

# GaN-basierende Feldeffekttransistoren für die Hochtemperatur- und Hochleistungselektronik

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTOR-INGENIEURS  
von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Fridericiana Karlsruhe  
genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Jochen Hilsenbeck  
aus Laichingen

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juli 2001  
Hauptreferent: Prof. Dr. G. Weimann  
Korreferentin: Prof. Dr. E. Ivers-Tiffée

Berichte aus der Halbleitertechnik

**Jochen Hilsenbeck**

**GaN-basierende Feldeffekttransistoren für die  
Hochtemperatur- und Hochleistungselektronik**

Shaker Verlag  
Aachen 2002

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Hilsenbeck, Jochen:*

GaN-basierende Feldeffekttransistoren für die Hochtemperatur- und Hochleistungselektronik/ Jochen Hilsenbeck.

Aachen : Shaker, 2002

(Berichte aus der Halbleitertechnik)

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9708-7

Copyright Shaker Verlag 2002

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9708-7

ISSN 0945-0785

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1 Motivation	5
1.2 Leitfaden durch die Arbeit	8
<b>2. Das Materialsystem der III-Nitride</b>	<b>11</b>
2.1 Die III-Nitride als Alternative zu konventionellen Halbleitern – Daten und Kenngrößen	11
2.2 Herstellung von III-Nitriden	17
2.2.1 Das Substrat	17
2.2.2 Epitaxie von III-Nitriden	20
<b>3. Der Feldeffekttransistor</b>	<b>22</b>
3.1 Der MESFET (Metal Semiconductor Field-Effect Transistor)	22
3.2 Der HFET (Heterostructure Field-Effect Transistor)	23
3.3 Beschreibung der Gleichstromeigenschaften von AlGaIn/GaN-HFETs	27
3.4 Der FET im Hochfrequenzbetrieb	32
3.4.1 Kleinsignalverhalten	32
3.4.2 Leistungsmessungen	36
3.5 Zusammenfassung – Entwurfskriterien für AlGaIn/GaN-HFETs	38
3.5.1 Epitaxie-Aufbau	38
3.5.2 Laterale Strukturierung	39
3.5.3 Prozessierung	40
<b>4. Herstellung von Feldeffekttransistoren auf der Basis von GaN und seinen Legierungen</b>	<b>42</b>
4.1 Ohmscher Kontakt	44
4.1.1 Optimierung der ohmschen Metallisierung hinsichtlich der elektrischen und morphologischen Eigenschaften	44

4.1.2	Zur Erklärung der Mechanismen bei der Formierung des ohmschen Kontaktes	51
<b>4.2</b>	<b>Bauelemente-Isolation</b>	<b>54</b>
4.2.1	Isolation durch Mesa-Ätzung	56
4.2.2	Isolation durch He-Implantation	58
<b>4.3</b>	<b>Gatekontakt</b>	<b>59</b>
<b>4.4</b>	<b>Passivierung und Pad-Metallisierung</b>	<b>63</b>
<b>4.5</b>	<b>Luftbrücken</b>	<b>65</b>
<b>5.</b>	<b>Der GaN-MESFET</b>	<b>67</b>
5.1	Schichtstruktur und Materialeigenschaften	67
5.2	Metallisierungen und Gate-Recess	68
5.3	Eigenschaften von GaN-MESFETs	70
5.4	Thermische Stabilität von GaN-MESFETs	73
5.5	Zusammenfassung	76
<b>6.</b>	<b>Der PI-HEMT (Polarization Induced High Electron Mobility Transistor)</b>	<b>77</b>
6.1	Grundlagen	77
6.2	Normale und Invertierte PI-HEMTs	80
6.3	Gleichstromeigenschaften	86
6.4	Hochfrequenzeigenschaften	92
6.5	Zusammenfassung	95
<b>7.</b>	<b>AlGaIn/GaN-HFETs auf der Basis von modulationsdotierten Heterostrukturen</b>	<b>97</b>
7.1	Eigenschaften der AlGaIn/GaN-HFET-Strukturen und typisches DC-Verhalten eines AlGaIn/GaN-HFETs	98
7.1.1	Schichtstruktur-Typ I	99
7.1.2	Schichtstruktur-Typ II	102
7.1.3	Gleichstromeigenschaften von AlGaIn/GaN-HFETs	104
7.2	Selbsterwärmung von AlGaIn/GaN-HFETs	104
7.2.1	Gepulste Messungen	105
7.2.2	Bestimmung der Kanaltemperatur von AlGaIn/GaN-HFETs	106
7.3	Untersuchung der thermischen Stabilität von AlGaIn/GaN-HFETs	108
7.3.1	Optimierung der thermischen Stabilität bis 400°C durch Wahl geeigneter Kontaktmetallisierungen	109

---

7.3.1.1	Alterung von AlGaN/GaN-HFETs bei 400°C	110
7.3.1.2	Betrieb von AlGaN/GaN-HFETs bei Temperaturen bis 400°C	115
7.3.2	Thermische Stabilität von AlGaN/GaN-HFETs bei 500°C	117
7.3.3	Grenzen der Stabilität von AlGaN/GaN-HFETs	119
7.3.4	Zusammenfassung der Alterungsergebnisse	120
<b>7.4</b>	<b>Passivierung von AlGaN/GaN-HFETs</b>	<b>121</b>
7.4.1	Hysterese bei AlGaN/GaN-HFETs	122
7.4.2	Einfluss der Passivierung auf die 2DEG-Konzentration	125
7.4.3	Hochfrequenzverhalten	127
7.4.3.1	Kleinsignalverhalten	127
7.4.3.2	Leistungsmessung eines passivierten AlGaN/GaN-HFETs	131
<b>7.5</b>	<b>2-Zoll-Prozess mittels Steperlithographie</b>	<b>132</b>
7.5.1	Besonderheiten bei der Prozessierung	133
7.5.2	Kontaktwiderstand und Schichtwiderstand	134
7.5.3	Gleichstromeigenschaften	135
7.5.4	Hochfrequenzeigenschaften	138
<b>7.6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>144</b>
<b>8.</b>	<b>Anhang</b>	<b>146</b>
<b>9.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>10.</b>	<b>Häufig verwendete Symbole und Abkürzungen</b>	<b>165</b>

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Herstellung, Charakterisierung und Optimierung von Feldeffekttransistoren auf der Basis der III-Nitride. Aufgrund der herausragenden Eigenschaften dieses Materialsystems wie hohe Durchbruchfeldstärke, hohe Ladungsträgerdichten und -geschwindigkeiten sowie seiner chemischen und thermischen Stabilität eignen sich GaN-basierende Transistoren hervorragend für den Einsatz im Hochleistungs-/Hochfrequenzbetrieb und für Hochtemperaturanwendungen.

Im Gegensatz zu SiC, welches vergleichbare Materialeigenschaften wie GaN hat und damit als erster Konkurrent im Bereich der elektronischen Bauelemente anzusehen ist, besteht bei den III-Nitriden die Möglichkeit, durch Kopplung von Halbleitern unterschiedlicher Bandabstände Heterostrukturfeldeffekttransistoren (HFETs) herzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dies durch AlGaIn/GaN-Heterostrukturen realisiert. Dabei bildet sich am AlGaIn/GaN-Heteroübergang ein zweidimensionales Elektronengas (2DEG), wodurch eine weitere Verbesserung der Transistoreigenschaften im Vergleich zum MESFET erzielt werden konnte. Zum einen spiegelt sich dies in einer Erhöhung der Elektronenbeweglichkeit und -geschwindigkeit im Kanal wider. Andererseits steigt auch die Durchbruchfestigkeit der Gate-Elektrode, da bei Heterostrukturfeldeffekttransistoren der Schottky-Kontakt auf dem Halbleiter mit der größeren Bandlücke hergestellt wird.

Die zur Verfügung stehenden Heterostrukturen wurden sowohl mit MOCVD als auch mit MBE gewachsen. Die Materialeigenschaften der Heterostrukturen mit Elektronenbeweglichkeiten von ca.  $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  und Ladungsträgerdichten von  $0,8\text{-}1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  sind für beide Herstellungsmethoden verglichen mit dem internationalen Stand als sehr gut zu bezeichnen. Dabei kamen sowohl dotierte als auch undotierte Transistorstrukturen zum Einsatz. Während im ersten Fall die Transistor-Philosophie des modulationsdotierten FET Verwendung fand, wurde im zweiten Fall die bei den III-Nitriden eingebaute spontane und piezoelektrische Polarisation ausgenutzt. Hierbei entsteht aufgrund des Polarisationsprunges am Heteroübergang ebenfalls

ein 2DEG, diese Transistoren werden daher PI-HEMTs (Polarization Induced High Electron Mobility Transistors) genannt.

Das zentrale Ziel dieser Arbeit war es, einen AlGaIn/GaN-Transistor-Prozess zu entwickeln, welcher die Einsatzfähigkeit der Transistoren sowohl für Leistungsanwendungen als auch für den Einsatz bei hohen Temperaturen möglich macht. Die hierfür notwendigen Herstellungsschritte sind: Ohmscher Kontakt, Bauelemente-Isolation, Gatekontakt, Passivierung und Verbindungsmetallisierung sowie die Luftbrückentechnik. Im Hinblick auf die ohmsche Ebene muss der Kontaktwiderstand niederohmig sein, andererseits muss er aber auch eine gute Morphologie zeigen, um die Transistordimensionen reduzieren zu können, was automatisch geringere Zuleitungswiderstände und damit ein besseres Hochfrequenzverhalten nach sich zieht. Mit dem verwendeten Ti/Al/Ti/Au-Kontaktsystem konnten Kontaktwiderstände von  $0,5 \Omega\text{mm}$  realisiert werden, die für AlGaIn/GaN-HFETs weltweit zu den besten zählen. Eine zusätzliche WSiN-Deckschicht bewirkt bei gleichen Widerständen eine hervorragende Kontaktmorphologie mit scharf definierten Kontakträndern. Aus den Alterungsuntersuchungen konnte eine thermische Stabilität der Kontaktmetallisierung bis  $500^\circ\text{C}$  nachgewiesen werden.

Für die Gate-Metallisierungen wurden verschiedene Kontaktsysteme untersucht. Einerseits zeigen Platin- und Iridium-basierende Kontakte vergleichbare Schottky-Eigenschaften mit Barrierenhöhen von ca. 1 eV. Andererseits unterscheiden sich diese Metallisierungen hinsichtlich ihrer thermischen Stabilität. Während Pt-basierende Schottky-Kontakte starke Degradation nach Alterung bei  $400^\circ\text{C}$  zeigen, sind Ir/Au-Kontakte mit Barrierenhöhen von 1 eV bis  $500^\circ\text{C}$  stabil. Damit konnte mit den in dieser Arbeit entwickelten Ohm- und Schottky-Metallisierungen thermische Stabilität von AlGaIn/GaN-HFETs bis  $500^\circ\text{C}$  erreicht werden.

Neben der Herstellung von Hochtemperaturtransistoren war ein weiterer Aspekt die Realisierung von Leistungstransistoren. Wie auch schon von anderen Forschergruppen berichtet wurde, zeigen GaN-basierende Transistoren eine starke Abhängigkeit von den Messbedingungen. Im Ausgangskennlinienfeld zeigt sich dies in Form einer Hysterese, im Hochfrequenzbetrieb äußert sich dies als Dispersion. Letzteres bedeutet, dass die aus den Gleichstromeigenschaften vorhergesagte HF-Ausgangsleistung nicht annähernd gemessen wird. Der Grund hierfür ist in Elektroneneinfangstellen im Bereich der Halbleiteroberfläche zwischen Gate und



Drain zu suchen. Durch eine geeignete Oberflächenbehandlung ist es möglich, die Hysterese zu reduzieren, weshalb im Anschluss an die Herstellung der Gatekontakte die Transistoren mit einer Siliciumnitrid-Schicht passiviert wurden. Damit konnte die HF-Ausgangsleistung bei 2 GHz um das Dreifache auf 2,86 W/mm erhöht werden, der Wirkungsgrad (PAE) beträgt 47%, die Verstärkung 10 dB. Dieses Ergebnis gehört zu den besten bisher publizierten Werten für AlGaIn/GaN-HFETs auf Saphir-Substrat. Bei einer Gatelänge von 1  $\mu\text{m}$  betragen die Grenzfrequenzen  $f_T$  und  $f_{\text{max}}$  dieses Transistors 11 und 38 GHz.

Neben der Optimierung der einzelnen Herstellungsschritte war es ein weiteres Ziel dieser Arbeit, die Industriekompatibilität a) des Prozesses und b) der Epitaxieschichten zu zeigen. Hierzu wurde der mit Hilfe der Kontaktlithographie entwickelte Prozess auf den Waferstepper übertragen. Die Ergebnisse zeigen sowohl in ihren Absolutwerten als auch in der Homogenität hervorragende Qualität. 3% Standardabweichung der Gleichstromeigenschaften über einen 2-Zoll-Wafer bedeutet den besten Wert, der bisher publiziert wurde. Aus einer intrinsischen Steilheit von 270 mS/mm ergibt sich eine über den Wafer homogen verteilte effektive Elektronengeschwindigkeit von  $1,1 \times 10^7$  cm/s. Bei einer Gatelänge von 510 nm gehört dies ebenfalls zu den besten bisher publizierten Werten. Die Grenzfrequenzen  $f_T$  und  $f_{\text{max}}$  betragen im Mittel 23 und 57 GHz.

Damit spiegeln die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Transistoren die herausragenden Eigenschaften der III-Nitride in ihrer gesamten Bandbreite wider. Die Bauelemente sind bis 500°C thermisch stabil. Die Transistoren zeigen Ausgangsleistungen, welche das Dreifache von GaAs-basierenden Heterostrukturfeldeffekttransistoren betragen. Mithilfe des Stepperprozesses konnte eine 2-Zoll-Homogenität der Transistorkennndaten erreicht werden, die die Qualität sowohl der Epitaxieschichten als auch der Prozesstechnologie eindrucksvoll unter Beweis stellt, wodurch der industrielle Einsatz von AlGaIn/GaN-HFETs in absehbarer Zeit möglich sein sollte.

Ausblickend ist festzuhalten, dass für eine weitere Erhöhung der Ausgangsleistung in erster Linie ein wärmeleitfähiges Substrat (SiC) verwendet werden muss. Darüber hinaus verspricht die Verwendung der „Thermal-Shunt-Technologie“ in Verbindung mit der „Flip-Chip-Technologie“ eine weitere Verbesserung.