



DIGITAL INDUSTRIES SOFTWARE

Verbesserung der Zuverlässigkeit von Hochleistungs-Halbleitern

Verwendung von Simcenter zur Beschleunigung von Tests und Fehlerdiagnosen mit thermischer Charakterisierung auf industriellem Niveau

Kurzdarstellung

Der Energiebedarf sowohl von Unterhaltungs- als auch von Industrieelektronik-Systemen steigt. Daher stehen Zulieferer von Elektronik-Leistungskomponenten und Erstausrüster vor der Herausforderung, hoch zuverlässige Systeme bereitzustellen, die für die Luftfahrt, Elektrofahrzeuge, Züge, Stromerzeugung und erneuerbare Energieerzeugung benötigt werden. Die Simcenter™ Micred™ Power Tester-Hardware wurde entwickelt, um diese Herausforderung zu bewältigen, indem sie das Testen und Diagnostizieren möglicher Fehlerursachen von Stromversorgungskomponenten beschleunigt. Zwei Beispiele mit IGBT-Modulen (Insulated-Gate Bipolar Transistor) zeigen, wie dieses Problem in Angriff genommen werden kann.

Einführung

Leistungselektronische Bauelemente wie Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffektransistoren (MOSFETs), Dioden, Transistoren und IGBT kommen überall dort zum Einsatz, wo elektrische Energie erzeugt, umgewandelt und gesteuert wird. Da der Energiebedarf sowohl in Verbraucher- als auch in Industrieanwendungen steigt, besteht die Herausforderung für die Hersteller von Leistungsmodulen darin, den maximalen Leistungspegel und die Strombelastbarkeit zu erhöhen und gleichzeitig eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit zu gewährleisten. So wird beispielsweise erwartet, dass Bahn-Traktionsanwendungen eine zuverlässige Lebensdauer von 30 Jahren haben und dass Leistungsmodule, die in Hybrid- und Elektrofahrzeuge sowie Solar- und Windenergieanlagen eingebaut werden, 50.000 bis Millionen Zyklen erfordern.

Angesichts dieses steigenden Drucks haben Innovationen neue Technologien hervorgebracht, wie z. B. keramische Substrate mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit, Ribbon-Bonding als Ersatz für dicke Bonddrähte und lötfreie Die-Attach-Technologien zur Verbesserung der Zyklifestigkeit der Module. Die neuen Substrate tragen dazu bei, die Temperaturen zu senken, die Bänder können mehr Strom aufnehmen und der lötfreie Die-Attach kann aus gesintertem Silber bestehen, das einen besonders

niedrigen Wärmewiderstand aufweist. Kurz gesagt, der thermische Pfad wurde verbessert. Thermische und thermomechanische Belastungen dieser Systeme können jedoch immer noch zu Ausfällen im Zusammenhang mit Stromwechselzyklen und Hitze führen. Diese Spannungen können Probleme wie Bonddraht-Degradation (Abbildung 1), Lötermüdigung, Delamination von Stäben und Die- oder Substratrisse verursachen. Der Prozess, der traditionell für die Prüfung von Stromwechselfehlern verwendet wird, ist repetitiv und zeitaufwendig. Es kann nur post mortem im Labor durchgeführt werden, um den internen Zustand des Gehäuses zu analysieren.



Abbildung 1: Beschädigte IGBT-Module

Die Verwendung des Simcenter Micred Power Tester beschleunigt das Testen und Diagnostizieren

Simcenter Micred Power Tester ist die einzige für Fertigungs- und Laborumgebungen entwickelte Maschine, die einen automatisierten Stromkreislauf durchführt und gleichzeitig Analysedaten für die Echtzeitdiagnose eines Ausfalls im Prozess erzeugt (Abbildung 2). Es wurde entwickelt, um Lebensdauertests durchzuführen und die Zuverlässigkeit von Anwendungen zu verbessern, die Leistungselektronikmodule verwenden.

Der Simcenter Micred Power Tester ist die industrielle Implementierung der Simcenter Micred T3STER™-Hardware für die thermische Mess- und Charakterisierungstechnologie für elektronische Bauteile, Leuchtdioden (LED) und Systeme. Es handelt sich um eine einzigartige Funktion, die vollautomatische Power-Tests und Power-Cycling gleichzeitig auf ein und demselben Gerät ermöglicht, ohne dass das zu testende Gerät während des Prozesses entfernt werden muss. Eine einfache Touchscreen-Schnittstelle ermöglicht dem Techniker den Einsatz in der Fertigung und/oder einem Fehleranalyseingenieur die Verwendung im Labor (Abbildung 3).

Der Simcenter Micred Power Tester eignet sich am besten für die Analyse von MOSFETs, IGBTs und generischen zweipoligen Geräten. Er misst Strom, Spannung und Chip-Temperatur und verwendet eine Strukturfunktionsanalyse, um Änderungen oder Fehler in der Gehäusestruktur zu erfassen. Die Maschine kann die Gehäuseentwicklung, Zuverlässigkeitstests und Chargenprüfung eingehender Teile vor der Produktion verbessern und beschleunigen.



Abbildung 2: Der Simcenter Micred Power Tester ist für die Fertigung von Halbleitern entwickelt.

Während des Power-Cyclings zeigt die Struktur-Funktions-Analyse in Echtzeit den laufenden Ausfall, die Anzahl der Zyklen und die Ursache des Ausfalls an, sodass keine Post-Mortem-Analyse im Labor erforderlich ist. Langwierige zyklische Messungen an mehreren Proben, um den Bereich der Zykluszahl abzuschätzen, der der Degradation entspricht, sind nicht mehr notwendig. Außerdem ist in diesem Bereich keine übermäßige Anzahl von Wärmemessungen erforderlich, um sicherzustellen, dass die Degradation erfasst wird. Das zu testende Gerät muss nur einmal montiert und angeschlossen werden; Zyklus und Konfiguration werden zu Beginn festgelegt.



Abbildung 3: Die Touchscreen-Oberfläche des Simcenter Micred Power Tester (von links nach rechts): Hauptbildschirm, Geräteerstellung und Platzierung der Geräte auf der Kühlplatte.

Mit dem Simcenter Micred Power Tester sind Anbieter von Leistungselektronik in der Lage, eine zuverlässigere Konstruktion für Leistungselektronik zu entwickeln und ihren Kunden Zuverlässigkeitssangaben zu liefern. Komponentenentwickler und -hersteller können die Zuverlässigkeitsspezifikationen der Lieferanten validieren und die Zuverlässigkeit des Gehäuses charakterisieren. Wer Produkte mit hohen Anforderungen an die langfristige Zuverlässigkeit entwickelt und herstellt, kann auf Systemebene testen.

Der Simcenter Micred Power Tester wurde entwickelt, um der statischen Testmethode des Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC) Standard JESD 51-1 zu folgen. Basierend auf dem erfassten Einschwingverhalten kann das System automatisch Strukturfunktionen generieren. Strukturfunktionen bieten ein äquivalentes Modell des Wärmeleitungspfades, das durch thermische Widerstände und thermische Kapazitäten ausgedrückt

wird. Sie können verwendet werden, um strukturelle Fehler zu erkennen oder um partielle thermische Widerstände im Wärmeleitungspfad zu erfassen. Der Simcenter Micred Power Tester unterstützt zudem den JEDEC-Standard JESD 51-14 für transiente Dual-Interface-Messungen zur Bestimmung von R_{thJC} . Der Prozess der kombinierten Power-Cycling- und R_{th} -Messung belastet das Gerät mithilfe von Power-Cycling, führt während des Zyklus regelmäßige R_{th} -Messungen durch, überwacht Systemparameter wie Spannung und Strom und erhöht automatisch die R_{th} -Messfrequenz.

Die vom Simcenter Micred Power Tester erzeugten Test- und Charakterisierungsdaten können zur Kalibrierung und Validierung detaillierter Modelle in der Simcenter Flotherm™-Software und der Simcenter FLOED™-Software für thermische Simulation verwendet werden. Simcenter ist Teil der Siemens Xcelerator Business-Plattform mit Software, Hardware und Services.

Beispiele für das Testen von IGBT-Modulen über die gesamte Lebensdauer von Zyklen

Entwickler von elektronischen Leistungsmodulen und den zugehörigen Baugruppen und Systemen müssen sicherstellen, dass der Wärmewiderstand zwischen dem Chip und der Grundplatte so gering wie möglich bleibt, eine zuverlässige Verbindung schafft und sicherstellt, dass die Die-Attach-Schicht während des Lebenszyklus des Produkts einer erheblichen thermischen Belastung standhält. Das Verhältnis

zwischen der Anzahl der möglichen Lastzyklen und den Temperatur-/Lastbedingungen des Geräts muss eine gute Abschätzung der Lebensdauer des Leistungsmoduls ermöglichen.

Mit der Einführung von Elektro- und Hybrid-elektrofahrzeugen haben IGBT-Geräte eine führende Position bei Interaktions- und Hochspannungswandleranwendungen erlangt. Die in der Verbindungsstelle abgeleitete Wärme hat einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit dieser Bauteile. Hohe Sperrsichttemperaturen und hohe Temperaturgradienten während des Betriebs induzieren mechanische Belastungen, insbesondere an Kontaktflächen zwischen Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten, die zur Degradation oder zum vollständigen Ausfall dieser Bauteile führen können.

Wir haben Tests mit vier IGBT-Modulen mittlerer Leistung durchgeführt, die zwei Halbbrücken enthalten, um die umfangreichen Daten zu

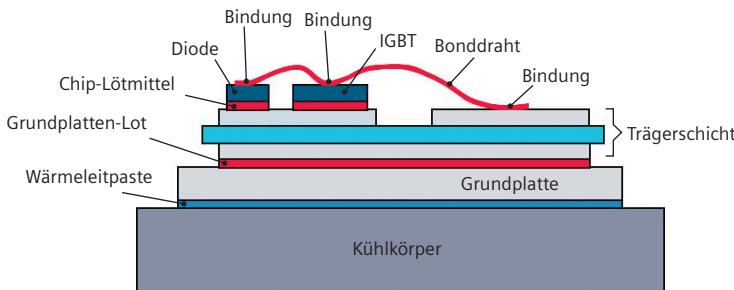


Abbildung 4: Querschnitt eines IGBT-Moduls

demonstrieren, die durch automatisches Power-Cycling der Komponenten gewonnen werden können. Die Module wurden mit einem hochleitfähigen Wärmeleitpad an der flüssigkeitsgekühlten Kühlplatte befestigt, die in den Simcenter Micred Power Tester integriert ist, um den thermischen Widerstand an der Grenzfläche zu minimieren. Mit einer vom Simcenter Micred Power Tester gesteuerten gekühlten Umwälzpumpe wurde die Temperatur der Kühlplatte während des gesamten Experiments bei 25 Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) gehalten.

Die Gates der Bauelemente wurden mit ihren Drains verbunden (dem sogenannten vergrößerten Diodenaufbau), wobei jede Halbbrücke über eine separate Treiberschaltung mit Strom versorgt wurde. An jede Halbbrücke wurden zwei Stromquellen angeschlossen. Eine Hochstromquelle, die schnell ein- und ausgeschaltet werden kann, wurde verwendet, um die Bauelemente schrittweise mit Stromänderungen zu versorgen. Eine Niedrigstromquelle sorgte für eine kontinuierliche Vorspannung des IGBT, wodurch die Gerätetemperatur gemessen werden konnte, wenn der Heizstrom ausgeschaltet war.

Eine erste Reihe von Tests wurde an vier Proben mit konstanten Aufheiz- und Abkühlzeiten durchgeführt. Die Aufheiz- und Abkühlzeiten wurden so gewählt, dass sie eine anfängliche Temperaturschwankung von 100 $^{\circ}\text{C}$ für eine Leistung von ~200 Watt (W) mit 3 Sekunden Aufheizen und 10 Sekunden Abkühlen ergeben. Dies ahmt die Anwendungsumgebung am ehesten nach, in der die Verschlechterung der thermischen Struktur zu einer höheren Sperrsichttemperatur führt, die wiederum eine schnellere Alterung verursacht.

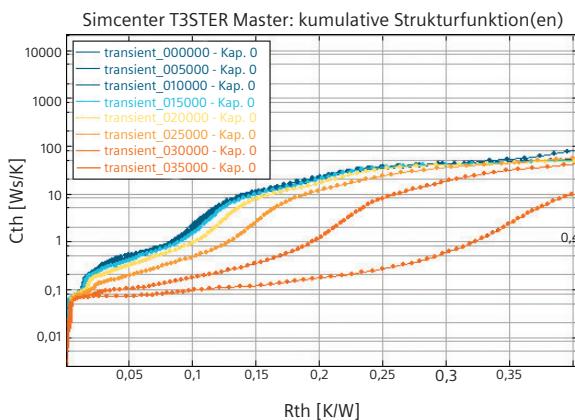


Abbildung 5: Strukturfunktionen der Probe 0 entsprechend den Kontrollmessungen zu verschiedenen Zeitpunkten

Von den vier Geräten fiel Stichprobe 3 kurz nach 10.000 Zyklen deutlich früher aus als die anderen. Die Proben 0, 1 und 2 hielten länger und fielen nach 40.660, 41.476 bzw. 43.489 Ein- und Ausschaltzyklen aus. Abbildung 5 zeigt die Strukturfunktionen, die aus den thermischen Transienten generiert werden, die nach jeweils 5.000 Zyklen an Probe 0 gemessen werden. Der flache Bereich bei 0,08 Watt x Sekunden/Kelvin (Ws/K) entspricht dem Die-Attach. Es ist zu sehen, dass die Struktur bis zu 15.000 Zyklen stabil ist, aber danach ist die Verschlechterung des Die-Attach offensichtlich, da sein Widerstand kontinuierlich zunimmt, bis das Bauelement versagt. Auch hier ist die unmittelbare Ursache des Geräteausfalls unbekannt, aber wir fanden heraus, dass sich zwischen Gate und Emitter ein Kurzschluss bildet und verbrannte Stellen auf der Chip-Oberfläche sichtbar werden.

Eine zweite Testreihe wurde an einem identischen Satz von Proben mit den verschiedenen Stromversorgungsstrategien durchgeführt, die vom Simcenter Micred Power Tester unterstützt werden. Die beiden Halbbrücken im Modul wurden auf der gleichen Grundplatte, aber auf getrennten Substraten montiert. Drei Geräte wurden in zwei Gehäusen getestet. Zwei der getesteten Geräte, IGBT1 und IGBT3, waren Teil desselben Moduls, aber unterschiedlicher Halbbrücke.

Haben wir die Stromkonstante für IGBT1, die Heizleistung für IGBT2 und die Sperrsichttemperaturänderung für IGBT3 beibehalten. Die Einstellungen wurden so gewählt, dass sie für alle Komponenten den gleichen anfänglichen Anstieg der Sperrsichttemperatur ergeben, mit drei Sekunden Aufheizen und 17 Sekunden Abkühlen und ~240 W Anfangsheizung für jedes für den Test ausgewählte Bauelement. Die gesamte Heiz- und Kühltransiente wird für jedes Bauelement in allen Zyklen gemessen, wobei die folgenden elektrischen und thermischen Parameter kontinuierlich vom Simcenter Micred Power Tester überwacht werden:

- Spannung des Bauelements bei eingeschaltetem Heizstrom
- Im letzten Zyklus angelegter Heizstrom
- Leistungsstufe
- Spannung des Bauelements nach ausgeschaltetem Heizstrom
- Spannung des Bauelements vor dem Einschalten des Heizstroms

- Höchste Sperrsichttemperatur während des letzten Ein- und Ausschaltzyklus
- Temperaturschwankung im letzten Zyklus
- Temperaturänderung normalisiert durch die Heizleistung

Darüber hinaus wurde die gesamte Länge der thermischen Transiente vom eingeschalteten stationären Zustand zum ausgeschalteten stationären Zustand nach 250 Zyklen unter Verwendung eines Heizstroms von 10 A gemessen, um Strukturfunktionen zu erstellen, mit denen eine Degradation des thermischen Stapels untersucht werden kann. Auch hier wurde das Experiment bis zum Versagen aller IGBT fortgesetzt.

Wie erwartet, fiel IGBT1 zuerst aus, da es keine Regelung der zugeführten Leistung gibt, wenn sich der Zustand des Bauteils verschlechtert. Interessanterweise zeigte sich keine Verschlechterung der thermischen Struktur (Abbildung 6).

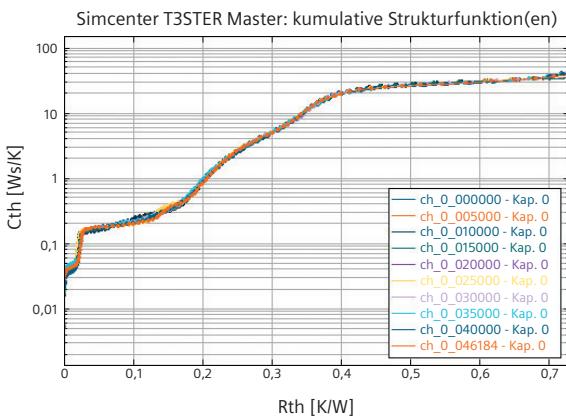


Abbildung 6: Änderung der Strukturfunktion von IGBT1 während des Ein- und Ausschaltens

Wir untersuchten die Entwicklung der Gerätespannung während des Experiments. In Abbildung 7 ist die Durchlassspannung von IGBT1 auf Heizstromniveau als Funktion der verstrichenen Leistungszyklen zu sehen. In den ersten 3.000 Zyklen ist eine abnehmende Tendenz zu erkennen. Diese anfängliche Änderung wurde durch den langsamen Rückgang der durchschnittlichen Temperatur des Bauelements um fast 5 °C verursacht. Trotz der negativen Temperaturabhängigkeit der Spannung des Bauelements bei niedrigen Strömen wurde bei hohen Strömen die Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung positiv.

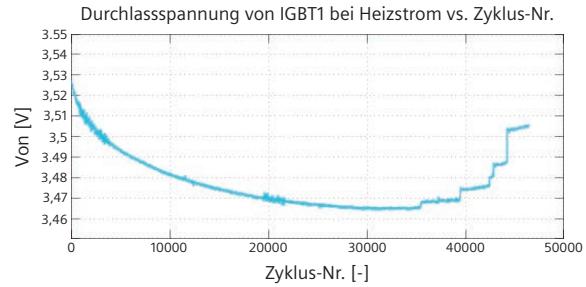


Abbildung 7: Durchlassspannung von IGBT1 auf Heizstromniveau in Abhängigkeit der Ein- und Ausschaltzyklen.

Nach etwa 35.000 Zyklen änderte sich diese Tendenz und die Spannung begann langsam anzusteigen. Darauf folgten schrittweise Spannungsänderungen bei Bauelementen, während sich die ansteigende Tendenz bis zum Ausfall des Bauelements kontinuierlich beschleunigte. Die steigende Spannung kann auf die Degradation der Bonddrähte zurückgeführt werden, da sich die Struktur nicht verändert hat. Dies liefert auch eine Interpretation der schrittweisen Änderungen der Spannung, wenn sich ein Bonddraht schließlich löst. Die zunehmenden Höhen dieser Stufen werden durch die zunehmende Änderung der Parallelwiderstandssumme des thermischen Widerstands des Bonddrahtes verursacht, wenn die Anzahl der Bonddrähte abnimmt. Wenn wir die Konstantstromstrategie verwenden, erhöht der Riss eines Bonddrahtes die Stromdichte in den verbleibenden Bindungen und beschleunigt die Alterung.

Abbildung 8 zeigt den gleichen Kurventyp für IGBT3. Hier setzt der tendenzielle Spannungsanstieg des Bauelements noch früher ein, aber durch die Regelung zur Konstanthaltung der Sperrsichttemperatur verringerte sich der Heizstrom proportional. Die Verringerung des Stroms reduzierte die Bondbelastung und verlängerte die gemessene Lebensdauer.

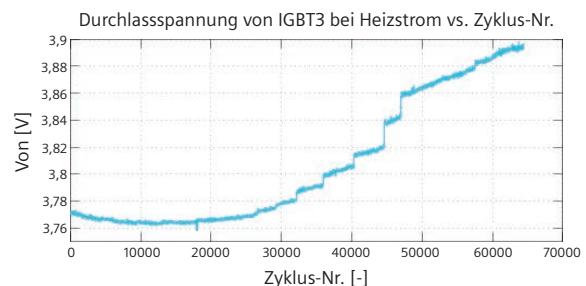


Abbildung 8: Durchlassspannung von IGBT3 auf Heizstromniveau in Abhängigkeit der Ein- und Ausschaltzyklen.

Diese beiden Versuchsreihen zeigen unterschiedliche Fehlermodi und veranschaulichen, wie unterschiedliche Stromversorgungsstrategien und möglicherweise unterschiedliche elektrische Aufbauten den Fehlermodus beeinflussen können. Die erste Messreihe mit einer konstanten Zykluszeit, die der betrieblichen Nutzung am nächsten kommt, bestätigte, dass der Simcenter Micred Power Tester in der Lage ist, das Auftreten von Degradation innerhalb der Struktur des Bauelements, einschließlich des Die-Attach und anderer beeinträchtigter Layer, sofort zu erkennen.

Das zweite Experiment identifizierte eindeutig eine Degradation der Bonddrahte, da beobachtet wurde, dass die Durchlassspannung des

Geräts schrittweise anstieg, während sich bei diesen Stromversorgungsoptionen (konstanter Strom, konstante Heizleistung und konstanter Temperaturanstieg) die thermische Struktur in keiner der getesteten Proben änderte. Natürlich müssen wir bei der Formulierung von Schlussfolgerungen aufgrund der geringen Anzahl von Stichproben vorsichtig sein. Bei der Verwendung von Simcenter Micred Power Tester ist jedoch zu erkennen, dass die Messergebnisse je nach Zyklusstrategie unterschiedlich ausfallen können, und Lebensdauerprognosen, die auf bestimmten Strategien basieren, die tatsächliche Lebensdauer von Leistungsbauelementen zu hoch einschätzen können.

Fazit

Zuverlässigkeit ist in vielen Branchen, die Hochleistungselektronik verwenden, ein Hauptanliegen. Daher sind beschleunigte Tests dieser Module über die gesamte Lebensdauer von Zyklen ein Muss für Bauteillieferanten, Systemanbieter und Erstausrüster. Der Simcenter Micred Power Tester kann verwendet werden, um die Module über Zehntausende und möglicherweise Millionen von Zyklen mit Strom zu betreiben und dabei eine Fehlerdiagnose in Echtzeit zu liefern.

Wie in den obigen Beispielen zu sehen ist, kann der Simcenter Micred Power Tester verwendet werden, um einfach und eindeutig Fehlermodi zu identifizieren, die durch Degradation des Die-Attach oder Beschädigung des Bonddrahtes verursacht werden. Dadurch wird der Zeitaufwand für Tests und Labordiagnosen erheblich reduziert und die Notwendigkeit einer postmortalen oder zerstörenden Fehleranalyse entfällt.