

Schneller und verlustärmer schalten mit GaN-HEMTs

Bauteile, die man eher mit „HF“ in Verbindung bringt, sind im „Power“-Segment ebenso gut aufgehoben und bringen dort große Vorteile – so der Gallium-Nitrid-HEMT. Doch wie wird er konkret angewendet? Und brauchen wir Netzteile mit 40 MHz Schaltfrequenz?

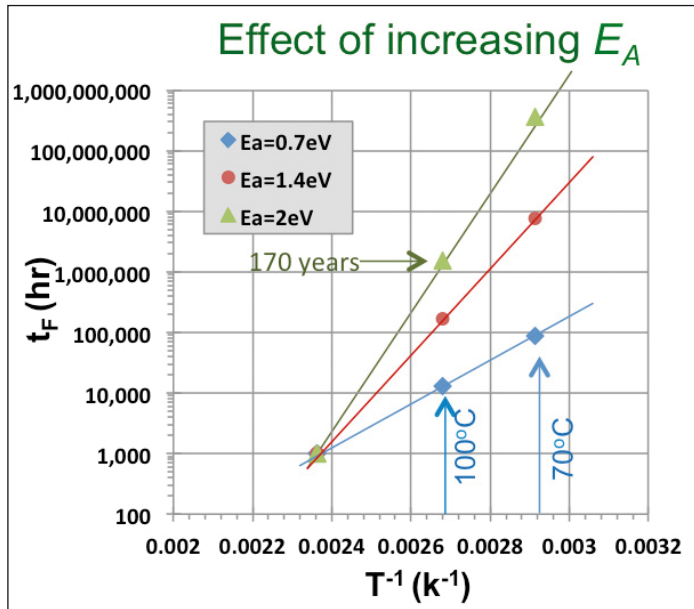


Bild 1: Eine höhere Aktivierungsenergie führt zu höherer Lebensdauer (Bilder: transphorm)

Die Elektronik begann mit feldgesteuerten Bauelementen: den Röhren, ob als lineares Verstärkerelement, der Elektronenröhre mit geheizter Kathode oder als Schalter für höhere Leistungen, dem gasgefüllten Thyatron. Beide hatten den Vorzug, über die Gitter hochohmig und rein spannungsgesteuert zu arbeiten. Zudem war zumindest die reguläre Elektronenröhre auch für die damaligen Verhältnisse hochfrequenter Anwendungen geeignet. Erst im UHF-Fernsehtuner waren Halbleiter plötzlich die bessere Wahl; bipolare Transistoren, die strom- und nicht spannungsgesteuert arbeiten.

Kleiner, schneller, leistungsfähiger

Heute hat sich nicht nur die Anzahl von Bauelementen in einer Schaltung um etliche Zehnerpotenzen vervielfacht, sondern auch die Arbeitsfrequenz. Computer arbeiten im GHz-Bereich, ebenso unsere Mobiltelefone. Moderne Netzteile nutzen ebenfalls nicht mehr 50-Hz-Trans-

formatoren, sondern arbeiten von 50-kHz- bis in den MHz-Bereich.

Geblichen ist jedoch, dass Entwickler spannungsgesteuerte aktive Bauteile bevorzugen. Das ist kein Problem, denn viele Halbleiter, die längst den Platz der Röhren eingenommen haben, sind ebenfalls feldgesteuert: Das Prinzip des FETs, des spannungsgesteuerten unipolaren Feldeffekttransistors, wurde schon in den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts definiert; damals jedoch mangels der Möglichkeit, diese Bauteile herzustellen, nicht weiter verfolgt, weshalb die ersten marktreifen Transistoren zunächst bipolar waren. Der FET in all seinen Varianten ist heute jedoch gegenüber dem mit p-n-Sperrschichten stromgesteuerten bipolaren Transistor weit verbreitet. Eine Kombination aus beiden, der IGBT, hat den Thyristor, das Äquivalent zum Thyatron, in der Leistungselektronik außerhalb einfacher Glühlampendimmer längst abgelöst.

Der FET wurde laufend weiterentwickelt. War er zunächst als Kleinleistungs-JFET wie bipolare Transistoren mit einer Sperrschicht ausgerüstet, die bei falscher Polung leitete, kam der MOSFET mit einem

durch Siliziumoxid isolierten Gate, der längst auch als Leistungs-MOSFET verfügbar ist. GaN-HEMTs erreichen aufgrund der besonderen Materialeigenschaften mit und ohne isoliertes Gate eine noch bessere Schaltcharakteristik und -geschwindigkeit als Silizium-Halbleiter, ob JFET, MOSFET oder IGBT.

Anwendungen von GaN-Halbleitern

Der Verbindungshalbleiter Galliumnitrid wurde zunächst als Grundlage für blaue und damit auch weiße LEDs bekannt, was 2014 zur Verleihung des Nobelpreises an deren Erfinder führte. Zum Abstrahlen blauen Lichts sind größere Bandabstände im Halbleiter erforderlich. Doch andere Wide-Band-Verbindungshalbleiter wie Siliziumkarbid hatten sich zuvor als nicht geeignet herausgestellt. Trotz Preisen im dreistelligen DM-Bereich und Produktion in Deutschland zeigten blaue LEDs aus SiC nur kurze Lebensdauern.

Danach entdeckte man ähnlich zu Galliumarsenid die besonderen Fähigkeiten des Materials Galliumnitrid für Hochfrequenz-Transistoren, den HEMTs (High Elec-

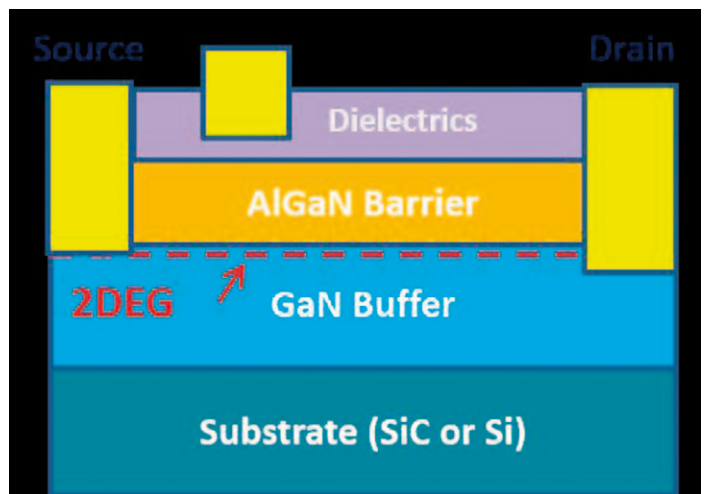


Bild 2: Querschnitt durch einen Leistungs-HEMT, hier mit isoliertem Gate. Das „zweidimensionale Elektronengas“ (2DEG) bildet sich an der Grenzschicht zur AlGaIn-Sperrschicht aus

Autor:



Dipl. Ing. (FH) Wolf-Dieter Roth, technischer Redakteur bei HY-LINE Power Components

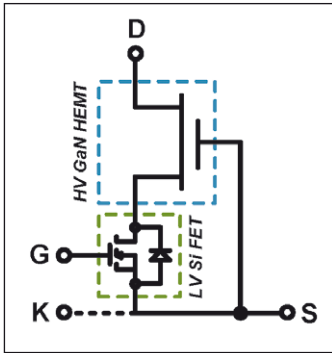


Bild 3: transphorm-Kaskoden-schaltung aus N-Kanal HEMT und steuerndem Niederspannungs-Silizium-MOSFET

tron Mobility Transistors). Und eben jene sind nun auch als Leistungsbaulemente verfügbar, beim von HY-LINE Power Components vertretenen Hersteller transphorm entwickelt von jenen Leuten, die zuvor bereits GaN-LEDs und GaN-Hochfrequenz-Bauteile produziert hatten und so auf viele Jahre Erfahrung mit diesem Material zurückblicken können.

Geringe Leckströme und hohe Temperaturfestigkeit

Wide-Band-Halbleiter wie GaN haben den Vorteil, geringe Leckströme und hohe Temperaturfestigkeit zu zeigen. Im Gegensatz zu Germaniumtransistoren, die wegen ihrer geringen Temperaturbeständigkeit und hohen Ruhestrome bereits nach wenigen Jahren durch Siliziumhalbleiter ersetzt wurden, können transphorm-GaN-Halbleiter bis 175 °C Sperrschichttemperatur betrieben werden, also noch weiter als Silizium. Mit einem Betrieb bis 150 °C, wie in Datenblättern spezifiziert, steigt die Zuverlässigkeit. Dabei fällt dank hohen Wirkungsgrads und infolge der hohen Elektronenbeweglichkeit im Halbleiter, die die Schaltzeiten minimiert, die Eigenerwärmung des Bausteins geringer aus. Doch auch bei geringeren Temperaturen bringt die höhere Aktivierungsenergie von GaN eine erhöhte Lebensdauer (Bild 1).

Zweidimensionales Elektronengas

Die hohe Elektronenbeweglichkeit der HEMTs entsteht wiederum dadurch, dass sie minde-

stens zwei unterschiedliche Verbindungs-Halbleitermaterialien mit unterschiedlicher Bandlücke nutzen, neben GaN beispielsweise noch AlGaN. An der Grenzschicht zwischen beiden Materialien entsteht dann das sogenannte zweidimensionale Elektronengas, eine Zone, in der sich Elektronen entlang der Grenzfläche – und nur entlang dieser – besonders schnell bewegen können (Bild 2).

Ein Problem der normalen GaN-HEMTs ist, dass sie von Natur aus ohne Steuerspannung leitend sind – es sind selbstleitende Verarmungstypen. Damit ähneln sie zwar wieder den Elektronenröhren, doch war dieses Verhalten schon bei diesen lästig. Ein Bauteil, das ohne Steuerspannung einschaltet, ist schon in Kleinleistungsschaltungen gewöhnungsbedürftig, in der Leistungselektronik jedoch absolut problematisch, weil ein Ausfall der Ansteuerung zum Durchschalten aller Leistungsstufen und damit zu Kurzschlüssen führt.

Ohne Steuerspannung abgeschaltet ist angenehmer

Selbstsperrende Anreicherungstypen sind im Schaltungsdesign wesentlich angenehmer, doch beim GaN-HEMT eher als p-Typ-Varianten realisierbar, bei denen Elektronenlücken (Löcher) den Strom darstellen, nicht Elektronen. Diese haben leider gegenüber den n-Typ-Varianten bislang noch die schlechteren Kenndaten. Auch andere Designvarianten, die zu HEMTs führen, die ohne Steuerspannung sperren, haben teils funktionelle Nach-

teile, erreichen beispielsweise nur 200 V Sperrspannung oder haben kein isoliertes Gate.

transphorm hat dieses Problem aktuell durch eine Kaskoden-Schaltung nach Bild 3 aus einem selbstsperrenden Niederspannungsmosfet in Silizium-Technik und einem normalen n-Typ-HEMT gelöst. Bei kleinen Spannungen ist der konventionelle MOSFET noch schnell genug und die Kaskode ist so ebenfalls selbstsperrend. Ein Miller-Plateau tritt nicht in Erscheinung und 650 V Sperrspannung wie bei IGBTs und MOSFETs sind kein Problem.

Der Kaskoden-HEMT kann nun prinzipiell wie ein normaler Silizium-Leistungsmosfet eingesetzt werden. IGBT- und MOSFET-Treiberschaltungen sind daher auch für GaN-HEMTs verwendbar und Steuerspannungen bis zu ± 18 V mit ihrem erhöhten Störabstand sind einsetzbar.

Speziell entwickelte Schaltung

Den HEMT 1:1 anstelle eines Mosfets in eine vorhandene Schaltung einzubauen, ist allerdings nicht sinnvoll, weil er dabei seine Vorzüge nicht ausspielen kann. HEMTs sollten schon eigens für sie entwickelte Schaltungen erhalten, die die höhere Schaltgeschwindigkeit, die geringere Verlustleistung und auch andere Unterschiede bei den „inneren Werten“ berücksichtigen. So enthält der HEMT keine langsame Body-Diode mit hohem Qrr, die Probleme bereitet, und benötigt keine externen Freilaufdioden (Bild 4). Auch dies macht Schaltungen mit GaN-Leistungshalbleitern

schneller. IGBTs schaffen maximal zweistellige kHz-Werte und benötigen zusätzliche Freilauf-Dioden. 600-V-MOSFETs erreichen wegen des hohen Qrr ihrer Body-Dioden in Brückenschaltungen auch keine besseren Ergebnisse. Ein aktuell lieferbarer GaN-HEMT hat dagegen Einschaltzeiten von nur 3,5 ns.

Keine Body-Diode

Wirkungsgrade und Leistungsdichten für Stromversorgungen und Spannungswandler mit GaN-Leistungshalbleitern liegen deutlich über denen optimierter Silizium-Lösungen. Dabei muss das schnellere Schalten nicht zu erhöhten Funkstörungen führen. Um diese zu minimieren, gibt es transphorm-HEMTs jeweils in unterschiedlichen Bauformen mit Source oder Drain an der Kühlfahne, um an dieser auch in Brücken- und Gegentakt-Schaltungen stets ein stabiles Potential ohne schnelle Spannungswechsel zu haben.

Neben SMD-Gehäusen sind die HEMTs aktuell auch in TO-220- und TO-247-Gehäusen lieferbar, die besser an Kühlkörper geschraubt werden können. So sind gegenwärtig mit dem TPH3207 bereits bis zu 220 A Spitzenstrom möglich bei 650 V Schaltspannung, 41 m Ω Durchgangswiderstand und einem Qrr von nur 175 nC bei voller Einhaltung der JEDEC-Qualifikationen.

Dabei wird es natürlich nicht bleiben. 2017 sollen im TO-247-Gehäuse unter 30 m Ω erreicht werden, in SMD- und TO-220-Gehäuse unter 50 m Ω und damit bis zu 2,5 kW Leistung in der Applikation. 2018 folgen dann höhere Sperrspannungen von 900

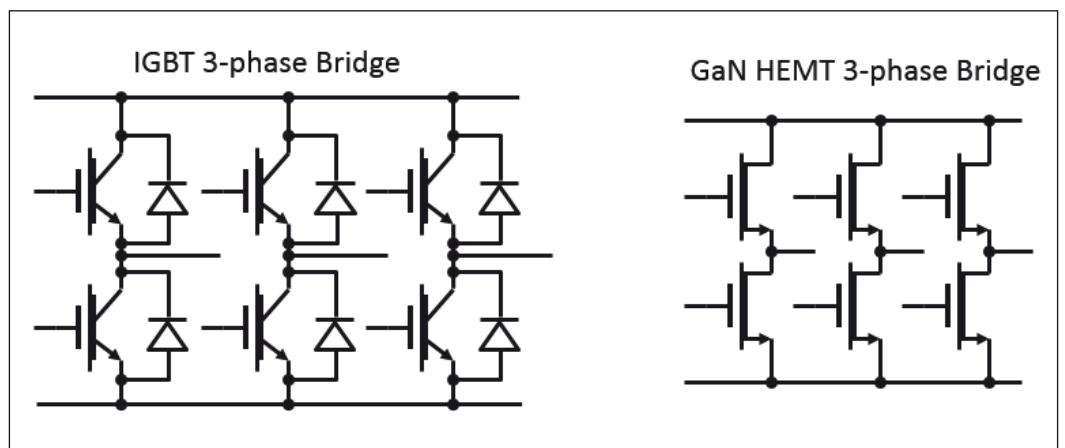


Bild 4: GaN-HEMTs benötigen auch in mehrphasigen Brückenschaltungen keine Freilaufdioden

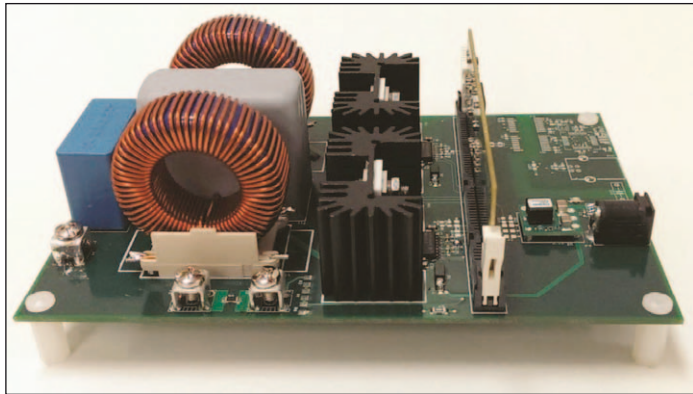


Bild 5: Wechselrichter-Demoboard, das die kompakteren Layouts widerspiegelt, die GaN-Halbleiter gegenüber Silizium-IGBTs ermöglichen

und 1200 V sowie nativ selbstsperrende HEMTs. Dies übrigens nicht, um höhere Geschwindigkeiten gegenüber der MOSFET-HEMT-Kaskode zu erreichen, sondern um die Chipfläche und Bauteilanzahl und damit die Kosten zu reduzieren und die Zuverlässigkeit zu erhöhen.

Bald auch ohne Kaskode

Schaltfrequenzen von 40 MHz und mehr in Schaltnetzteilen, wie mit selbstsperrenden HEMTs ohne Kaskode erreichbar, werden auf absehbare Zeit noch nicht Realität, so Zan Huang von transphorm, da dies nicht nur bei den Halbleitern, sondern auch bei den passiven Bauelementen entsprechend kürzere Verdrahtungswege und damit kompaktere Bauteile erfordert. Für die hohen Leistungsdichten bei solch hohen Frequenzen geeignete Ferrite und Keramiken stehen gegenwärtig noch nicht zur Verfügung. Zudem können die höheren Frequenzen gar nicht in allen Schaltungen genutzt werden. Inverter lassen sich mit geeigneten passiven Bauelementen so kleiner bauen, für reine PFC-Schaltungen sind die höheren möglichen Frequenzen dagegen irrelevant. Bidirektionale Wandler nutzen allerdings dieselbe Baugruppe für Inverter und PFC.

MOSFET-HEMT-Kaskode

Für die aktuell möglichen Konfigurationen ist die MOSFET-HEMT-Kaskode dagegen mehr als ausreichend, ebenso wie die bedrahteten Gehäuseformen TO-220 und

TO-247, die sich bewährt haben und so eben die hohe Zuverlässigkeit der transphorm-Produkte auch nach JEDEC-Spezifikationen gewährleisten. Nichtsdestotrotz werden 2017 neben dem bereits existierenden HEMTs im PQFN-Gehäuse weitere SMD-Bauformen kommen, wie SO-8/SO-16, TO-263 (D2PAK), TO-268 (D3PAK) und andere SMT-Gehäuse. Später folgen komplette IPM-Module wie beispielsweise Halbbrücken.

Die Entwicklung der GaN-Halbleiter schreitet schnell fort. SiC (Siliziumkarbid) in HF-Verstärkern wurde in gerade drei Jahren durch GaN abgelöst. GaN in Leistungshalbleitern gilt noch als gegenüber Silizium-Technologie eingeschränkt, doch nach den 600-V-Baureihen folgen die 1200-V-Varianten, die damit ein Pendant zur gängigsten IGBT-Sperrspannungsklasse darstellen. Ebenfalls interessant sind Vier-Quadranten-HEMT-Schalter, die bislang übliche, weit komplexere Konstruktionen ersetzen können. Die etwas höheren Preise für GaN-Halbleiter schrecken zwar noch manchen Entwickler von deren Anwendung ab. Marktforscher gehen jedoch davon aus, dass ein 15-A-GaN-HEMT bald preislich mit seinem Silizium-Pendant gleichziehen kann und schon jetzt durch die technischen Vorteile punktet.

Musteraufbauten

Vorhandene Schaltungslayouts sind für die höheren Schaltgeschwindigkeiten und Taktfrequenzen der GaN-HEMTs oft ungeeignet, können durch zu hohe und womöglich noch ungewollt gekoppelte para-

sitäre Induktivitäten zu Fehlfunktionen und im Extremfall zur Zerstörung der Halbleiter führen. Um dem Entwickler frustfreies Testen der GaN-HEMTs mit unterschiedlichen Wandertopologien zu ermöglichen, hat transphorm deshalb eigene Musteraufbauten entwickelt.

Selbstverständlich stehen Layout und Stücklisten auch einzeln zur Verfügung, doch schon zur eingehenden Beratung des Entwicklers über die „Do's und Don'ts“ der flinken Schalter werden diese erst bei direktem Kontakt herausgegeben und nicht zum allgemeinen Download angeboten, um nicht durch vermeidbare Fehler oder eigene Anpassungen schlechte Performance oder Ausfälle zu erzeugen.

Einsatzbereiche

Der Photovoltaik-Wechselrichter in Bild 5 stellt ein typisches Einsatzgebiet von GaN-Halbleitern dar. Hier sind sowohl der höhere Wirkungsgrad als auch das kleinere Volumen von Vorteil. Yaskawa entwickelte dazu mit transphorm-GaN-HEMTs eine Lösung, die mit 50 kHz Taktfrequenz und einer Reduzierung von Größe und Verlusten um 40% punktet.

Demoboards

Ein Demoboard ermöglicht Entwicklern das Evaluieren einer derartigen Lösung in Photovoltaik-Wechselrichtern oder USV-Anlagen. Es enthält beispielsweise vier

als Vollbrücke konfigurierte GaN-HEMTs, die mit 100 kHz oder noch schneller schalten können, um aus 400 V_{DC} 100 bis 240 V_{AC} zu erzeugen. 1000 W Ausgangsleistung sind mit Konvektionskühlung erreichbar, mit Lüftung auch 1500 W.

Bei einem anderen Demoboard wurde eine Stromversorgung mit Universal-Wechselstromeingang (100 bis 240 V_{AC} ohne Umschalten) für einen typischen „All-in-One“-Computer mit 250 Watt, also eine eher preissensitive Consumer-Anwendung, von Standard-Silizium-Halbleitern auf GaN umdesignt. Es nutzt drei GaN-HEMTs in der PFC-Schaltung und den resonanten Brückkreisen. In letzteren ermöglicht die äußerst niedrige Ausgangskapazität der GaN-HEMTs eine schnellere Umladung und damit 200 kHz Taktfrequenz bei verringerten Verlusten. Tatsächlich verringerten sich die Größe um 45%, wie in Bild 6 zu sehen, und die Verluste um 30%, was einen Wirkungsgrad von über 95% ermöglichte. Das Netzteil kann 12 V Ausgangsspannung bei bis zu 20 A liefern, wobei am 230-V-Netz bis zu 95,4% Wirkungsgrad erreicht werden.

Literatur

[1] Transphorm-Halbleiter bei HY-LINE-Power Components www.hy-line.de/transphorm

■ HY-LINE Power Components www.hy-line.de/power

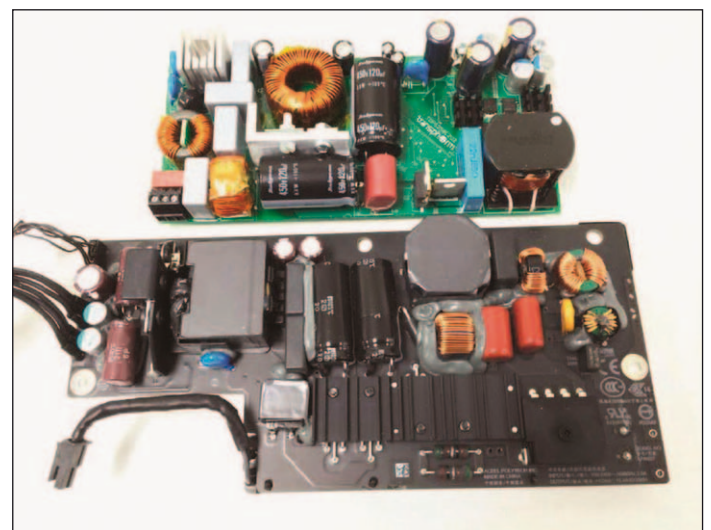


Bild 6: Referenzboard für 250-W-All-in-One-Computernetzteil im Vergleich zur heute verbauten Silizium-Lösung