

Halbleitertechnologie von A bis Z

Verbindungshalbleiter

Grundlagen & Materialsystem	3
<i>Warum Verbindungshalbleiter für Leistungselektronik?</i>	3
<i>Materialvergleich: SiC, GaN und Silizium</i>	3
<i>Die Baliga-Figure-of-Merit</i>	3
<i>Einordnung: Wo kommt was zum Einsatz?</i>	4
Kristallwachstum & Substrate	4
<i>SiC-Kristallwachstum: Physical Vapor Transport</i>	4
<i>Polytypen: Warum 4H-SiC?</i>	4
<i>GaN-Epitaxie: Heteroepitaxie statt nativem Substrat</i>	5
<i>Gitteranpassung, Verspannung und Defektdichte</i>	5
SiC-Leistungsbaulemente	5
<i>Der SiC-Leistungs-MOSFET</i>	5
<i>Die SiC-Schottky-Diode</i>	5
<i>Trench- vs. Planar-SiC-MOSFET</i>	6
<i>Die SiC/SiO₂-Grenzfläche als Herausforderung</i>	6
GaN-Leistungsbaulemente	7
<i>Das 2DEG: Grundlage des HEMT</i>	7
<i>Der GaN-HEMT als Leistungsschalter</i>	7
<i>E-Mode vs. D-Mode und die Kaskodenschaltung</i>	7
<i>Lateral vs. vertikal: Warum GaN meist lateral bleibt</i>	8
Anwendungsfelder & Systemvergleich	8
<i>E-Mobility: SiC dominiert den Traktionswechselrichter</i>	8
<i>Schnellladeinfrastruktur und Schaltnetzteile: GaN punktet bei hoher</i>	
<i>Frequenz</i>	9
<i>Wirkungsgrad- und Schaltfrequenzvergleich</i>	9
<i>Kostenentwicklung und Ausblick</i>	9

Grundlagen & Materialsystem

Warum Verbindungshalbleiter für Leistungselektronik?

Silizium dominiert die Leistungselektronik seit Jahrzehnten, stößt aber an physikalische Grenzen: Bei hohen Sperrspannungen benötigt ein Si-Bauelement eine dicke, schwach dotierte Driftzone, um das elektrische Feld sicher aufzunehmen – das kostet Durchlasswiderstand und damit Verluste.

Verbindungshalbleiter wie Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) besitzen eine deutlich höhere Durchbruchfeldstärke als Silizium. Das erlaubt dünnere, höher dotierte Driftzonen bei gleicher Sperrspannung – und dadurch spürbar geringere Durchlassverluste bei gleichzeitig kleinerer Chipfläche.

Materialvergleich: SiC, GaN und Silizium

Im direkten Vergleich zeigen sich deutliche Unterschiede: Silizium hat eine Bandlücke von 1,12 eV, 4H-Siliziumcarbid liegt bei 3,26 eV und Galliumnitrid bei 3,4 eV – beide Verbindungshalbleiter sind damit klar breitbandiger. Die kritische Durchbruchfeldstärke steigt von rund 0,3 MV/cm bei Silizium auf etwa 2,8 MV/cm bei SiC und 3,3 MV/cm bei GaN. SiC punktet zusätzlich mit hoher Wärmeleitfähigkeit (etwa 4,9 W/cmK gegenüber 1,5 W/cmK bei Silizium), was die Wärmeabfuhr bei hohen Leistungen erleichtert. GaN wiederum erreicht eine sehr hohe Elektronensättigungsgeschwindigkeit, was besonders hohe Schaltfrequenzen ermöglicht.

Eigenschaft	Silizium	4H-SiC	GaN
Bandlücke (eV)	1,12	3,26	3,4
Krit. Feldstärke (MV/cm)	0,3	2,8	3,3
Wärmeleitfähigkeit (W/cmK)	1,5	4,9	1,3
Sättigungsgeschwindigkeit (10^7 cm/s)	1,0	2,0	2,5
Elektronenbeweglichkeit (cm^2/Vs)	1400	900	1200

Werte für 4H-SiC und Silizium bei Raumtemperatur, intrinsisches Volumenmaterial. GaN-Elektronenbeweglichkeit im 2DEG (AlGaIn/GaN-Heterostruktur) kann deutlich höher liegen.

Die Baliga-Figure-of-Merit

Um Halbleitermaterialien für Leistungsschalter objektiv zu vergleichen, definierte B. Jayant Baliga eine Kennzahl: $\text{BFOM} = \epsilon_r \cdot \mu \cdot E_c^3$, gebildet aus Permittivität, Ladungsträgerbeweglichkeit und der dritten Potenz der kritischen Feldstärke. Sie bewertet, wie klein der spezifische Durchlasswiderstand bei gegebener Sperrspannung theoretisch ausfallen kann. Weil die kritische Feldstärke in dritter Potenz eingeht, wirkt sich der Materialvorteil von SiC und GaN besonders stark aus: Beide liegen bei der Baliga-Figure-of-Merit um mehr als zwei Größenordnungen über Silizium.

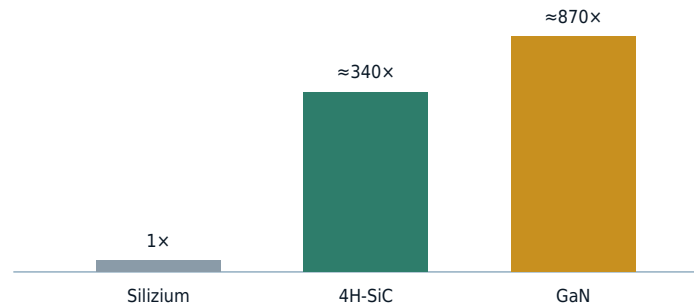
Baliga-Figure-of-Merit (BFOM)

Materialkennzahl für den minimal erreichbaren Durchlasswiderstand

$$\text{BFOM} = \epsilon_r \cdot \mu \cdot E_c^3$$

ϵ_r : Permittivität · μ : Ladungsträgerbeweglichkeit · E_c : kritische Durchbruchfeldstärke

BFOM relativ zu Si



Einordnung: Wo kommt was zum Einsatz?

SiC spielt seine Stärken vor allem bei hohen Spannungen und Leistungen aus – etwa in Traktionswechselrichtern für die E-Mobility oder in industriellen Anwendungen. GaN punktet dagegen bei hohen Schaltfrequenzen und mittleren Spannungen, etwa in Ladegeräten und Schnellladeinfrastruktur, wo kompakte Bauform und geringe Schaltverluste zählen. Die folgenden Kapitel behandeln zunächst Kristallwachstum und Substrate, dann die Bauelemente beider Materialsysteme im Detail.

Kristallwachstum & Substrate

SiC-Kristallwachstum: Physical Vapor Transport

Anders als Silizium lässt sich SiC nicht aus der Schmelze ziehen – bei den nötigen Temperaturen sublimiert SiC, statt zu schmelzen. Stattdessen kommt das PVT-Verfahren (Physical Vapor Transport, auch modifizierte Lely-Methode) zum Einsatz: Ein SiC-Pulvervorrat wird auf über 2000 °C erhitzt und sublimiert, die Gasphase wandert entlang eines Temperaturgradienten zu einem kühleren SiC-Keimkristall und kristallisiert dort epitaktisch. Der Prozess läuft über Tage bis Wochen und wächst eine zylindrische Boule, aus der anschließend Wafer gesägt werden.

Polytypen: Warum 4H-SiC?

SiC kommt in über 200 Kristallstrukturen (Polytypen) vor, die sich nur in der

Stapelfolge der Si-C-Doppellagen unterscheiden. Für die Leistungselektronik hat sich 4H-SiC durchgesetzt, weil es eine höhere und isotropere Elektronenbeweglichkeit bietet als etwa 6H-SiC. Die Wachstumsrichtung erfolgt meist off-axis (typisch 4° Fehlschnitt zur c-Achse), um beim Homoepitaxie-Wachstum stufenvermitteltes Wachstum zu erzwingen und Polytyp-Einschlüsse zu vermeiden.

GaN-Epitaxie: Heteroepitaxie statt nativem Substrat

Native GaN-Substrate sind teuer und nur in kleinen Durchmessern verfügbar, weil GaN unter Normaldruck nicht kongruent schmilzt. In der Praxis wird GaN daher heteroepitaktisch auf Fremdsubstraten abgeschieden – meist Silizium (GaN-on-Si, kostengünstig, große Durchmesser bis 200 mm) oder Siliziumcarbid (GaN-on-SiC, bessere Wärmeableitung, aber teurer). Eine dünne AlN-Nukleationsschicht sowie stufenweise gestufte AlGaN-Pufferschichten fangen die Gitter- und Wärmeausdehnungsfehlانpassung ab, bevor die eigentliche GaN-Schicht aufwächst.

Gitteranpassung, Verspannung und Defektdichte

Die Gitterkonstanten von GaN und Silizium unterscheiden sich um rund 17 %, die Wärmeausdehnungskoeffizienten um mehr als 50 % – ohne Pufferschichten würde die GaN-Schicht beim Abkühlen reißen. Trotz Pufferstrategie bleibt eine relevante Versetzungsdichte zurück (typisch 10^8 – 10^9 cm⁻² bei GaN-on-Si, gegenüber 10^3 – 10^4 cm⁻² bei nativen SiC-Substraten). Das erklärt den Kompromiss der Branche: GaN-on-Si für kosten- und flächengetriebene Anwendungen, GaN-on-SiC oder native SiC-Substrate, wo Zuverlässigkeit und Wärmemanagement im Vordergrund stehen.

SiC-Leistungsbaulemente

Der SiC-Leistungs-MOSFET

Der SiC-Leistungs-MOSFET übernimmt die planare DMOS-Grundstruktur des Silizium-Pendants (siehe Grundlagen-Kapitel „Der MOSFET“), nutzt aber die viel höhere Durchbruchfeldstärke von SiC, um die Driftzone bei gleicher Sperrspannung deutlich dünner und höher dotiert auszulegen. Das senkt den spezifischen Durchlasswiderstand $R_{on,A}$ um mehr als eine Größenordnung gegenüber einem vergleichbaren Si-MOSFET – bei gleichzeitig höherer zulässiger Sperrspannung (600 V bis über 3,3 kV) und deutlich geringerer Chipfläche pro Ampere.

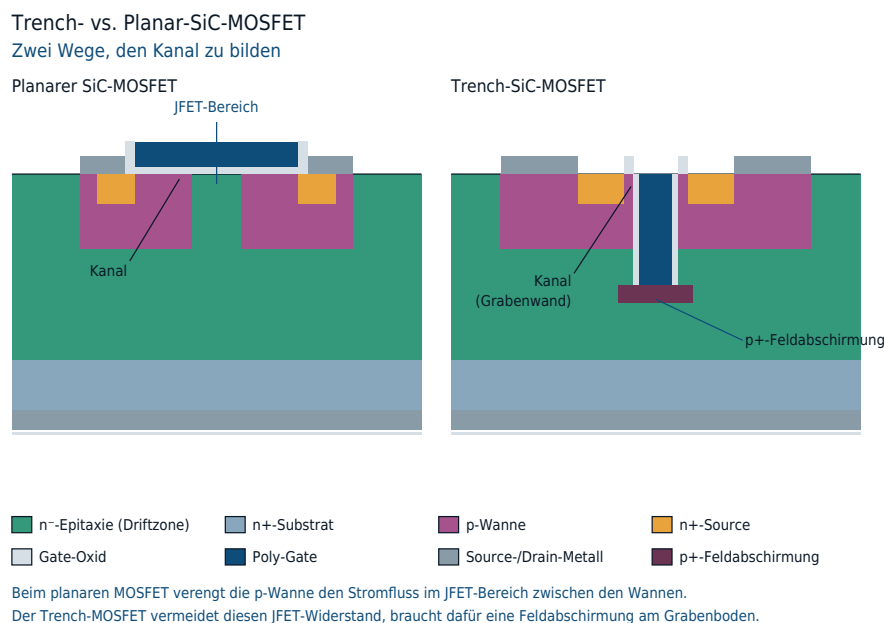
Die SiC-Schottky-Diode

Eine Si-pn-Diode braucht beim Abschalten Zeit, um die im Durchlass

gespeicherte Minoritätsladung auszuräumen – die sogenannte Reverse-Recovery-Zeit, die Schaltverluste verursacht und mit steigender Frequenz stärker ins Gewicht fällt. Eine SiC-Schottky-Diode ist dagegen ein reines Majoritätsträgerbauelement: Es gibt praktisch keine gespeicherte Ladung und damit nahezu keinen Reverse-Recovery-Strom. Möglich wird das erst durch SiC, weil die hohe Durchbruchfeldstärke auch bei Schottky-Kontakten hohe Sperrspannungen bei akzeptablem Durchlassverlust erlaubt – mit Silizium wären Schottky-Dioden nur bis wenige hundert Volt praktikabel.

Trench- vs. Planar-SiC-MOSFET

Beim planaren SiC-MOSFET liegt der Kanal horizontal an der Waferoberfläche, ähnlich wie beim Si-DMOS. Trench-SiC-MOSFETs verlegen den Kanal stattdessen an die vertikale Wand eines geätzten Grabens. Das vermeidet den JFET-Widerstand der planaren Struktur (die Einschnürung zwischen zwei benachbarten p-Wannen) und erhöht die Kanaldichte – auf Kosten einer komplexeren Fertigung und höherer Anforderungen an die Feldabschirmung am Grabenboden, wo sonst lokal überhöhte elektrische Felder die Gate-Oxid-Zuverlässigkeit gefährden würden.



Die SiC/SiO₂-Grenzfläche als Herausforderung

Anders als bei Silizium bleibt bei der thermischen Oxidation von SiC ein Teil des Kohlenstoffs als Grenzflächendefekte zurück. Diese erhöhte Defektdichte an der SiC/SiO₂-Grenzfläche reduziert die effektive Kanalbeweglichkeit der Elektronen auf einen Bruchteil des Volumenwerts – ein zentraler Grund, warum SiC-MOSFETs trotz besserer Materialkennwerte lange hinter ihrem theoretischen

Potenzial zurückblieben. Prozessverbesserungen wie NO- oder N₂O-Nachoxidations-Anlagerung (Stickstoffpassivierung) haben die Grenzflächenqualität und damit die Kanalbeweglichkeit in den letzten Jahren deutlich verbessert.

GaN-Leistungsbaulemente

Das 2DEG: Grundlage des HEMT

Wächst man eine dünne AlGaN-Schicht auf GaN, entsteht an der Grenzfläche durch spontane und piezoelektrische Polarisierung 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

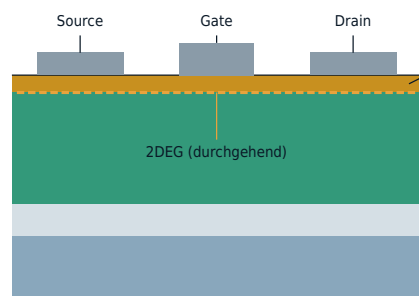
Ein unbehandelter AlGaN/GaN-HEMT ist normally-on (D-Mode): Ohne Gate-Spannung leitet das 2DEG bereits, was aus Sicherheitsgründen (Fail-safe-Verhalten beim Ausfall der Gate-Ansteuerung) in der Leistungselektronik unerwünscht ist. Echte E-Mode-Baulemente (normally-off) erreicht man z. B. durch eine p-GaN-Gate-Schicht, 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.

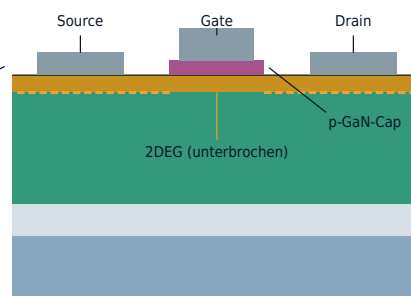
D-Mode vs. E-Mode GaN-HEMT

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.

Anwendungsfelder & Systemvergleich

E-Mobility: SiC dominiert den Traktionswechselrichter

Der Traktionswechselrichter ist die Leistungselektronik-Komponente, die am direktesten über Reichweite und Effizienz eines Elektrofahrzeugs entscheidet. SiC-MOSFETs haben sich hier gegenüber Si-IGBTs durchgesetzt, weil die geringeren Schaltverluste höhere Schaltfrequenzen erlauben – das verkleinert passive Bauteile (Drosseln, Kondensatoren) und steigert den Wirkungsgrad typischerweise um 3 bis 5 Prozentpunkte über den Fahrzyklus. Bei 800-V-Systemarchitekturen, wie sie zunehmend Standard werden, verstärkt sich der

SiC-Vorteil zusätzlich, da die höhere Durchbruchfeldstärke besonders bei höheren Spannungsklassen zum Tragen kommt.

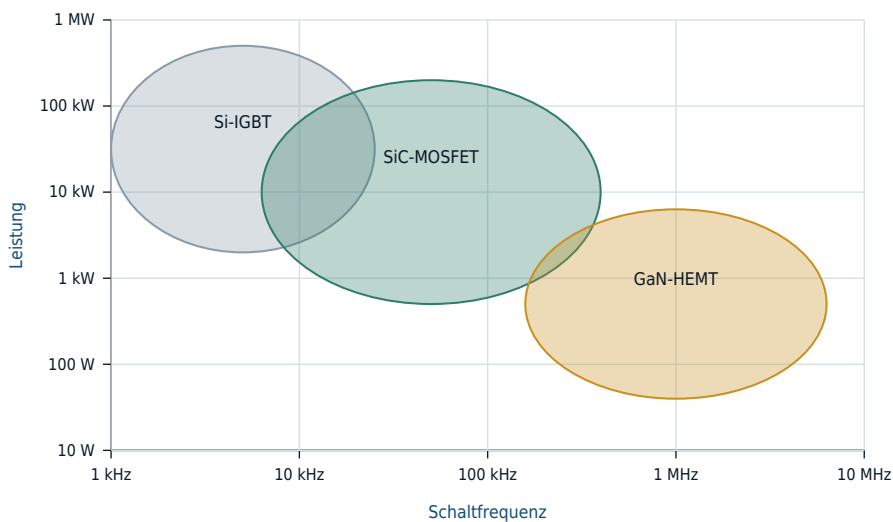
Schnellladeinfrastruktur und Schaltnetzteile: GaN punktet bei hoher Frequenz

Bei Anwendungen mit mittleren Spannungen (48 V bis wenige hundert Volt) und dem Wunsch nach kompakter Bauform spielt GaN seine Stärken aus: Ladegeräte für Laptops und Smartphones nutzen die hohe Schaltfrequenz von GaN-HEMTs, um Transformatoren und Filterkomponenten drastisch zu verkleinern – ein 65-W-USB-C-Ladegerät passt heute in ein Gehäuse, das noch vor wenigen Jahren für ein Drittel der Leistung nötig war. Auch DC-Schnelllader für E-Autos setzen zunehmend auf GaN in den vorgeschalteten AC/DC-Stufen.

Wirkungsgrad- und Schaltfrequenzvergleich

Grob gilt: Si-IGBTs decken heute noch die günstigste Option für niedrige Schaltfrequenzen (unter 20 kHz) bei sehr hohen Leistungen ab. SiC-MOSFETs dominieren den mittleren bis hohen Leistungsbereich mit Frequenzen bis in den dreistelligen kHz-Bereich. GaN-HEMTs erschließen MHz-Frequenzen bei kleineren bis mittleren Leistungen, wo die Baugröße der wichtigste Faktor ist.

Wirkungsgrad- und Frequenzbereiche im Vergleich
Typische Einsatzbereiche von Si-IGBT, SiC-MOSFET und GaN-HEMT



Si-IGBTs dominieren niedrige Frequenzen bei sehr hohen Leistungen.
SiC-MOSFETs decken den mittleren bis hohen Leistungsbereich ab.
GaN-HEMTs erschließen MHz-Frequenzen bei kleineren bis mittleren Leistungen.

Kostenentwicklung und Ausblick

Trotz der klaren technischen Vorteile bleiben SiC- und GaN-Bauelemente teurer als vergleichbare Si-Lösungen – vor allem getrieben durch Substratkosten und

geringere Fertigungsvolumina. Der Preisabstand schrumpft jedoch kontinuierlich: 200-mm-SiC-Substrate und größere GaN-on-Si-Wafer senken die Stückkosten, während steigende Stückzahlen in E-Mobility und Consumer-Elektronik Skaleneffekte erzeugen. Für viele Anwendungen ist der Break-even über die Systemlebensdauer (niedrigere Kühlkosten, kleinere Bauform, höherer Wirkungsgrad) schon heute erreicht, auch wenn der reine Bauteilpreis noch höher liegt.