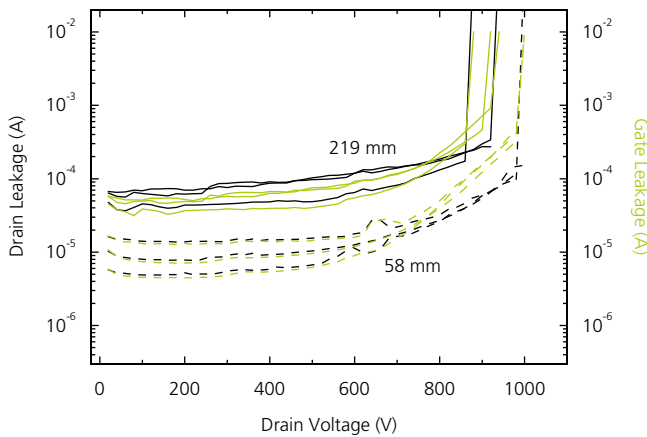


POWER ELECTRONICS OF THE FUTURE

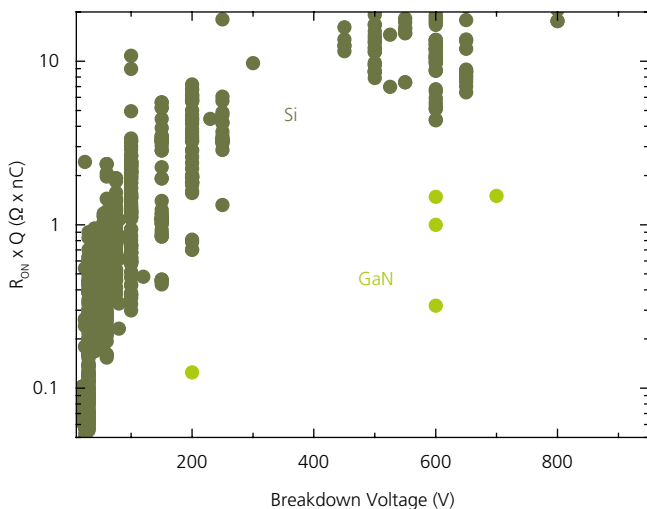
PATRICK WALTEREIT
 TEL. +49 761 5159-620
 PATRICK.WALTEREIT@IAF.FRAUNHOFER.DE

At Fraunhofer IAF, we develop gallium nitride (GaN) power transistors on silicon (Si) substrate in order to realize inexpensive voltage converters for high electric powers. In this process, breakdown voltages of more than 800 V and low on-state resistances of below 100 mΩ are being reached on the GaN-based devices. While conventional Si-based devices meet their limits in power electronics applications, the new GaN technology offers the chance to advance power electronics.



1 Drain and gate leakage of GaN-on-Si transistors with gate widths of 58 mm (dotted lines) and 219 mm (solid lines).

Drain- und Gate-Leckstrom von GaN-Transistoren auf Si-Substrat mit Gateweiten von 58 mm (gestrichelte Linien) und 219 mm (durchgezogene Linien).



Future power switching systems for the automotive and transport industry, consumer and household electronics, manufacturing as well as energy generation, distribution and storage require a new generation of components: They need to be efficient, inexpensive, compact, light and stable under high temperatures. Compared to conventional Si-based devices, AlGaN/GaN heterostructures offer outstanding physical properties which make them the perfect match for these requirements: With GaN transistors, a high breakdown voltage, small on-state resistances as well as high switching frequencies can be reached. Within the system, high switching frequencies allow small energy storage. Thus, voltage switching devices with GaN power transistors can be produced in a more efficient and compact way. Furthermore, GaN can be deposited and processed on inexpensive Si-Substrates. This qualifies the technology for mass applications.

During the last year we have made substantial progress in the field of GaN-based power electronics on Si substrates for switching applications, mainly within the project »PowerGaNPlus« funded by the Federal Ministry of Education and Research and our cooperation with Infineon Technologies. Additionally, our activities are now supported by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear

2 Product of on-state resistance and gate charge versus breakdown voltage for our GaN technology and a variety of commercial Si devices for power switching.

Produkt aus Einschaltwiderstand und Gateladung als Funktion der Durchbruchspannung für unsere GaN-Technologie und einer Vielzahl an kommerziellen Si-Bauelementen für die Leistungswandlung.

LEISTUNGSELEKTRONIK DER ZUKUNFT

Am Fraunhofer IAF werden Galliumnitrid (GaN)-Leistungstransistoren auf Silizium (Si)-Substraten entwickelt, um auf diese Weise kostengünstige Spannungswandler für hohe elektrische Leistungen zu realisieren. Dabei werden mit diesen GaN-Bauelementen Sperrspannungen von über 800 V und Durchlasswiderstände von unter 100 mΩ erreicht. Während konventionelle Si-Bauelemente in der Leistungselektronik an ihre Grenzen kommen, kann sich die Leistungselektronik durch die neue GaN-Technologie weiterentwickeln. Im direkten Vergleich mit Si-Bauelementen wird gezeigt, dass die IAF-Technologie in Schlüsselparametern bereits die Si-Technologie übertroffen hat und somit neue Möglichkeiten in der Leistungselektronik eröffnet.

Zukünftige Systeme für die Leistungswandlung in der Automobil-, der Unterhaltungs- und Haushaltselektronik, der Fertigungstechnik sowie der Energieerzeugung, -verteilung und -speicherung sollen effizient, kostengünstig, kompakt, leicht und temperaturstabil sein. Verglichen mit konventionellen Si-Bauelementen besitzen AlGaIn/GaN-Heterostruktur-Transistoren herausragende Eigenschaften, um diese Anforderungen zu erfüllen: Mit GaN-Leistungstransistoren werden hohe Sperrspannungen, kleine Einschaltwiderstände sowie hohe Schaltfrequenzen erreicht. Im System ermöglichen hohe Schaltfrequenzen kleine Energiespeicher. Somit können Spannungswandler mit GaN-Leistungstransistoren effizienter und kompakter gebaut werden. Darüber hinaus lässt sich GaN auf preiswerten Si-Substraten abscheiden und prozessieren. Damit eignet sich diese Technologie für kostengünstige Massenanwendungen.

Im letzten Jahr hat das Fraunhofer IAF deutliche Fortschritte im Bereich der GaN-Leistungselektronik auf Si-Substraten für Schaltanwendungen erzielt, hauptsächlich im Rahmen des Projekts »PowerGaNPlus«, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird, sowie innerhalb unserer Kooperation mit Infineon. Die Aktivitäten des Instituts werden zusätzlich vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), durch interne Fraunhofer-Programme sowie durch Industriekunden unterstützt.

Die GaN-Technologie auf Si-Substraten basiert auf heteroepitaktischem Wachstum von Gruppe-III-Nitriden mittels metall-organischer Gasphasenepitaxie auf 4"-Si-Substraten und der Prozessierung von Transistoren in der III/V-Fertigungslinie des IAF. Die Bauelemente sind selbstleitend und besitzen ein Schottky-Gate zur Steuerung. Ziel der Arbeit ist die Verbesserung der Bauelementeigenschaften sowie der Ausbeute. Eine geringe Defektdichte ist wichtig für Strukturen mit großer Gateweite. In Abb. 1 sind Leckströme für Transistoren mit unterschiedlicher Gateweite im Sperrzustand dargestellt. Der Leckstrom skaliert mit der Gateweite, allerdings wird die Verringerung der Durchbruchspannung auf den Einfluss von Defekten zurückgeführt.

Die Eigenschaften der intrinsischen Transistorzelle werden über die Epitaxie und die Prozessierung verbessert. Neue Epitaxieansätze werden verfolgt, um die Verspannungen der Schichten zu reduzieren sowie hohe laterale und vertikale elektrische Isolation zu erreichen. Verbesserungen der Prozessierung umfassen vor allem das Gatemodul. Für alle Optimierungen werden die Auswirkungen auf die statischen und dynamischen Eigenschaften untersucht.



3

Safety, internal Fraunhofer programs and further industry cooperation. Our characterization focus has been expanded on dynamic parameters in order to understand and improve the switching properties of our devices. A dedicated set-up was developed to assess the dynamic properties of packaged devices. It is currently being upgraded for on-wafer measurements and will strongly support our developments.

Our GaN-on-Si device technology is based on the heteroepitaxial growth of III-nitride layers by metal-organic chemical vapor deposition on 4" Si substrates and fabrication of high electron mobility transistors using our III-V processing line. The fabricated devices are normally-on with Schottky gates. Our present efforts are driven by further improvements in performance as well as yield. These goals are targeted with enhancements in the intrinsic transistor cell and a reduction in defect densities, respectively. The latter is especially critical for large gate width structures (Fig. 1), where the off-state leakage is shown for devices with different gate widths. The leakage itself scales with gate width but there is a reduction in breakdown voltage which is due to the impact of defects.

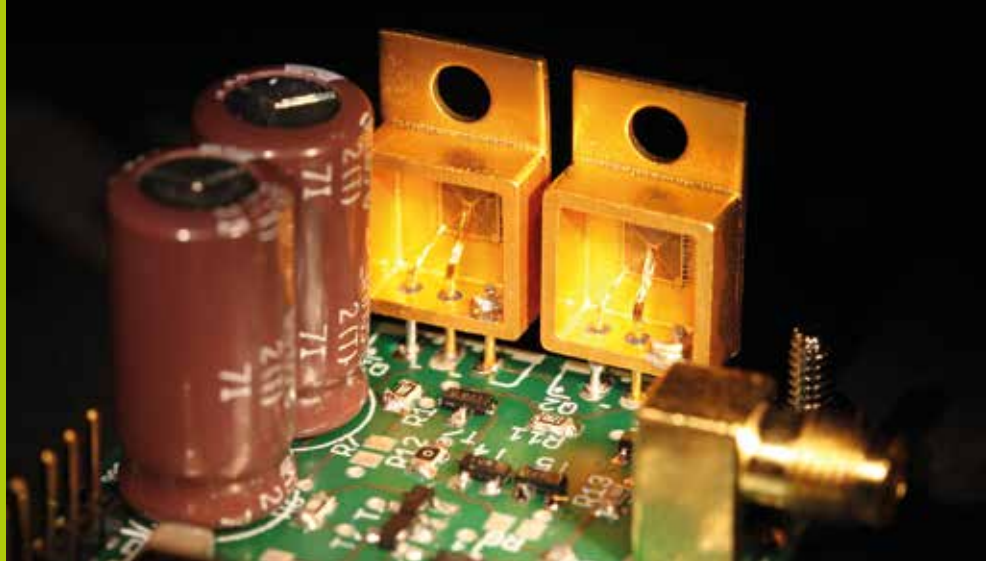
The properties of the intrinsic cell are optimized by both epitaxial growth and processing. Advanced epitaxial designs focus on innovative buffer structures for strain management and high lateral and vertical isolation. Enhancements of processing are mainly directed towards the gate module. Trade-offs between static and dynamic behavior are addressed for all optimizations.

In the following, the static and dynamic performance of our GaN technology is compared to commercial Si devices. GaN devices have gate widths of 260 mm yielding output currents of around 60 A and on-state resistances R_{ON} well below 100 m Ω after packaging in TO220 housings. There is significant benefit for the area-specific on-state resistance, since that of our GaN devices is a factor of three to four lower than that of the Si-based counterparts, thus reducing static losses.

The switching behavior of the devices is characterized with inductive loads in double pulse measurements using our newly developed setup. An often cited property of GaN high voltage transistors is the so-called »dynamic on-state resistance«. An increase in dynamic on-state resistance with off-state voltage is typical for GaN-based transistors due to capture of carriers during off-state and subsequent release upon turn-on. This behavior is well-known as »dispersion« of high frequency GaN devices. The Si-based devices do not show this phenomenon, whereas 5 μ s after turn-on the GaN-based components exhibit an increase of about 130 % up to an off-state voltage of 400 V. This increase is already lower than that of currently commercially available GaN power transistors and compares very well with the best results reported in the literature. Our efforts are directed towards further improvement of the dynamic on-state resistance by using improved epitaxial structures with tailored compensation doping profiles.

An important parameter for power switching is the gate charge Q_G , which is measured as the integral of the gate current during switching. The figure of merit $R_{ON} \times Q_G$ is a direct measure of the switching loss and thus a key benchmarking figure of merit in our comparison. This figure is about one order of magnitude lower for our GaN technology compared to Si (Fig. 2), indicating that the operating frequency can be increased by a factor of ten, which significantly reduces weight and volume of the complete system. IAF partner KACO New Energy GmbH has designed and built a DC/DC boost converter using our GaN-on-Si technology. The demonstrator uses a voltage ratio of 1:2. At 68 kHz operating frequency a maximum efficiency above 98 % has been achieved with maximum output powers close to 1 kW at 400 V.

These results demonstrate that our GaN-on-Si technology for power switching has already passed state-of-the-art Si-based devices in key parameters and will thus open up new opportunities for energy-efficient power electronics.



4

3 GaN-based transistors increase the energy-efficiency for numerous applications.

GaN-basierte Transistoren ermöglichen kompakte und energieeffiziente Leistungsanwendungen.

4 GaN power operational amplifier module with a bandwidth of 10 MHz and an output voltage range of ± 300 V.

Leistungsoperationsverstärker-Modul mit einer maximalen Frequenz von bis zu 10 MHz und einem Ausgangsspannungsbereich von ± 300 V.

Im Folgenden werden die statischen und dynamischen Bauelementeigenschaften unserer GaN-Technologie mit Si-Bauelementen der aktuellen Generation verglichen. Die GaN-Transistoren haben eine Gateweite von 260 nm, Ausgangsströme von etwa 60 A sowie Einschaltwiderstände R_{ON} unter 100 m Ω in TO220-Gehäusen. Es gibt für GaN einen deutlichen Vorteil im flächenspezifischen Einschaltwiderstand, welcher um einen Faktor drei bis vier kleiner ist als für vergleichbare Si-Bauelemente. Dadurch werden die statischen Verluste entsprechend reduziert.

Die Schalteigenschaften der Bauelemente werden mittels einer induktiven Last in Doppelpulsmessungen in einem neu entwickelten Teststand evaluiert. Ein Parameter von großem Interesse bei GaN-basierten Transistoren für hohe Spannungen ist der sogenannte »dynamische Einschaltwiderstand«. Eine Erhöhung des dynamischen Einschaltwiderstands mit der Sperrspannung ist typisch für GaN-basierte Transistoren. Die Si-Bauelemente zeigen dieses Verhalten kaum, wohingegen GaN-basierte Transistoren 5 μ s nach dem Einschalten einen Anstieg bis auf etwa 130 % bei einer Sperrspannung von 400 V zeigen können. Diese Erhöhung ist jedoch geringer als die von aktuell kommerziell verfügbaren GaN-Leistungstransistoren für Hochvoltanwendungen und liegt im Bereich der besten Ergebnisse in der Fachliteratur. Das Fraunhofer IAF arbeitet intensiv an einer weiteren Verbesserung des dynamischen Einschaltwiderstands über Epitaxiestrukturen mithilfe von maßgeschneiderten Kompensationsprofilen.

Ein wichtiger Parameter für Leistungswandler ist die Gateladung Q_G , welche über das Zeitintegral des Gatestroms während des Schaltvorgangs gemessen wird. Die Kennzahl $R_{ON} \times Q_G$ ist ein Gütemaß für die Anwendung in effizienten kompakten Spannungswandlern und somit ein Schlüsselparameter für den Vergleich von Leistungstransistoren. Diese Kennzahl ist für unsere GaN-Technologie, verglichen mit Si-Bauelementen, etwa um eine Größenordnung kleiner (Abb. 2). Dieses Ergebnis zeigt, dass die Schaltfrequenz um bis zu eine Größenordnung angehoben werden kann, was Gewicht und Volumen des Gesamtsystems deutlich verringert. IAF-Projektpartner KACO New Energy GmbH hat einen DC/DC-Hochsetzsteller mit unseren GaN-auf-Si-Bauelementen entworfen und aufgebaut, der Demonstrator hat ein Spannungsverhältnis von 1:2. Bei einer Schaltfrequenz von 68 kHz wurde ein maximaler Wirkungsgrad von über 98 % erreicht, die maximale Ausgangsleistung bei 400 V betrug etwa 1 kW.

Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass die GaN-auf-Si-Technologie des Fraunhofer IAF für Spannungswandler in Schlüsselparametern bereits die Si-Technologie übertroffen hat und sich somit neue Möglichkeiten für die energieeffiziente Leistungselektronik eröffnen.