

Die Zuverlässigkeit von GaN-Leistungsschaltern auf dem Prüfstand

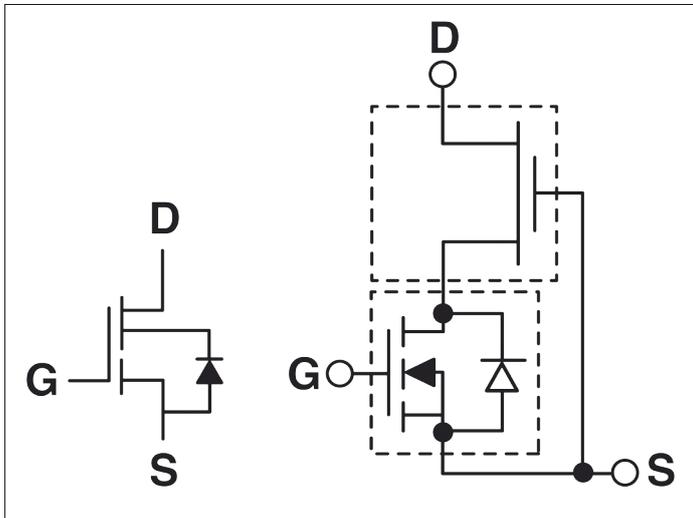


Bild 1: Schaltsymbol (links) und Zwei-Chip-Bauteilstruktur (rechts) des TP65H035WSQA, der einen GaN-HEMT (High-Electron-Mobility Transistor) mit einem Niederspannungs-Silizium-FET kombiniert.

Neue Technologien wie GaN-Wide Band Gap-Halbleiter faszinieren mit guten Leistungsdaten wie höheren Wirkungsgraden und Schaltfrequenzen. Doch wenn es um den Einsatz in sicherheitsrele-

vanten Umgebungen geht oder solchen, wo ein Ausfall hohe Kosten verursacht, geht der Entwickler lieber auf Nummer Sicher und bleibt bei älteren, erprobten Lösungen. Dies ist nicht mehr notwendig: GaN ist erwachsen geworden.

Die Vorteile von Leistungs-FETs auf der Basis von Galliumnitrid (GaN) mit großer Bandlücke (Wide Band Gap – WBG) sind so bedeutend, dass diese Bauelemente in anspruchsvollen Anwendungen wie beispielsweise Stromversorgungs-Subsystemen in Kraftfahrzeugen oder Stromversorgungen von Datenzentren eine immer wichtigere Rolle spielen. Dabei handelt es sich um Anwendungen mit schwierigen Betriebsbedingungen, bei denen Ausfälle aufgrund von Garantiekosten und Gefahren bei Kraftfahrzeugen oder der hohen Kosten für Ausfälle von Rechenzentren nicht toleriert werden können.

Konstrukteure müssen sicher sein können, dass neue Technologien verlässlich, robust und zuverlässig sind. Angesichts der Bedeu-

tung von Qualität und Zuverlässigkeit auf dem Leistungs-MOSFET-Markt hat der von HY-LINE vertretene Hersteller Transphorm in seiner Designphilosophie stets den Schwerpunkt auf die Produktzuverlässigkeit gelegt und war an vielen „Zuverlässigkeits-Premieren“ in der Branche beteiligt.

GaN-Leistungsschalter

Für die hier besprochenen Tests und Analysen konzentrierte sich das Team auf den Transphorm TP65H035WSQA – ein selbstsperrendes Zwei-Chip-Design nach Bild 1 aus einem GaN-Transistor mit hoher Elektronenbeweglichkeit im Verarmungsmodus (HEMT) in Serie mit einem selbstsperrenden Niederspannungs-Silizium-FET. Die wichtigsten Spezifikationen für dieses Bauelement, das in einem TO-247-Gehäuse untergebracht und bei 175 °C nach AEC-Q101 qualifiziert ist:

$U_{ds(min)}$: 650 V
 $U_{(TR)DSSmax}$: 800 V
 $R_{ds(on)max}$: 41 mOhm



Autoren:
 Ron Barr, Vice President of Quality and Reliability bei Transphorm und

Dipl. Ing. (FH) Wolf-Dieter Roth, technischer Redakteur HY-LINE Power Components www.hy-line-group.com/power

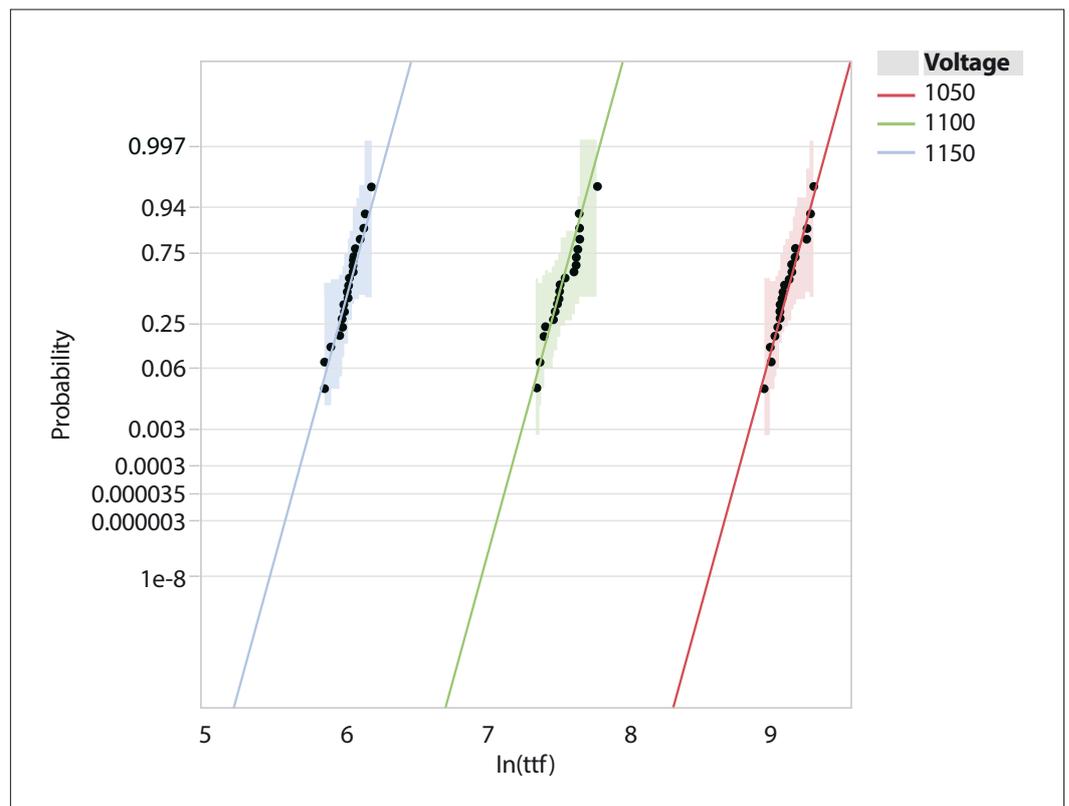


Bild 2: Beschleunigung der Ausfälle bei Spannungserhöhung

Bei der Bewertung der Produktzuverlässigkeit gibt es vier Arten von Zuverlässigkeitsinformationen/-daten, mit denen der Konstrukteur feststellen kann, ob das Bauteil für seine Anwendung geeignet ist. Diese sind

- Produktqualifizierung
- Stark beschleunigte Lebensdauertests
- Frühausfalltests
- Zuverlässigkeit im Feldeinsatz.

Qualifizierung

Zur Produktqualifizierung sind in der Branche die JEDEC JESD 47 für kommerzielle Geräte und die viel strengere Norm AEC-Q101 für Geräte der Automobilindustrie bekannt und gebräuchlich. Beide enthalten eine festgelegte Reihe von Tests, die die Komponenten bestehen müssen, beispielsweise Temperaturzyklus, Hochtemperatur-Reverse-Bias, Hochtemperatur-Gate-Bias u.v.m, bevor ein Produkt als JEDEC-qualifiziert oder Q101-qualifiziert betrachtet werden kann. Transphorm produzierte die ersten Hochspannungs-GaN-Produkte der Branche, die entweder JEDEC- oder Q101-qualifiziert waren, und erhöht den Anspruch weiter, indem es als erster Anbieter GaN-Bauelemente für 175 °C und Q101-qualifizierte 650-V-Bauelemente und als einziger Anbieter JEDEC-qualifizierte 900-V-GaN-Bauelemente anbietet.

Lebensdauertests im Zeitraffer

Hoch beschleunigte Lebensdauertests (Highly Accelerated Life Testing, HALT) sind eine gut definierte Methodik zur Belastung von Geräten bis zu deren Versagen unter Bedingungen, die manchmal auch außerhalb ihrer Datenblattgrenzen liegen. Dabei werden gleichzeitig Daten über die Zeit bis zum Versagen (Time to Failure, TTF) gesammelt, sodass geeignete Modelle zur Vorhersage der Verschleißlebensdauer (auch bekannt als intrinsische Lebensdauer) angewendet werden können.

GaN-FETs sind für hohe Spannungen entwickelte laterale Bauelemente. Zwischen der Gatestruktur und dem Drain entsteht im Betrieb ein hohes elektrisches Feld, welches das Dielektrikum des Isolators mit der Zeit bis zum Ausfall verschlech-

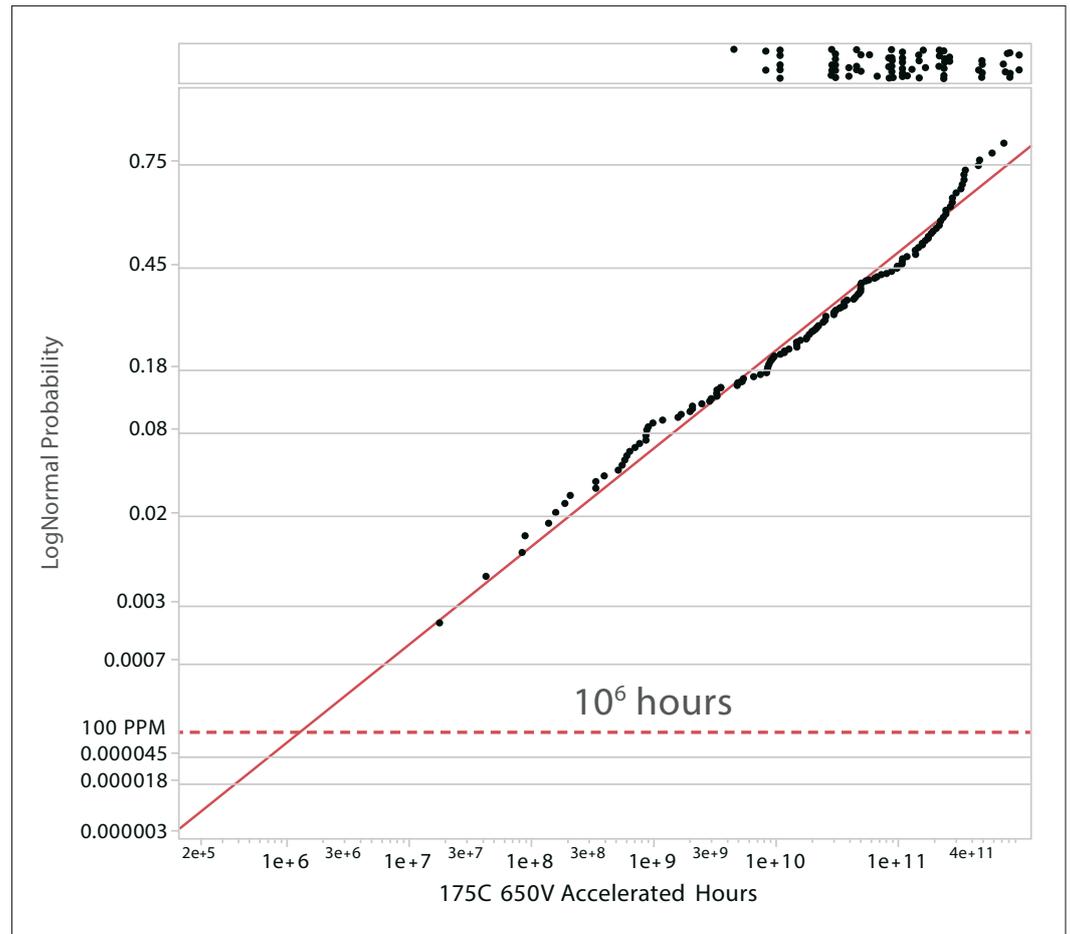


Bild 3: Use plot: Ausfallwahrscheinlichkeit vs. Betriebszeit

tern kann. Dieser zeitabhängige dielektrische Durchschlag (time dependent dielectric breakdown – TDDB) des Dielektrikums ist ein primärer Ausfallmodus des Bauelements mit einem gut verstandenen Mechanismus. Um die Lebensdauer des Bauelements einschätzen zu können, sind Spannungs- und Temperaturbeschleunigungsfaktoren zu bestimmen, aus denen die intrinsische Lebensdauer unter normalen Nutzungsbedingungen berechnet werden kann.

Chargen von Bauteilen mit einer Nennspannung von 650 V wurden hierzu bei Spannungen zwischen 1050 V und 1150 V im ausgeschalteten Zustand in Sperrrichtung getestet, bis die meisten Bauelemente ausgefallen waren. Hieraus errechnet sich nach Bild 2 eine mittlere Zeit bis zum Versagen unter den diversen Betriebszuständen.

Das Modell

In diesem Stadium muss man ein geeignetes Modell für den Spannungsbeschleunigungsfaktor auswählen. In der Industrie ist es üblich,

das Exponentialmodell $AF_V = e^{(\alpha \Delta V)}$ zu verwenden. Der Wert von $\alpha = 0,026$ wurde experimentell aus diesen Daten abgeleitet. ΔV ist die Differenz zwischen der erhöhten Spannung für den Test und der tatsächlichen Spannung in der Anwendung.

Verschiedene Temperatur

In ähnlicher Weise werden Teile bei drei verschiedenen Temperaturen bis zum Versagen getestet. Dazu wird ein Arrhenius-Modell angewandt, um die Aktivierungsenergie (E_{aa}) von -0,3 eV zu berechnen. Aus der experimentell abgeleiteten Aktivierungsenergie kann dann ein Temperaturbeschleunigungsfaktor A_{FT} berechnet werden,

$$A_{FT} = \exp \left[\left(\frac{E_{aa}}{k} \right) \times \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right) \right]$$

T_U und T_A sind die Anwendungs- bzw. zur Beschleunigung erhöhte Temperatur in Grad Kelvin, während k die Boltzmann-Konstante ist.

Wir haben jetzt sechs Datensätze, also drei verschiedene Spannungen und drei verschiedene Temperaturen, alle unter beschleunigten Testbedingungen gewonnen. Die Zeit bis zum Versagen für jeden

Test ist jetzt unter einem einzigen Satz von Einsatzbedingungen normalisiert, die im Allgemeinen aus dem Einsatzprofil der Anwendung abgeleitet werden.

Berechnung der Lebensdauer

In diesem Fall wählen wir einen extremen Satz von Bedingungen für die Berechnung der Lebensdauer bei 650 V und 175 °C bei 100 % Duty Cycle. Der Gesamtbeschleunigungsfaktor AF_{total} ist gleich dem Produkt aus AF_T und AF_V für jeden Satz beschleunigter Bedingungen. Die Zeit bis zum Versagen unter Betriebsbedingungen (TTF_{use}) ist gleich dem Produkt aus (AF_{Total}) und der Zeit bis zum Versagen unter Testbedingungen (TTF_{test}).

$$TTF_{use} = AF_{Total} \times TTF_{test}$$

Die Daten aller Tests können in einem einzigen Modell kombiniert werden, das in Bild 3 zu sehen ist und als „Use Plot“ bezeichnet wird. Es zeigt die Versagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von

Bauelemente

Voltage	PPM	FIT
520 V	5.33	0.61
480 V	1.88	0.22
400 V	0.24	0.03

Tabelle 1: Frühausfälle vs. Spannung

der Zeit bis zum Versagen unter Einsatzbedingungen. Es ist üblich, die Lebensdauer des Geräts so zu definieren, dass die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls 100 ppm beträgt, was in diesem Fall 106 Stunden, also über 100 Jahre Dauerbetrieb bedeutet.

Frühausfall testen

Early-Life-Failure-Tests sollten zur Berechnung des Garantierisikos innerhalb einer Anwendung verwendet werden und dienen dazu, die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls vor der Verschleißphase zu prüfen. Frühzeitiger Aus-

fall (Säuglingssterblichkeit) tritt typischerweise aufgrund von Defekten im Herstellungsprozess auf, die nicht erkannt und aussortiert wurden und die allgemein als „latente Defekte“ bezeichnet werden. Im Falle eines GaN-Bauteils können latente Defekte zu einer Verzerrung des elektrischen Feldes und in Folge zu beschleunigtem Ausfall an der Fehlerstelle führen.

Um einen aussagekräftigen Test zu haben, sollte man versuchen, eine viel größere Stichprobe von Bauelementen zu testen als bei den zuvor beschriebenen HALT-Tests, um die Wahrscheinlich-

keit zu erhöhen, dass ein latenter Defekt eingefangen wird. Die verwendeten Methoden sind in der JEDEC-Norm JESD 74A, die auf der JEDEC-Website verfügbar ist, vollständig dokumentiert.

Qualität des Produktionsprozesses beurteilen

Um die Qualität des Produktionsprozesses über einen längeren Zeitraum zu beurteilen, wurden Stichproben von jeweils etwa 40 Einheiten nach dem Zufallsprinzip aus den Produktionslosen ausgewählt, bis wir über 2200 Muster aus einer mehrmonatigen Produktion hatten. Jedes Muster wurde dann im ausgeschalteten Zustand jeweils 500 Stunden lang bei 800 V und 85 °C beansprucht, was, wenn wir unseren Beschleunigungsfaktor anwenden, einer Beanspruchung jedes Bauteils über 90 Jahre bei einer Gebrauchsspannung von 520 V bei 100 % Einschaltdauer entspricht. Bei unserem Test sind keine Teile ausgefallen.

Wir können nun die Zuverlässigkeit der Probe berechnen, wobei wir JESD 74A als Richtlinie verwenden. Frühe Lebensdauerausfälle werden üblicherweise in FITs oder in PPM/Jahr berechnet. Die Daten in Tabelle 1 zeigen sehr niedrige FIT-Raten, was eine potentiell sehr gute Zuverlässigkeit im Feld vorhersagen würde.

Zuverlässigkeit im Feld

Die Berechnung der Feldzuverlässigkeit durch Transphorm folgt der Branchenpraxis. Sie berücksichtigt die Anzahl der ausgelieferten Geräte, wie lange sie bereits im Einsatz sind und wie viele von Kunden als Fehler gemeldet wurden. Natürlich werden nicht alle Produkte sofort ausgeliefert oder verwendet. Um einen konservativen Ansatz zu verfolgen, passen wir die Anzahl der Geräte-Stunden an, die wir anrechnen, indem wir die Gesamtzahl halbieren. Mit weit über sieben Milliarden Geräte-stunden im Feld und bisher insgesamt zwei Rücksendungen kann Transphorm eine Feldzuverlässigkeit von unter 1 FIT vorweisen.

Zusammenfassung

GaN-Leistungsbaulemente von Transphorm übertreffen die anspruchsvollen Zuverlässigkeitsanforderungen von Automobil- und Industrie-OEMs. Die detaillierten Tests und Analysen zeigen, dass diese GaN-Bauelemente mindestens so zuverlässig sind wie solche aus Silizium oder anderen Materialien mit großer Bandlücke und oft sogar besser als diese.

Literatur:

[1] GaN-Schalter bei HY-LINE-Power Components, www.hy-line-group.com/GaN ◀