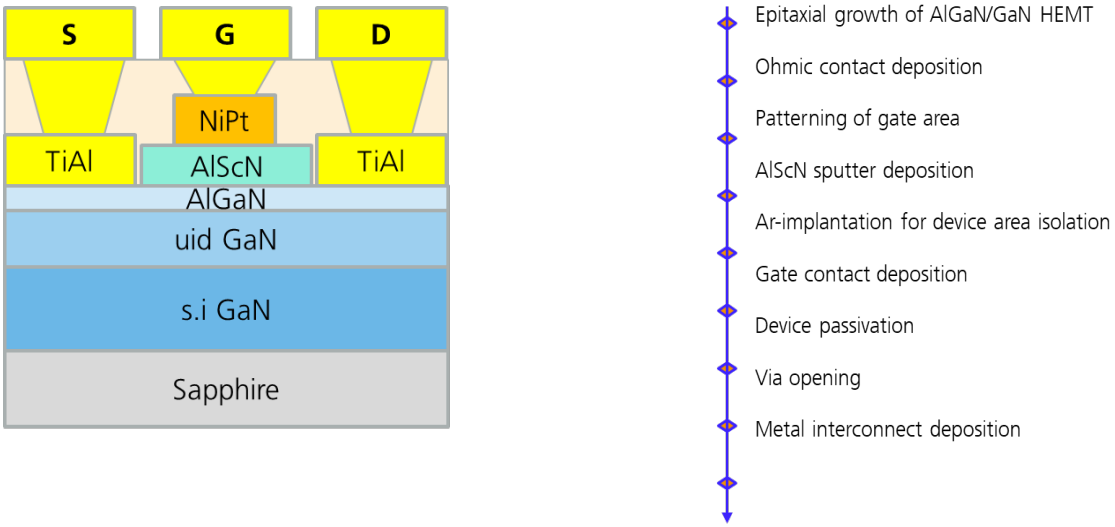


Abbildung 6: Schematische Darstellung des HEMT-Querschnitts (links) und Abfolge der wesentlichen Prozess-Schritte (rechts).

Die folgende Abbildung 7 zeigt den Split-Plan für den Wafer-Run 1222-4 und von links nach rechts die Reihenfolge der wesentlichen Prozess-Schritte. Die linke Spalte gibt die Wafer-Bezeichnung an. In der mittleren Spalte ist die Variation der in den gesputterten AlScN-Schichten festgehalten.

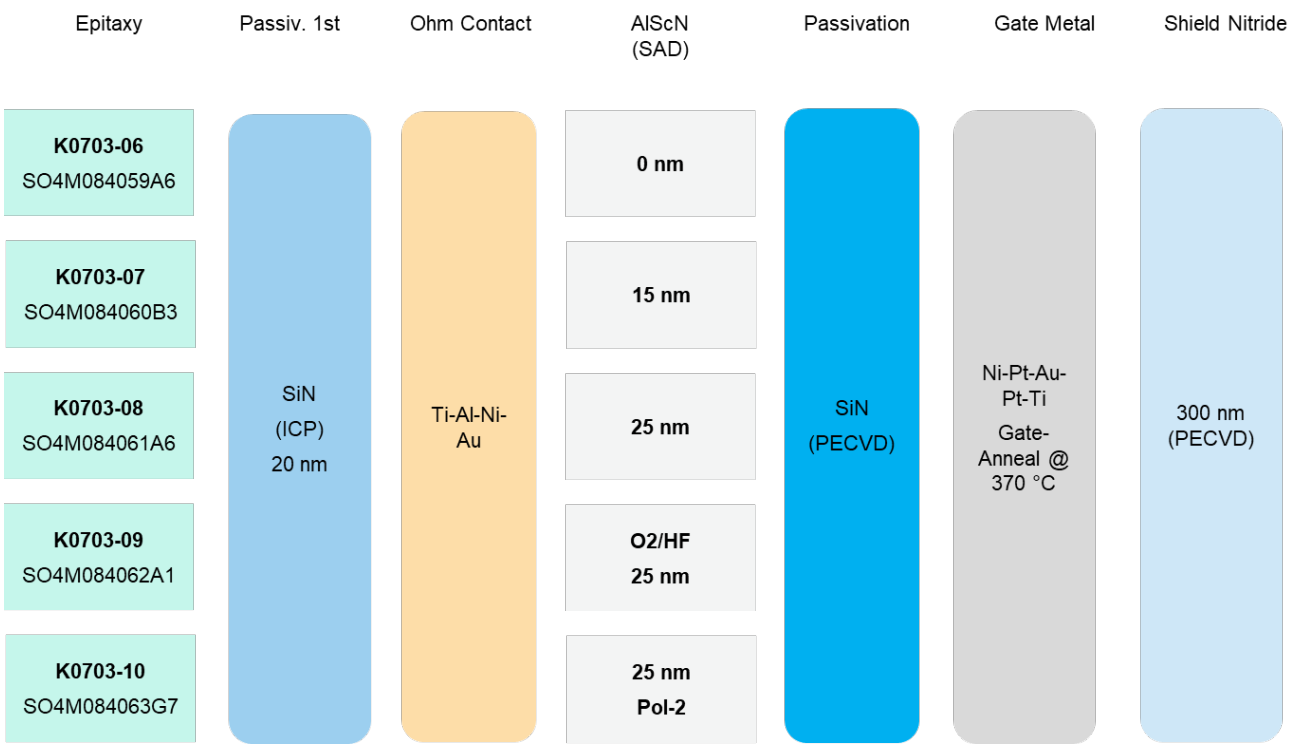
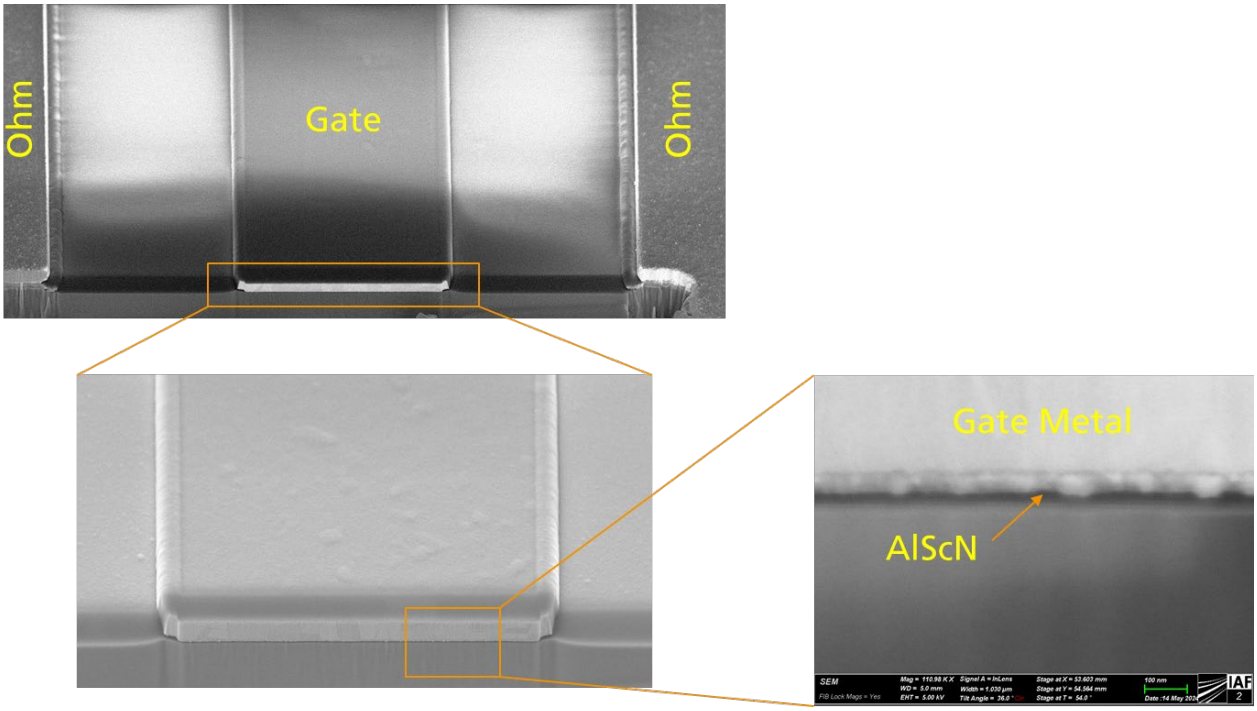


Abbildung 7: Splitplan für die Wafer-Prozessierung. Variiert wird die AlScN-Schicht in der mittleren Spalte.

Die folgende Abbildung 8 zeigt REM-Aufnahmen des vollständig strukturierten Bauelements. Oben sind alle drei Kontakte des Bauelements dargestellt: Die beiden ohmschen Kontakte für Drain und Source sowie dazwischen der Schottky-Kontakt für das Gate. Unten links ist die Vergrößerung des Gate-Bereichs im Querschnitt gezeigt und unten rechts der Querschnitt des Gates mit der AlScN-Schicht in der Nahaufnahme.



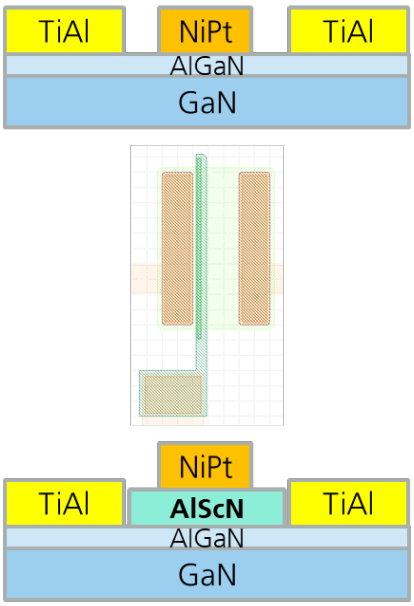


Abbildung 8: Rasterelektronenmikroskop (REM) Aufnahmen des vollständigen HEMT-Bauelements (oben) und schematischer Querschnitt der zu vergleichenden HEMT-Transistoren (unten).

5. Messergebnisse an AlScN-HEMT Bauelementen

Als erste Messung wurden die Schwell-Spannungen an verschieden dimensionierten Transistoren der fünf Wafer des Runs 1222-4 bestimmt. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in der folgenden Abbildung 9 dargestellt. Die roten Punktwolken ergeben sich aus den jeweils 37 auf jedem Wafer vorhandenen Transistoren mit gleichem Lay-out. Unten ist die Dicke der verwendeten AlScN-Schicht angegeben. Der linke Wafer hat keine AlScN-Schicht unter dem Gate-Kontakt und dient als Referenz.

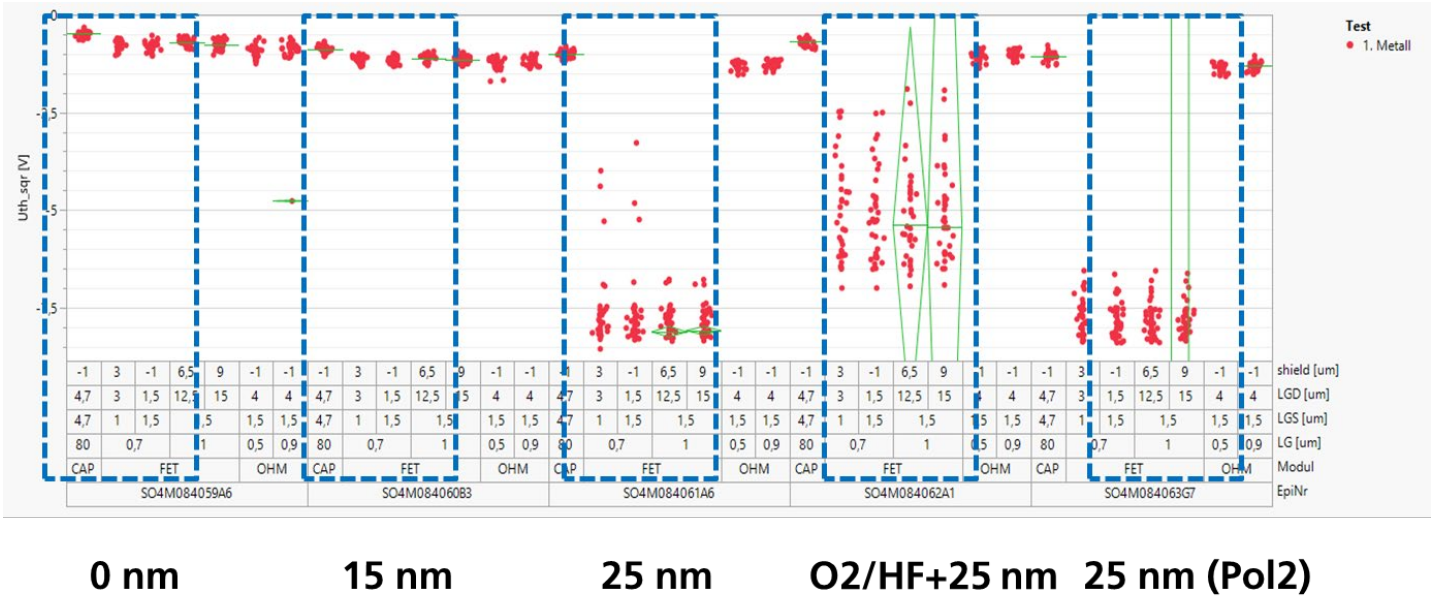
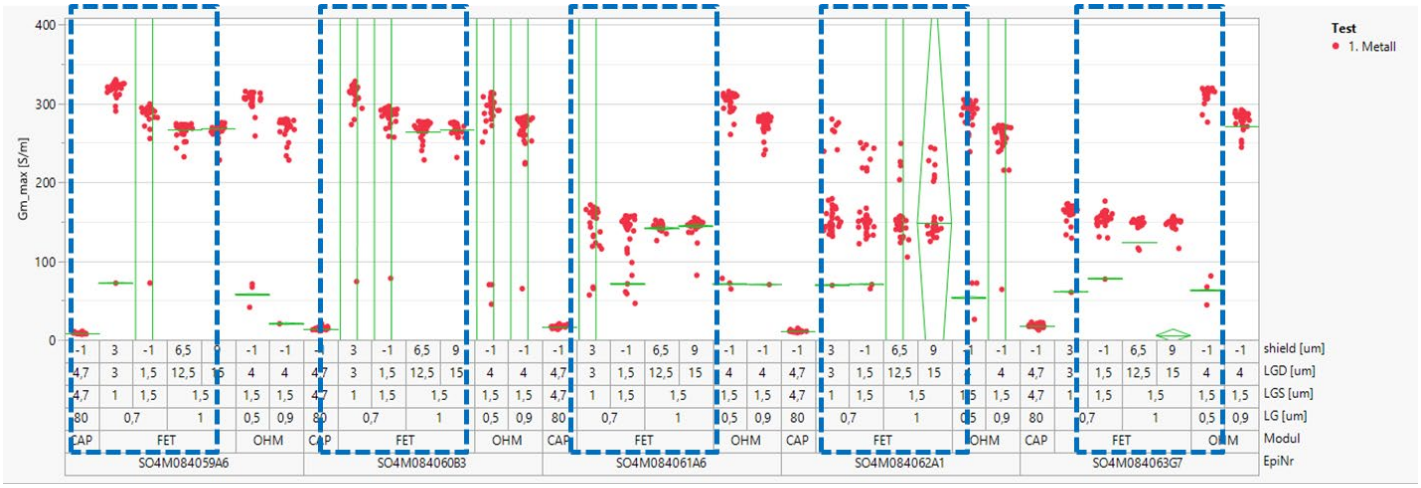


Abbildung 9: Gemessene Schwellspannungen von Transistoren mit unterschiedlichem Lay-out in Abhängigkeit von den Eigenschaften der AlScN-Schicht unter den Gate-Kontakten.

Die Referenz zeigt, wie erwartet, eine Schwellspannung von etwa -1 V. Der Wafer mit 15 nm AlScN zeigt nur eine sehr geringe Vergrößerung der Schwellspannung auf etwa -1,5 V. Erst bei einer Dicke der AlScN-Schicht von 25 nm ergibt sich eine deutliche Verschiebung der Schwellspannung auf Werte um -8 V. Das bedeutet, das durch die zusätzliche Polarisation der aufgebrachten AlScN-Schicht eine deutlich größere Ladungsträger-Dicht im 2DEG vorhanden ist. Wafer 4, mit einer zusätzlichen Oberflächenbehandlung vor Aufbringen der AlScN-Schicht, zeigt ein indifferentes Bild. Wafer 5, bei dem versucht wurde durch Änderung der Sputter-Bedingungen die Polarisation der AlScN-Schichten umzudrehen, zeigt ähnlich Schwellspannungen wie Wafer 2. Dieser Effekt konnte also nicht erzielt werden. Die beobachteten Ergebnisse können auf eine in den ersten Nanometern nicht komplett geschlossenen AlScN-Schicht zurückgeführt werden.

Die nächste Abbildung 10 zeigt charakteristische Eigenschaft der Bauelement die gemessene maximale Steilheit der untersuchten Transistoren. Die Werte der Referenz mit knapp 300 S/m werden auch von Wafer 2 mit der 15 nm dicken AlScN-Schicht erreicht. Die Wafer mit den 25

nm dicken AlScN-Schichten zeigen deutlich geringere Steilheit mit Werten um 150 S/m. Diese Bauelemente sind also entsprechend langsamer. Die Erklärung dafür ist wahrscheinlich eine verringerte Steuerwirkung des Gates auf die Ladungsträger im Kanal der Transistoren durch den vergrößerten Abstand des Gate-Kontakts zum 2DEG verbunden mit den sehr hohen Ladungsträger-Dichten bei diesen Wafern.



Abbilddung 9: Gemessene maximale Steilheit der HEMT-Bauelemente mit unterschiedlichem Layout in Abhängigkeit von den Eigenschaften der AlScN-Schicht unter den Gate-Kontakten.

6. Schaltverhalten der AlScN-HEMT Bauelemente

Um das Schaltverhalten der Transistoren zu untersuchen, wurden Strom-Spannungskennlinien aufgenommen wobei die Gate-Spannung bewusst sehr weit in den positiven Bereich ausgefahren wurde, um ferroelektrisches Verhalten der AlScN-Schicht unterhalb des Gates zu provozieren. Die Bauelemente konnten bis zu einer positiven Gate-Spannung von +4 V betrieben werden, darüber kommt es zu starken Leckströmen durch das Gate. Abbildung 10 zeigt exemplarisch die gemessene Kennlinie eines Transistors mit einer Schwellspannung von etwa -2,5 V. Bei ferroelektrischem Schalten durch Umpolung der Polarisation in der AlScN-Schicht hätte man eine Verschiebung der Schwellspannung um mehrere Volt zu negativen Werten erwartet. In der eingangs erwähnten Veröffentlichung wurde über eine Schwellspannungs-Verschiebung von 14 V berichtet. In den hier beschriebenen Experimenten konnte also ein ferroelektrisches Schaltverhalten der AlScN-HEMT Bauelemente nicht nachgewiesen werden. Dies kann entweder in der mangelnden Schichtqualität der AlScN-Schicht begründet sein, oder es liegt daran, dass die zum Schalten der AlScN-Schicht notwendige Feldstärke im Bauelement nicht erreicht werden konnte.

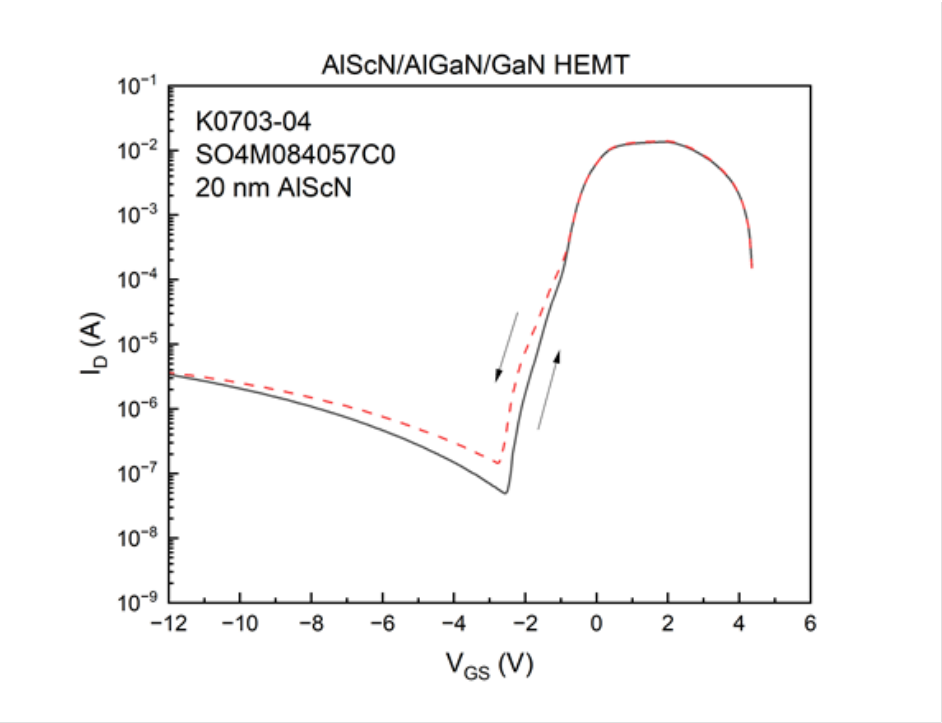


Abbildung 10: Strom Spannungs-Kennlinie eines HEMT-Bauelements mit AlScN-Schicht unter dem Gate-Kontakt. Die geringe Differenz zwischen den Strömen im Aufwärtsast der Kennlinie und im Abwärtsast der Kennlinie kann nicht auf ferroelektrisches Schalten zurückgeführt werden.

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Fraunhofer
IAF

Verbundvorhaben:	**SALSA** Ferroelektrizität in ScAlN: Von der Entdeckung des Effekts zu disruptiven Bauelementen im Rahmen von **„Forschung für neue Mikroelektronik“**
Zuwendungsempfänger:	Fraunhofer-Gesellschaft **Institut für Angewandte Festkörperphysik**
Förderkennzeichen:	16ES1054
Laufzeit:	01.10.2019 – 31.03.2024
Berichtszeitraum:	01.01.2019– 31.03.2024
Projektleiter:	Dr. M. Mikulla (e-mail: michael.mikulla@iaf.fraunhofer.de)
Bearbeiter:	

Dr. R. Driad
A. Nair
M. Yassine
Dr. P. Waltereit
Dr. M. Mikulla

November 2024

Kurzbericht

Überblick über wissenschaftlich-technische Ergebnisse

1. Einleitung

Im Rahmen des Einzelvorhabens erforscht das Fraunhofer IAF die Wechselwirkung zwischen gesputterten AlScN-Schichten und dem zweidimensionalen Elektronengas (2DEG) von High-Electron-Mobility-Transistoren (HEMTs) mit dem Ziel, die ferroelektrischen Eigenschaften des AlScN gezielt dafür zu nutzen, um Transistorbauelemente auf Basis des Halbleiters Gallium-Nitrid (GaN) reversibel aus einem selbstleitenden in einen selbstsperrenden Zustand umzuschalten. Die Idee dabei ist es, die Inversion der Polarisation in der AlScN-Schicht auszunutzen, die bei Überschreitung der Koerzitiv-Feldstärke in dem Material spontan umklappt und damit ihr Vorzeichen wechselt. Hierfür ist die Integration von ferroelektrischen AlScN-Schichten, die mittels hochwertiger Sputter-Verfahren erzeugt werden, in den Schichtstapel der HEMT-Bauelemente notwendig. Es muss eine geeignete Strukturierung der Sputterschichten erfolgen, ohne deren Ferroelektrizität zu beeinträchtigen Ferner sind geeignete Elektroden zu prozessieren, um mit genügend hohen elektrischen Feldstärken ein Umschalten der Material-Polarisation im AlScN zu erreichen. Die so hergestellten Transistoren sind elektrisch zu charakterisieren.

2. Stand der Ferro-Elektrizität von gesputterten AlScN-Schichten am IAF

Gemäß der Konzeptskizze in Abbildung 2 war für diesen Nachweis die Abscheidung von qualitativ hochwertigen ScAlN-Schichten mittels reaktivem Sputtern auf einem mit MOCVD hersgestellten Template bestehend aus einer Pufferschicht und einer undotierten GaN-Schicht vorgesehen. Die für das HEMT-Bauelement notwendige Bereitstellung des 2-DEG sollte durch die Polarisationseigenschaften der ScAlN-Schicht mit einem hohen Sc-Gehalt erfolgen. Die zu erfüllende Aufgabe wurde in zwei Teilaspekte unterteilt, die zunächst getrennt bearbeitet wurden.

1. Herstellung der ScAlN-Schichten auf einem Halbleiter-Schichtstapel ähnlich einer HEMT-Struktur sowie Nachweis der Ferroelektrizität und Einfluß des Schaltverhaltens auf das 2DEG.
2. Integration der gesputterten ScAlN-Schichten in den Herstellungsablauf von HEMT-Bauelementen. Strukturierung mittels Lithographie, Ätzprozessen und dem Aufbringen von metallischen Kontaktschichten.

In den Arbeiten zu Punkt 1. konnten zunächst die ferroelektrischen Eigenschaften des am IAF hergestellten ScAlN nachgewiesen werden. Die Umschaltung der Polarisation in dem Material konnten bis herab zu einer Schichtdicke von 30 nm demonstriert werden. Im folgenden wurde versucht, mit einem Spannungspuls von +20 V zwischen der Oberfläche des Schichtstapels und dem 2DEG einen Schaltvorgang der ferroelektrischen ScAlN-Schicht auszulösen und damit das 2DEG zu "löschen". Die dabei angelegte Feldstärke betrug näherungsweise 6 MV/cm und liegt damit oberhalb der typischen Koerzitiv-Feldstärke des ScAlN von etwa 4 MV/cm. Die in Abbildung 1 (rechts) gezeigte Verschiebung der Messkurven zu positiven Spannungen (rot nach blau) konnte zwar demonstriert werden, aber bislang konnte nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, ob dieses Verhalten tatsächlich durch das Schalten der Polarisation im ferroelektrischen Material verursacht wurde, oder ob z.B. Trapping-Effekte im ScAlN ursächlich dafür sind.

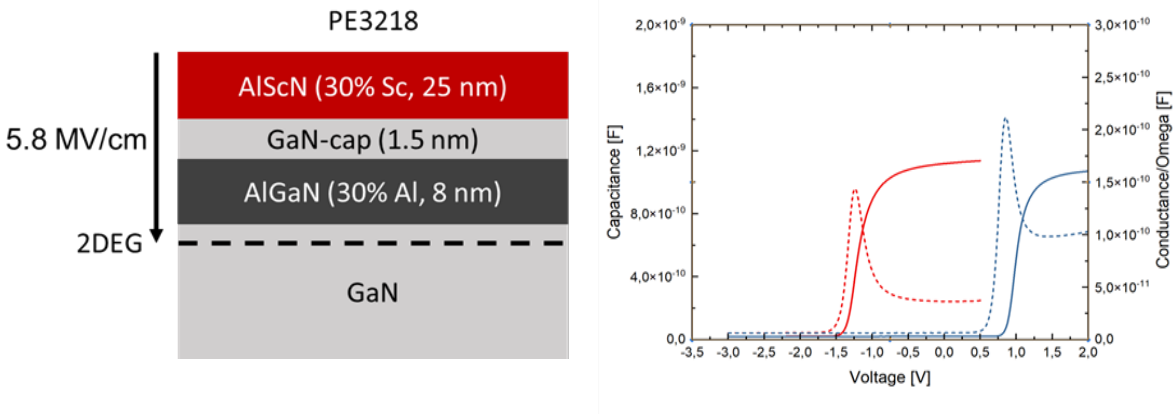


Abbildung 1: Links: Schichstapel zur Verifizierung des Schaltverhaltens von ScAlN in einer HEMT-Struktur. Rechts: Ergebnisse der C-V-Messungen vor Beaufschlagung mit einem Spannungspuls (rot) und nach Beaufschlagung mit einem Spannungspuls (blau) von +20 V. Die angenommene Feldstärke liegt mit 5,8 MV/cm oberhalb der Koerzitiv-Feldstärke des ScAlN.

Zu Punkt 2. wurden verschiedene Ätzverfahren zur Strukturierung der ScAlN-Schichten systematisch untersucht. Insbesondere war zu ermitteln, in wieweit die Maßhaltigkeit der angestrebten Strukturgrößen durch den Ätzprozess erhalten bleibt und ob eine Schädigung der Waferoberfläche resultiert. Die bislang besten Ergebnisse für die hier vorliegenden dünnen Schichten im Bereich von 20 nm bis 40 nm wurden mit 75 prozentiger Phosphorsäure bei einer Temperatur von etwa 80 °C erzielt. Die ScAlN-Schicht wird dadurch vollständig entfernt, ohne erkennbare Schädigung des GaN-Kristalls und die Unterätzung in den Randbereichen der Maske ist sehr gering. Auch die Oberflächenbeschaffenheit des Materials nach dem Ätzprozess ist gut und es bilden sich keine Dekorierungen.

3. Schaltverhalten der AlScN-HEMT Bauelemente

Um das Schaltverhalten der Transistoren zu untersuchen, wurden Strom-Spannungskennlinien aufgenommen wobei die Gate-Spannung bewusst sehr weit in den positiven Bereich ausgefahren wurde, um ferroelektrisches Verhalten der AlScN-Schicht unterhalb des Gates zu provozieren. Die Bauelemente konnten bis zu einer positiven Gate-Spannung von +4 V betrieben werden, darüber kommt es zu starken Leckströmen durch das Gate. Es konnte in der Kennlinie eines Transistors keine Verschiebung der Schwellspannung nachgewiesen werden. Bei ferroelektrischem Schalten durch Umpolung der Polarisation in der AlScN-Schicht hätte man eine Verschiebung der Schwellspannung um mehrere Volt zu negativen Werten erwartet. In den hier beschriebenen Experimenten konnte also ein ferroelektrisches Schaltverhalten der AlScN-HEMT Bauelemente nicht nachgewiesen werden.