

FAST AND EFFICIENT POWER SWITCHING WITH GALLIUM NITRIDE ON SILICON

RICHARD REINER

TEL. +49 761 5159-552

RICHARD.REINER@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – GaN POWER CONVERTER

- OUTPUT POWER: 1000 W
- EFFICIENCY: > 97 %
- SWITCHING RATE: 120 V/ns
- OPERATIONAL FREQUENCY: 100 kHz

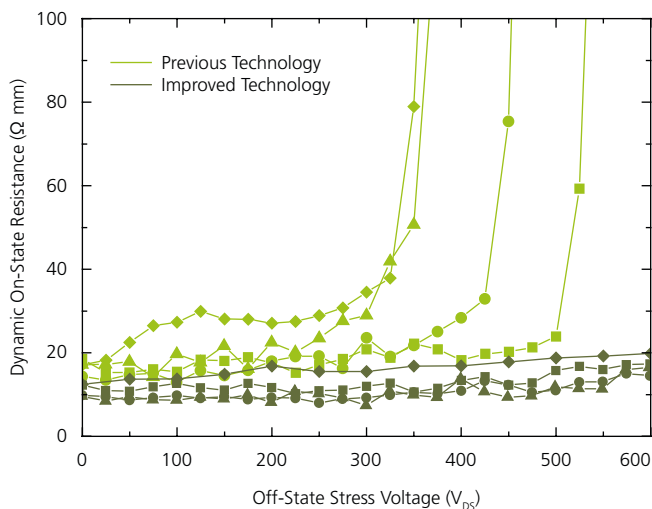
TECHNOLOGY READINESS LEVEL



Gallium nitride based power devices on silicon substrate enable a new generation of power electronic applications. Using advanced epitaxial GaN-buffer concepts, Fraunhofer IAF achieved a vertical breakdown voltage of more than 800 V. This enables the fabrication of large gate width devices in the 600 V class with on-state currents of up to 100 A and on-resistances as low as 50 mΩ. Fraunhofer IAF's GaN-HEMTs power modules demonstrate a fast switching performance and high efficiency. Measurements show a high switching slew rate of up to 120 V/ns and a high efficiency of more than 97 % at an output power of 1 kW and a frequency operation of 1 MHz respectively.

The development and use of new semiconductor materials such as gallium nitride (GaN) leads to breakthroughs in power electronics. The outstanding physical properties of this material allow an efficient operation at high voltages, high currents, high frequencies and high junction temperatures. In contrast to other high performance semiconductors such as silicon carbide or diamond, GaN can be grown and processed on inexpensive, large-area silicon substrates. These capabilities permit the reduction of weight, volume and costs of power electronic circuits. Thus, the GaN technology has a great impact on power electronics in a wide range of applications such as automotive, aviation, energy conversion and lighting.

Fraunhofer IAF demonstrates a high competence in the development of GaN-based power devices. In the previous year, remarkable progress has been achieved, driven by our cooperation with Infineon Technologies, as well as in the project »GaN-PV« funded by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety and the initial, market-oriented Fraunhofer project »HILL«. In 2014, a consortium of twelve partners under the leadership of Fraunhofer IAF started the project »ZuGaN« funded by the Federal Ministry of Education and Research.



1 Characterization of the dynamic on-state resistance as a function of the off-state drain-source voltage measured at off-state stress periods of ■ 2 μs, ● 50 μs, ▲ 1 ms and ◆ 10 s.

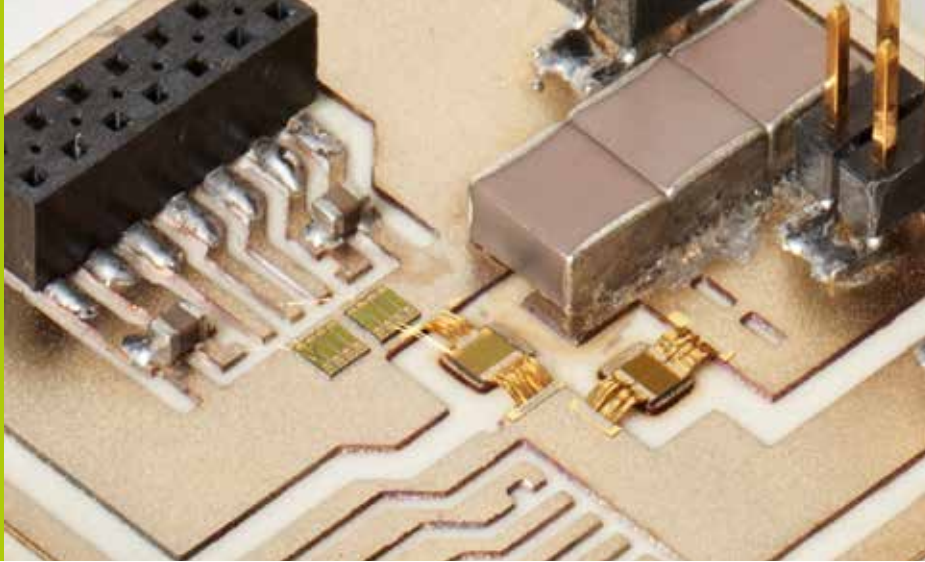
Charakterisierung des dynamischen Durchlasswiderstands als Funktion der Sperrspannung, aufgetragen für Sperrzeiten von ■ 2 μs, ● 50 μs, ▲ 1 ms und ◆ 10 s.

SCHNELLES UND EFFIZIENTES SCHALTEN DURCH GALLIUMNITRID AUF SILIZIUM

Galliumnitrid-Bauelemente auf Silizium-Substraten ermöglichen eine neue Generation von Anwendungen in der Leistungselektronik. Mithilfe fortschrittlicher Konzepte für GaN-basierte Pufferschichten konnte das Fraunhofer IAF eine vertikale Spannungsfestigkeit von mehr als 800 V erzielen. Dies ermöglicht die Fertigung von Leistungstransistoren mit sehr großen Gateweiten für die 600-V-Klasse, mit Durchlassströmen von bis zu 100 A und Durchlasswiderständen von unter 50 mΩ. An Leistungsmodulen mit GaN-HEMTs des Fraunhofer IAF konnte ein schnelles Schaltverhalten und eine hohe Effizienz demonstriert werden. Messungen zeigen steile Schaltflanken von bis zu 120 V/ns und eine Wandlereffizienz von über 97 %, bei einer Ausgangsleistung von 1 kW und einer Schaltfrequenz von 1 MHz.

Neue Halbleitermaterialien wie Galliumnitrid (GaN) verhelfen der Leistungselektronik zu einem weiteren Entwicklungssprung. Die herausragenden physikalischen Eigenschaften des Materials erlauben effizientes Schalten bei hohen Spannungen, Strömen, Frequenzen und Temperaturen. Im Vergleich zu anderen Leistungshalbleitern, wie Siliziumcarbid oder Diamant, kann GaN auf kostengünstigen und großflächigen Silizium-Substraten gewachsen werden. Diese Besonderheit ermöglicht die Entwicklung einer kompakten, leichten und kostengünstigen Leistungselektronik. Damit beeinflusst die GaN-Technologie eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche der Leistungselektronik, wie beispielsweise die Automobilbranche, die Luftfahrt, die Energiebranche oder die Beleuchtungsindustrie. Das Fraunhofer IAF kann eine hohe Kompetenz bei der Entwicklung von GaN-basierter Leistungselektronik vorweisen. Durch eine Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Infineon Technologies und durch öffentlich geförderte Projekte konnten im vergangenen Jahr deutliche Fortschritte erzielt werden. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit fördert die Entwicklung von monolithisch integrierten Halbbrücken im Projekt »GaNPV«. Großflächige Bauelemente werden im Fraunhofer Projekt »HILL« entwickelt. Darüber hinaus führt das Fraunhofer IAF seit diesem Jahr ein Konsortium von 12 Partnern im Projekt »ZuGaNG« an. Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt.

Die Entwicklung hochisolierender GaN-Epitaxie-Schichten ist maßgebend für die Hochspannungstechnologie. Ziel ist die Erhöhung der Sperrspannung und der Isolation durch das Wachstum dickerer GaN-Zwischenschichten. Zusätzlich wird die strukturelle Qualität des Kristallwachstums verbessert, um die Ausbeute von funktionierenden Bauelementen zu erhöhen. Die Entwicklung spannungsarmer Zwischenschichten mit hoher Dicke wurde durch zwei Konzepte vorangetrieben. Mit einer Schichtdicke von 4,8 µm konnte eine »Graded-Lattice«-Struktur gewachsen werden. Dadurch wurde eine vertikale Durchbruchsspannung von 650 V erreicht. »Super-Lattice«-Strukturen wurden bis zu einer Dicke von 5,8 µm gewachsen. Mit dieser Strukturdicke wurde eine vertikale Durchbruchsspannung von über 800 V erreicht.



2

The development of high resistive epitaxial GaN-buffer layers on Si-substrates is fundamental for a high voltage technology. The aim is to increase the breakdown voltage and the isolation by growing higher GaN-buffer thicknesses. In addition, crystal quality has to be improved to achieve high yield of functional devices per wafer. In order to obtain a high buffer thickness without cracks and low tensile strain two advanced concepts were explored. A graded- and a super-lattice layer structure concept was realized. With the graded-lattice structure a vertical breakdown voltage of more than 650 V was achieved as a result of a thickness of 4.8 μm , of more than 800 V due to a thickness of 5.8 μm using the super-lattice structure.

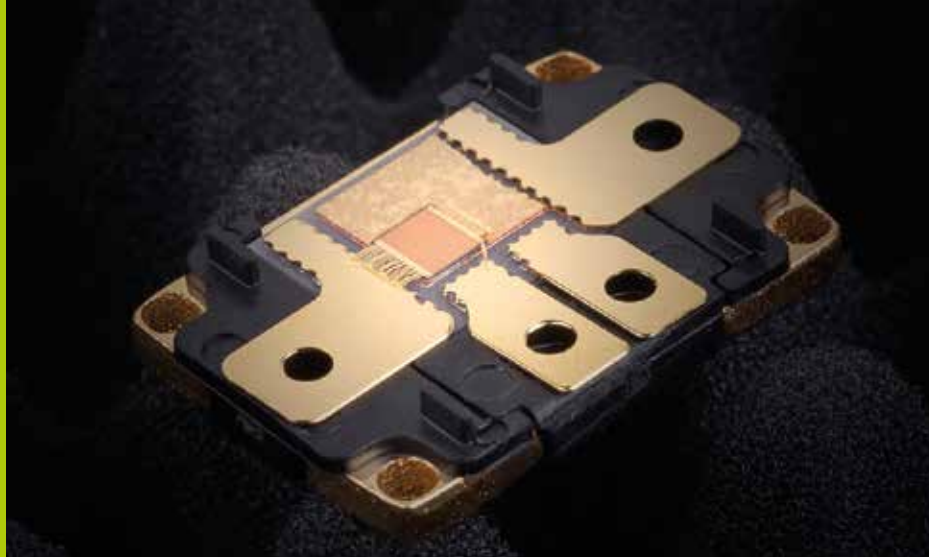
High power converters require efficient, large-size GaN devices in order to get high on-state currents and low on-state resistances. Such devices rely on a sophisticated epitaxy and processing technology with low leakage current and low defect density. Fraunhofer IAF develops and fabricates large GaN on Si power transistors with high gate widths of up to 367 mm. The devices withstand an off-state voltage of more than 600 V, and a corresponding drain and gate leakage current with less than 5 $\mu\text{A}/\text{mm}$. In the on-state, the devices achieve high currents of up to 100 A. Furthermore, on-state resistances as low as 50 m Ω at a corresponding on-state current of 30 A could be measured.

A new generation of semiconductor devices also needs a new generation of packaging to keep the bare chip performance and to enable the best interface conditions to peripheral devices. The assembly has to manage high currents, high voltages, high temperatures and high frequencies. Fraunhofer IAF uses a suitable wide band gap package for the devices (Fig. 3) and direct bonded copper (DBC) power boards for hybrid assemblies to achieve the highest wide band gap performance.

One of the main aims in international GaN technology research is the characterization and elimination of the effect of dynamic on-state resistance, which lead to higher power losses. High electric fields in the off-state can charge defects in the transistor structure. These charged defects constrain the electron flow through the channel in the on-state. This undesired effect is observed by measuring the on-state resistance a few microseconds after a high off-state voltage stress. During the last year, Fraunhofer IAF has reduced the effect of dynamic on-state degradation significantly by improving the device layout, epitaxy and technology. Measurement shows a dynamic on-state resistance which is nearly independent of the off-state stress voltage (Fig. 1).

For the measurement of very fast switching slopes, Fraunhofer IAF developed a hybrid assembly board, which consists of a GaN-HEMT with a gate width of 90 mm, a GaN Schottky diode with a gate width of 50 mm and a hybrid driver with GaN and Si components (Fig. 2). Thus, very high switching speeds in double pulse measurements could be obtained. In the experiment, the off-state voltage was in the range of 300 V and the on-state current at 7 A. Under these conditions, IAF has achieved a turn-on slew rate of more than 50 V/ns and a very fast turn-off slew rate of more than 120 V/ns.

Furthermore, a new evaluation boost converter proves the switching performance and the efficiency of the GaN-HEMTs. With this setup, the GaN-HEMT can be characterized in an environment that is close to application and the different peripheral devices, such as different load or driver conditions, can be evaluated. A GaN power transistor with a gate width of more than 200 mm was tested in the demonstrator. This boost converter has achieved an output power of $P_{\text{out}} = 200 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 1 \text{ kW}$. The converter achieves a high efficiency of 98.7 % at a switching frequency of 100 kHz. With the same setup, the device was switched at 1 MHz with an efficiency of 97.1 %. Compared to a state-of-the-art Si power device, the converter losses were reduced by a factor of 1.6.



3

2 GaN power module for fast-switching voltage converters.

GaN-Leistungsmodul für schnell-schaltende Spannungswandler.

3 GaN-on-Si HEMT with a gate width of 367 mm. The chip is packaged in an X-6 APEI wide band gap package.

GaN-on-Si-HEMT mit einer Gateweite von 367 mm. Der Chip ist in einem X-6-APEI-Gehäuse aufgebaut.

Hochleistungswandler benötigen großflächige Bauelemente mit großen Durchlassströmen und kleinen Durchlasswiderständen. Solche Bauelemente erfordern eine ausgereifte Epitaxie und Prozesstechnologie mit kleinen Leckströmen und kleiner Defektdichte. Das Fraunhofer IAF entwickelt hierfür Leistungsbauelemente mit Gateweiten von bis zu 367 mm. Die Leistungsschalter sperren Spannungen von mehr als 600 V mit Leckströmen unter 5 $\mu\text{A}/\text{mm}$. Im Durchlassbetrieb werden Maximalströme von 100 A erreicht. Der Durchlasswiderstand beträgt dabei 50 m Ω bei einem Strom von 30 A. Eine neue Generation von Leistungsbauelementen benötigt auch eine neue Gehäusetechnologie. Dabei ist die Schnittstelle zu peripheren Komponenten entscheidend. Eine Herausforderung ist die Anbindung von hohen Strömen, Spannungen, Temperaturen und Frequenzen bei kleiner Chipfläche. Am Fraunhofer IAF kommt die entsprechende Aufbau- und Verbindungstechnik zum Einsatz. Die Bauelemente werden in Hochleistungsgehäusen (Abb. 3) und »Direct Bonded Copper«-Leistungsmodulen gehäust.

Ein Hauptziel der internationalen GaN-Forschung ist die Charakterisierung und die Eliminierung eines erhöhten dynamischen Durchlasswiderstands. Durch hohe elektrische Felder im Sperrzustand können sich an Störstellen in der HEMT-Struktur ungewollte Ladungen bilden. Diese Ladungen können den Stromfluss im Kanal während des Durchlassbetriebs hemmen. Der negative Effekt zeigt sich als erhöhter Widerstand wenige Mikrosekunden nach dem Einschalten aus einer hohen Sperrspannung. Im letzten Jahr konnte der erhöhte dynamische Widerstand durch Verbesserungen des HEMT-Layouts, der Epitaxie und der Technologie signifikant reduziert werden. Messergebnisse zeigen, dass in der aktuellen Technologie die Sperrspannungsabhängigkeit des Durchlasswiderstands fast vollständig eliminiert wurde (Abb. 1).

Zur Demonstration von sehr schnellen Schaltflanken hat das Fraunhofer IAF ein hybrides Leistungsmodul entwickelt. Das Modul enthält einen GaN-Leistungstransistor mit einer Gateweite von 90 mm, eine GaN-Schottky-Diode mit einer Kanalweite von 50 mm und eine hybride Treiberschaltung aus GaN-auf-Si-Komponenten (Abb. 2). Mit diesem Aufbau konnten in einer Doppelpulsmessung sehr schnelle Schaltflanken erzielt werden: Mit einer Sperrspannung von 300 V und einem Durchlassstrom von 7 A, wurden Einschaltflanken von mehr als 50 V/ns und äußerst schnelle Ausschaltflanken von mehr als 120 V/ns erzielt. Darüber hinaus konnten die guten Schalteigenschaften und die Effizienz der GaN-HEMTs an einem Evaluierungsboard demonstriert werden. In diesem Aufbau werden Leistungstransistoren in einer anwendungsnahen Umgebung charakterisiert. Dabei können verschiedene Treiber und Lastbedingungen untersucht werden. In diesem Aufbau wurde ein GaN-Leistungstransistor mit einer Gateweite von mehr als 200 mm getestet. Im Betrieb als Hochsetzsteller wurde eine Ausgangsleistung von $P_{\text{out}} = 200 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 1 \text{ kW}$ gewandelt. Der Spannungswandler erzielte eine Effizienz von mehr als 98,7 % bei einer Schaltfrequenz von 100 kHz. Im selben Aufbau erzielte das Bauelement bei einer Schaltfrequenz von 1 MHz eine Effizienz von 97,1 %. Im Vergleich zu einem modernen Si-Leistungstransistor konnten die Wandlerverluste um den Faktor 1,6 gesenkt werden.