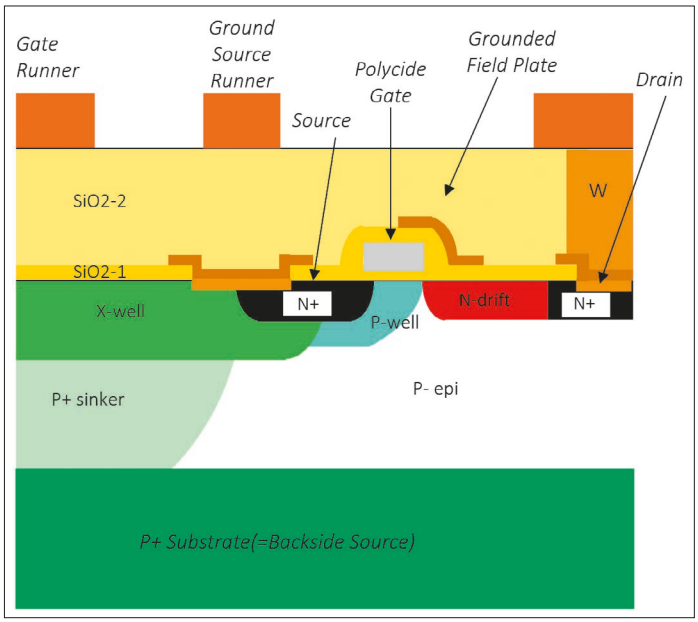
Wettbewerbsfähige Leistung bei niedrigen Herstellungskosten

GaN auf Silizium – das Beste aus zwei Welten



LDMOS-Funktionsquerschnitt

Der Ausbau des 5G-Funknetzes ermöglicht deutlich schnellere Datenübertragungsraten als LTE, stellt jedoch auch hohe Anforderungen an die Halbleiterkomponenten. Aus diesem Grund haben sich GaN-SiC-Halbleiter bei der Herstellung von 5G-Antennen durchgesetzt. Allerdings ist die Herstellung dieser Halbleiter sehr teuer. Mit der neuen GaN-auf-Silizium-Technologie will Infineon nun die Vorteile von Galliumnitrid und Silizium verbinden: hohe Leistung und günstige Herstellung.

Background

Soziale Medien, datenintensive Videotelefonate und die intensive Internetnutzung auf mobilen Geräten sind nur einige Gründe für die steigende Nachfrage nach hochleistungsfähigen 5G-Funknetzen, die eine ausreichende Abdeckung und Netzqualität bieten. Während der Covid-Pandemie hat sich diese Entwicklung weiter verstärkt, sodass die Netzwerkbetreiber auf die Einführung von 5G-Funknetzen im Sub-5-GHz-Bereich drängen, um den exponentiell wachsenden Datenverbrauch bewältigen zu können. Allerdings hat der Trend zu höheren Datenübertragungsraten enorme Auswirkungen auf die globale Energierechnung: Es wird erwartet, dass der Energiebedarf für die Informations- und Kommunikationstechnologie bis 2030 auf bis zu 21% des weltweiten Energieverbrauchs ansteigen könnte [1].

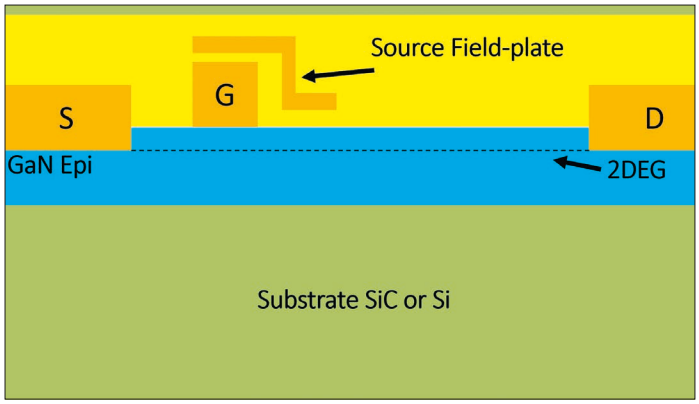
Mit den neuen 5G-Funktionen entstehen für die Hochfrequenztechnik zudem viele zusätzliche Herausforderungen, darunter höhere Trägerfrequenzen von bis zu 7 GHz, eine Bandbreite von mehr als 400 MHz, komplexe Modulationsverfahren, eine höhere Anzahl von Kanälen und die Verwendung fortschrittlicher Konzepte wie mMIMO [1]. Außerdem müssen aus Kostengründen trotz zunehmender Komplexität sowohl Gewicht als auch Energiebedarf der HF-Funkgeräte so gering wie möglich gehalten werden, was jeweils eine höhere Energieeffizienz erfordert.

Aus diesem Grund sind die HF-Leistungsverstärkerstufen entscheidende Bauteile in 5G-mMIMO-Funkgeräten, denn sie sind der letzte aktive Block vor der Luftübertragung und beanspruchen bis zu 50% der Energie in der Basisstation [2]. Aufgrund der überlegenen Hochfrequenzleistung hat sich GaN als die führende Hochleistungs-HF-Leistungsverstärker-Technologie für 5G-mMIMO-Funk durchgesetzt. Derzeitige Implementierungen sind jedoch noch zu kostspielig, da GaN auf teuren SiC-Wafern in III/V-Fabriken mit teuren Lithografie-Prozessen gezüchtet wird, was im Vergleich zu siliziumbasierten Technologien zu außerordentlich hohen Produktionskosten führt. Es gab bereits Versuche, GaN auf Siliziumträgern zu züchten, aber aufgrund der begrenzten Leistung und der schlechten Wirtschaftlichkeit konnte sich bisher keine dieser Technologien auf dem Markt durchsetzen. Mit der neuen GaN-auf-Silizium-Technologie von Infineon soll sich das nun ändern: Die Technologie basiert auf einem 8-Zoll-Prozess, der alle technischen Anforderungen erfüllt, und gleichzeitig günstig in der Herstellung ist.

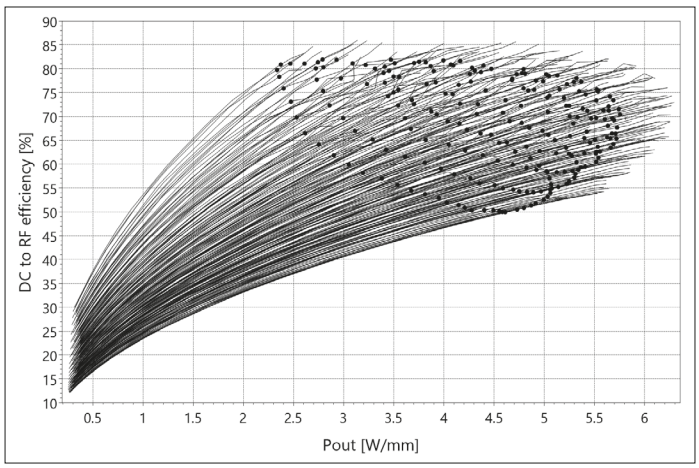
Von LDMOS zu GaN-Si

Bei LDMOS (lateral-diffused metal-oxide semiconductor, Bild 1) handelt es sich um einen planaren, doppelt diffundierten MOSFET, der die Leistung, Robustheit und Benutzerfreundlichkeit von Si-Bipolartransistoren übertrifft. Seit 30 Jahren ist LDMOS die Standardtechnologie für drahtlose Infrastrukturen mit hoher Übertragungsleistung und Frequenzen bis zu 3 GHz. Aufgrund der kostengünstigen Herstellung auf 8-Zoll-Si-Substraten sowie der Kom-

Autor:
Dr. Ismail Nasr,
Head of Product Group
Wireless Infrastructure
Infineon-Technologien
www.infineon.de



Funktionsquerschnitt von GaN-HEMT



Load-Pull-Ergebnisse für gehäuste 5,8 mm GaN-auf-Silizium-Transistoren

patibilität mit Standard-Si-Prozesslinien konnte LDMOS erst mit dem Aufkommen der GaN-HEMTs langsam vom Markt für drahtlose Basisstationen verdrängt werden.

Galliumnitrid-basierte HF-Produkte (Bild 2) wurden ursprünglich entwickelt, um den Bedarf an höherer Leistung, größerer Bandbreite und höheren Frequenzen, beispielsweise für Radar-Anwendungen, zu decken. Im Vergleich zu LDMOS kann GaN-on-SiC aufgrund eines höheren kritischen E-Felds und einer höheren maximalen Ladungsträgerdichte im Kanal, eine höhere Leistungsdichte und damit eine höhere Impedanz bei einem gegebenen Leistungspegel erreichen. Dies führt zu einem geringeren Abfall des Wirkungsgrades gegenüber der Frequenz. Dadurch sind GaN-Transistoren auch für drahtlose Infrastruktur-Anwendungen gut geeignet. Speziell die hohe Leitungsdichte – typischerweise das Fünffache eines LDMOS-Transistors – und die geringen parasitären Kapazitäten sind von Vorteil, da die Industrie auf größere Modulationsbandbreiten setzt.

Auch der Trend zu höheren Frequenzen begünstigt GaN-Transistoren, die bei steigender Leistung einen höheren Spitzenwirkungsgrad aufweisen. GaN-basierte Leistungsverstärker überschreiten sogar jenseits von 2 GHz einen Wirkungsgrad von bis zu 80%, was für 5G und künftige Kommunikationssysteme immer wichtiger wird.

Dennoch war die Einführung von GaN bisher schwierig. Der Hauptgrund dafür war der hohe Herstellungspreis, vorwiegend bei Anwendungen mit Frequenzen unterhalb von 2 GHz, bei denen die Leistungsunterschiede zwischen LDMOS und GaN kaum bemerkbar sind. Seit Anfang des Jahrhunderts wird darum versucht, GaN auf Siliziumsubstraten wachsen zu lassen, doch aufgrund von Gitterfehlanpassungen ist es schwierig, auf diese Weise qualitativ hochwertiges GaN zu produzieren. Durch die umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen der letzten zehn Jahre, insbesondere im Bereich der Energieumwandlung, konnte die Kristallqualität aber deutlich verbessert werden. Seitdem konnten zahlreiche Produkte auf Basis von GaN-Si auf den Markt gebracht werden, selbst für industrielle Anwendungen [3].

Wichtige Parameter für GaN-Si

Um die gleiche Leistung wie bei GaN-SiC zu erreichen und gleichzeitig eine gute Zuverlässigkeit zu erhalten, muss bei der Herstellung von GaN-Si einiges berücksichtigt werden – etwa die HF-Leistungsfähigkeit, der thermische Widerstand und die Zuverlässigkeit.

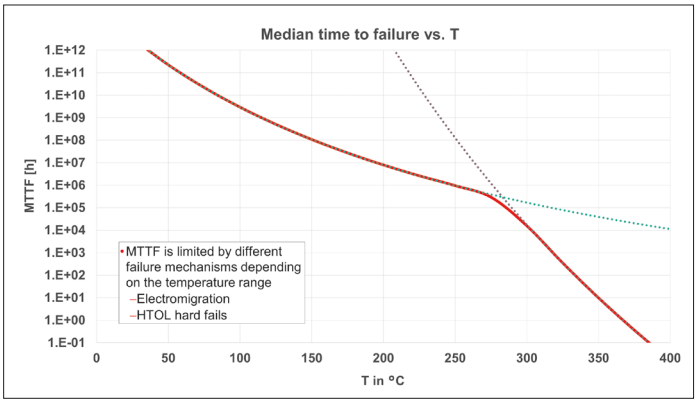
HF-Leistungsfähigkeit: Einer der wichtigsten Leistungsparameter ist die HF-Effizienz. In Bild 3 sind die Load-Pull-Ergebnisse eines gehäusten Transistors mit 5,8-mm-Gate-Peripherie bei 2,7 GHz mit einem P3-dB-Spitzen-Drain-Wirkungsgrad von etwa 85 Prozent und einer Spitzenausgangsleistungsdichte von mehr als 5,5 W/mm bei 28 V dargestellt. Auf diese Weise wird eine Leistung auf Augenhöhe mit GaN-SiC erreicht. Die Grafik zeigt zudem ein sehr geringes Trapping, wobei der Wirkungsgrad vom tiefen Back-Off bis nahe der Sättigung ziemlich konstant bleibt. Aufgrund dieser Eigenschaften ist die Technologie besonders für Doherty-Anwendungen geeignet.

Thermischer Widerstand: Einer der grundlegenden Unterschiede zwischen GaN-Si und GaN-SiC sind unterschiedliche Wärmewiderstände aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit von Si- und SiC-Substraten. Durch die Verdünnung der Wafer und einer Layout-Optimierung können trotzdem dieselben Kanaltemperaturen erreicht werden, wenn GaN-Si bei 32 V und GaN-SiC bei 48 V betrieben werden.

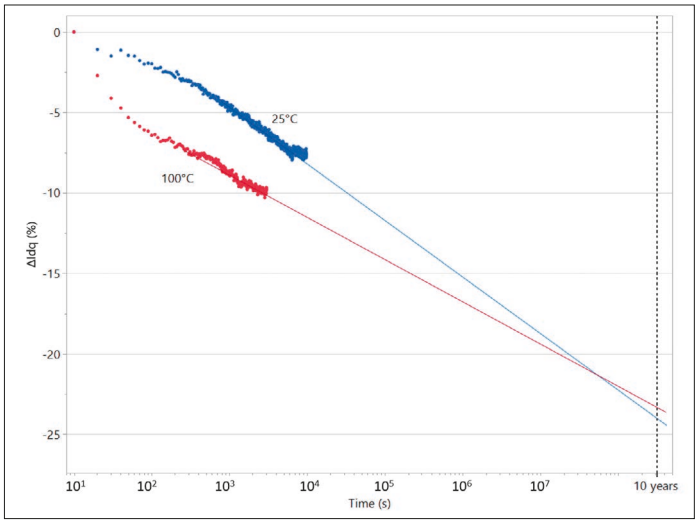
Zuverlässigkeit: Bei der Zuverlässigkeit müssen insbesondere zwei Aspekte berücksichtigt werden: Ausfall und Spannungsdrift. Die mittlere Betriebsdauer bis zum Ausfall (Mean Time to Failure: MTTF) wird durch verschiedene Ausfallmechanismen in Abhängigkeit von der Temperatur und bei niedrigeren Temperaturen durch Elektromigration begrenzt (Bild 4). Die ist jedoch nicht abhängig vom intrinsischen GaN-Transistor, sondern vielmehr vom verwendeten Metallisierungsmaterial und dem Layout. Das heißt, der Wert kann je nach Bedarf durch das Layout verändert werden.

Der geringe Drift der GaN-Si-Technologie wird in Diagrammen gezeigt: Im Bild ist der I_{dq}-Drift für 25 und 100 °C dargestellt, wenn das Bauteil mit 10 mA/mm und V_{ds} = 28 V betrieben wird. Hier wird nach zehn Jahren ein I_{dq}-Drift von weniger als 25% erwartet. Ein Bild zeigt die Abnahme der Ausgangsleistung von Transistoren im 20-mm-Gehäuse in Abhängigkeit von der HTRB (High Temperature Gate Bias)-Stresszeit dargestellt, mit HTRB-Stressbedingungen von V_{gs} = -15 V, V_{ds} = 100 V und 150 °C. Bei bis zu 1000 h HTRB-Stress wird ein Leistungsabfall von weniger als 8% beobachtet.

Bei der GaN-SiC-Technologie werden die Kosten pro Fläche hauptsächlich durch das SiC-Substrat und die Verarbeitung der typischerweise kleinen Wafer in einer III/V-Fab bestimmt. Infineon kann das volle Kostenpotenzial für GaN-Si durch die Entwicklung und Produktion auf 8-Zoll-Wafern in einer Siliziumfabrik mit voller Kompatibilität zu anderen Siliziumwafern ausschöpfen. Darüber hinaus ermöglicht diese Kompatibilität die Nutzung aller modernen 8-Zoll-Produktionsanlagen und -prozesse, die in der Siliziumwelt verfügbar sind – mit all ihren Vorteilen wie Integrationsfähigkeit, Leistung, Ausbeute und Lie-



MTTF von GaN-Si-Transistoren: Mediane Zeit bis zum Ausfall



IDQ-Drift vs. Zeit

ferkette. Mit Blick auf künftige Trends, bei denen die Integration stärker in den Vordergrund rückt und der Übergang zu komplexeren MMICs üblich wird, sind die Kosten einer siliziumbasierten Technologie unschlagbar.

GaN-Si-Leistungsverstärkermodule

Mit siliziumbasierten Technologien können insbesondere Leistungsverstärkermodule (PAM) kosteneffizient hergestellt werden. Dabei muss insbesondere auf dynamische Spitzenausgangsleistung, PAE bei nominaler HF-Betriebsleistung und eine einfache Linearisierung des Leistungsverstärkers sowohl für FDD- als auch für TDD-Modi geachtet werden. In letzter Zeit wird bei aktiven Antennensystemen (AAS) zunehmend die HF-Leistung pro Antennenelement erhöht. Dadurch steigen die Anforderungen an die lineare Nennausgangsleistung von Leistungsverstärkermodulen von 3 auf 8 bzw. 12 W und möglicherweise darüber hinaus.

Gleichzeitig wird durch die Skalierung der Frequenz und der Antennengruppe die Größe der PAMs eingeschränkt, damit sie in die aktive Antennengruppe auf der Kundenplatine passen und die damit verbundenen Gesamtkosten des Systems reduziert werden können. Mit Blick auf diese Anforderungen ist die GaN-Technologie gut geeignet, um den kompakten Formfaktor von den PAMs beizubehalten und gleichzeitig den damit verbundenen höheren Sperrschichttemperaturen standzuhalten.

Trends und Herausforderungen

Mit zunehmender HF-Sendeleistung wird das Problem des Wärme-Managements immer deutlicher. Bei mMIMO-AAS muss darum auf einige Faktoren geachtet werden: Systemüberhitzung, die zu einer drastischen Verschlechterung der Komponentenleistung und einer geringeren langfristigen Zuverlässigkeit führt, höhere Betriebskosten aufgrund einer geringeren Energieeffizienz und passive Wärmeabfuhr aus der Basisstation.

Diskrete FEM-Lösungen könnten zwar ein besseres Wärmemanagement bieten, würden aber bei größeren Antennenarrays zu Engpässen bei der Stücklistengröße und der Leiterplattenfläche führen, was einen erheblichen Entwicklungs- und Optimierungsaufwand aufseiten des Systemintegrators erfordert.

Die Kontrolle der Chip-Dicke, die Anwendung geeigneter Chip-Befestigungstechniken und eine qualitativ hochwertige Lötung des PAM auf der Kundenleiterplatte spielen eine wesentliche Rolle bei der Wärmeabfuhr aus dem PAM. Die GaN-Si-basierten PAM-Produkte von Infineon weisen eine temperaturabhängige Verstärkung von -0,02 dB/K auf. Das ist mit den Werten vergleichbar, die in GaN-SiC- und LDMOS-HF-PAs erreicht werden. Die stabile Leistung über die Temperatur führt zu einer geringeren erforderlichen Designmarge und einer höheren PAE.

Zwei weitere Markttrends, die stark in Richtung integrierter PAM-Lösungen auf GaN weisen, sind die steigende Nachfrage nach größeren Bandbreiten und die Frequenzskalierung über 5GHz. In beiden Fällen kann die Integration von MMICs (Monolithic Microwave Integrated Circuit) erhebliche Vorteile bringen, nicht nur bei der Einhaltung der Leistungsspezifikationen, sondern auch bei der Überwindung von Designbeschränkungen. Dazu gehören parasitäre Effekte durch die Kaskadierung diskreter Komponenten, Transistor-Nichtidealitäten sowie Bonddrähte, die typischerweise zu einer geringeren Bandbreite und einer schlechteren Energieeffizienz führen. Die GaN-Si-Technologie von Infineon ermöglicht es, MMICs zu integrieren.

Zusammenfassung

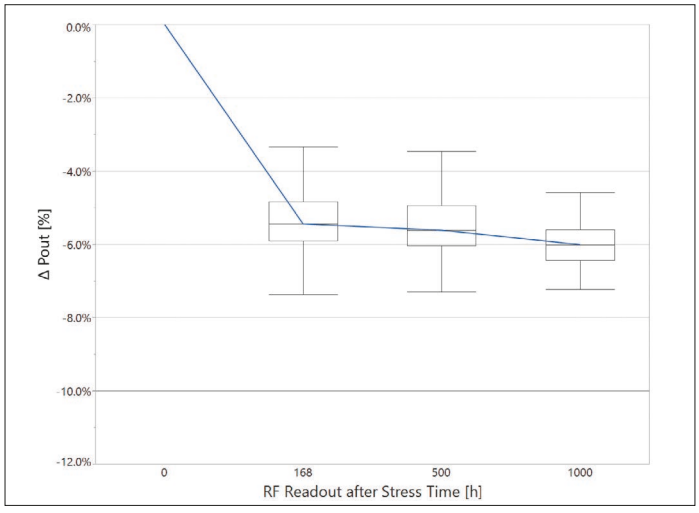
Die moderne Realisierung einer GaN-auf-Silizium-HF-Technologie zielt auf drahtlose Infrastruktur-Anwendungen ab und verbessert das Kosten-Nutzen-Verhältnis von GaN. Nach vielen Jahren der GaN-Si-Entwicklung in der Industrie schöpft die Technologie endlich ihr volles Potenzial aus, mit einem Wirkungsgrad, der dem von GaN-SiC entspricht, und Kosten, die auf der modernen Siliziumverarbeitung basieren. Es hat sich gezeigt, dass GaN-Si die hohen Anforderungen moderner drahtloser Kommunikationssysteme an Effizienz, Linearisierung und Leistungsdichte erfüllen kann. In Zukunft könnten sogar noch höhere Frequenzen und höhere Leistungen erreicht werden, was zahlreiche neue Anwendungsbereiche über die drahtlose Infrastruktur hinaus ermöglichen würde.

Quellen

[1] Nicola Jones: How to stop data centres from gobbling up the world's electricity Nature 561, 163-166 (2018) doi: https://doi.org/10.1038/d41586-018-06610-y

[2] 5G Power white Paper https://carrier.huawei.com/~/media/CNBG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf

[3] T. Detzel, A. Charles, G. Deboy, O. Haeberlen and T. McDonald: The Commercialization of GaN Power Devices: Value Proposition, Manufacturing, and Reliability, 2019 Compound Semiconductor Week (CSW), 2019, pp. 1-1, doi: 10.1109/ICIPRM.2019.8819303 ◄



Pout-Drift vs. Zeit