

Halbleitertechnologie von A bis Z

Verbindungshalbleiter

GaN-Leistungsbaulemente	3
<i>Das 2DEG: Grundlage des HEMT</i>	<i>3</i>
<i>Der GaN-HEMT als Leistungsschalter</i>	<i>3</i>
<i>E-Mode vs. D-Mode und die Kaskodenschaltung</i>	<i>3</i>
<i>Lateral vs. vertikal: Warum GaN meist lateral bleibt</i>	<i>4</i>

GaN-Leistungsbaulemente

Das 2DEG: Grundlage des HEMT

Wächst man eine dünne AlGaN-Schicht auf GaN, entsteht an der Grenzfläche durch spontane und piezoelektrische Polarisation ein extrem dünnes, hochbewegliches Elektronengas – das zweidimensionale Elektronengas (2DEG). Anders als beim Si-MOSFET braucht dieser leitfähige Kanal keine Dotierung: Er entsteht rein durch die Polarisationsladung an der AlGaN/GaN-Heterogrenzfläche und erreicht Elektronenbeweglichkeiten, die deutlich über denen von dotiertem Volumenmaterial liegen. Diese Struktur ist die Basis des HEMT (High Electron Mobility Transistor).

Der GaN-HEMT als Leistungsschalter

Eine Gate-Elektrode auf der AlGaN-Barriere steuert das 2DEG darunter: Legt man eine ausreichend negative Gate-Spannung an, verarmt der Kanal lokal unter dem Gate und der Transistor sperrt. Da kein pn-Übergang und kein gespeicherter Minoritätsträger involviert ist, schaltet der GaN-HEMT extrem schnell und nahezu verlustfrei – ideal für hochfrequente Schaltnetzteile und Schnelllader, wo die Schaltverluste bei Si- oder selbst SiC-Baulementen zunehmend limitierend wirken.

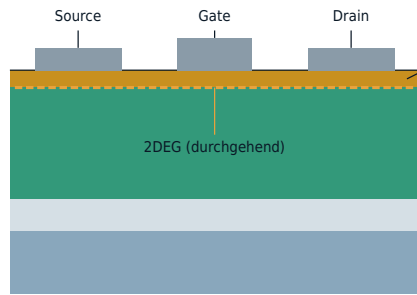
E-Mode vs. D-Mode und die Kaskodenschaltung

Ein unbehandelter AlGaN/GaN-HEMT ist normally-on (D-Mode): Ohne Gate-Spannung leitet das 2DEG bereits, was aus Sicherheitsgründen (Fail-safe-Verhalten beim Ausfall der Gate-Ansteuerung) in der Leistungselektronik unerwünscht ist. Echte E-Mode-Baulemente (normally-off) erreicht man z. B. durch eine p-GaN-Gate-Schicht, die das 2DEG unter dem Gate im Ruhezustand lokal verarmt. Physikalisch beruht das auf einer Verschiebung der Bandkante: Die ionisierten Akzeptoren (meist Magnesium) in der p-GaN-Schicht erzeugen ein eingebautes elektrisches Feld, das die Leitungsbandkante an der AlGaN/GaN-Grenzfläche direkt unter dem Gate über das Fermi-Niveau anhebt – dort fehlen im Ruhezustand freie Elektronen, das 2DEG ist lokal unterbrochen. Außerhalb des Gates, wo keine p-GaN-Schicht liegt, bleibt die Bandkante unterhalb des Fermi-Niveaus und der Kanal existiert dort ungehindert weiter. Erst eine positive Gate-Spannung oberhalb der Schwellspannung drückt die Bandkante lokal wieder unter das Fermi-Niveau und stellt den Kanal her. Eine verbreitete Alternative ist die Kaskodenschaltung: ein normally-on-GaN-HEMT in Serie mit einem niedervoltigen Si-MOSFET, der dem Gesamtbaulement von außen ein normally-off-Verhalten aufprägt.

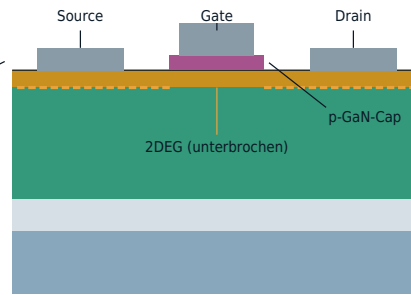
D-Mode vs. E-Mode GaN-HEMT

Wie aus einem normally-on ein normally-off Bauelement wird

D-Mode-HEMT (normally-on)



E-Mode-HEMT (normally-off)



Substrat (Si/SiC)	Puffer (AlN/AlGaIn)	GaN-Kanalschicht	AlGaIn-Barriere
2DEG	p-GaN-Cap (nur E-Mode)	Source-/Gate-/Drain-Metall	

Beim D-Mode-HEMT leitet das 2DEG bei 0 V Gate-Spannung durchgehend – der Transistor ist normally-on.

Die p-GaN-Schicht unter dem Gate verarmt das 2DEG lokal bereits bei 0 V – der Transistor ist normally-off.

Lateral vs. vertikal: Warum GaN meist lateral bleibt

Anders als SiC-MOSFETs sind kommerzielle GaN-Leistungsbaulemente heute fast ausschließlich lateral aufgebaut – Source, Gate und Drain liegen alle auf derselben Waferoberfläche, der Stromfluss verläuft horizontal statt vertikal durch den Chip. Grund ist die Heteroepitaxie auf Fremdsubstraten (siehe Kapitel 2): Vertikale GaN-Baulemente bräuchten ein dickes, niederohmiges GaN-Volumenmaterial für den Rückstrompfad, das mit heteroepitaktischem GaN-on-Si praktisch nicht wirtschaftlich herstellbar ist. Vertikale GaN-Strukturen sind Gegenstand aktiver Forschung, aber noch nicht in Serienfertigung.