

Herausforderung Thermisches Management

Das Anwachsen der Leistungsdichte in leistungselektronischen Komponenten ist ein kontinuierlich voranschreitender Trend. Eine Konsequenz daraus ist die steigende Halbleitertemperatur weshalb das thermische Management ein immer wichtigeres, häufig unterschätztes Designmerkmal wird.

Bis heute hat sich die Stromtragfähigkeit von Silizium und Modulen stetig vergrößert. Eine Verdopplung der Stromtragfähigkeit für ein gegebenes Modulkonzept ist die Folge. Dieser Gewinn geht oft dadurch verloren, dass der thermische Aspekt beim Entwurf unterschätzt wird. Es ist deutlich, dass die Optimierung des thermischen Transports vom Chip zum Kühlkörper an Priorität gewinnt.

Dr. Martin Schulz, Infineon Technologies, Warstein

Einfaches thermisches Modell

Bild 1 stellt das vereinfachte thermische Modell eines Leistungselektronischen Aufbaus dar.

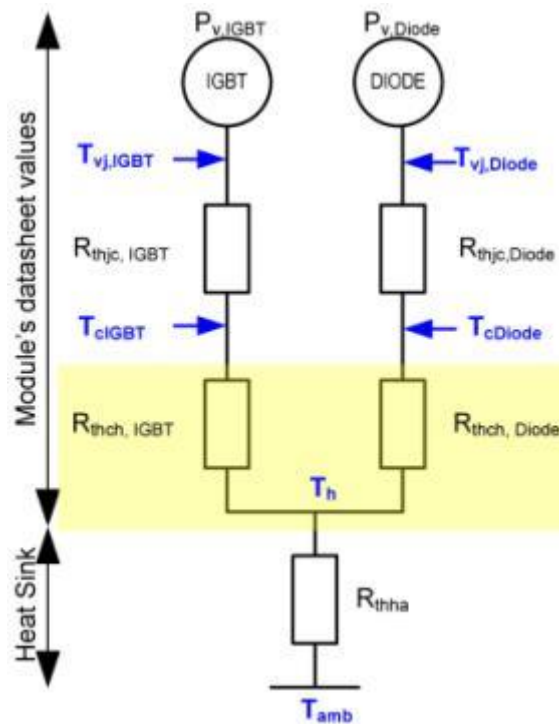


Bild 1: Vereinfachtes thermisches Modell eines Leistungshalbleitermoduls

Das Modul beinhaltet mit IGBT- und Diodenchip zwei Wärmequellen, beide durch die Chiptemperatur T_{vj} charakterisiert. Der thermische Widerstand R_{thjc} resultiert aus der Modulkonstruktion; die unterlegte Sektion stellt die Grenzschicht zwischen Bodenplatte und Kühlkörper dar, beschrieben durch den Übergangswiderstand R_{thch} . In Datenblattangaben bezieht sich dieser Wert auf eine Messung mit einer definierten Menge an Wärmeleitpaste. Deren Material, Schichtstärken und der Prozess zur Aufbringung üben einen Einfluss auf die Qualität der Anbindung aus. Eine genaue Betrachtung der thermischen Interface-Materialien (TIM) ist daher notwendig. Neben den thermischen Qualitäten muss das verwendete Material eine hinreichende Langzeitstabilität aufweisen. In der Leistungselektronik ist eine Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren keine Seltenheit, bei Traktionsanwendungen oder z.B. Windkraftanlagen gehen die Anforderungen auch darüber hinaus.

Tests mit TIM

Es sind Tests zu bestehen die beweisen, dass das Material

- einen hinreichenden thermischen Transport gestattet
- durch thermomechanische Bewegung nicht ausgepumpt wird
- vom ersten Zyklus an funktioniert
- die Lebensdauer der Applikation nicht begrenzt

Daneben muss das Material alle Zuverlässigkeitstests bestehen, die zur Qualifikation eines Modules notwendig sind. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass am Ende das thermische Interface den gleichen Belastungen standhält, für die der Leistungshalbleiter entwickelt ist. Darüber hinaus sind weitere Tests und Vorgehensweisen entwickelt worden, die zur Untersuchung der thermischen Eigenschaften eines Wärmeleitmaterials dienen.

Tests unter Wechsellast

Für diesen Test entstand ein neuer, in Bild 2 abgebildeter Prüfstand. Ziel war es, gut vergleichbare Resultate an unterschiedlichen Testkandidaten zu ermitteln.

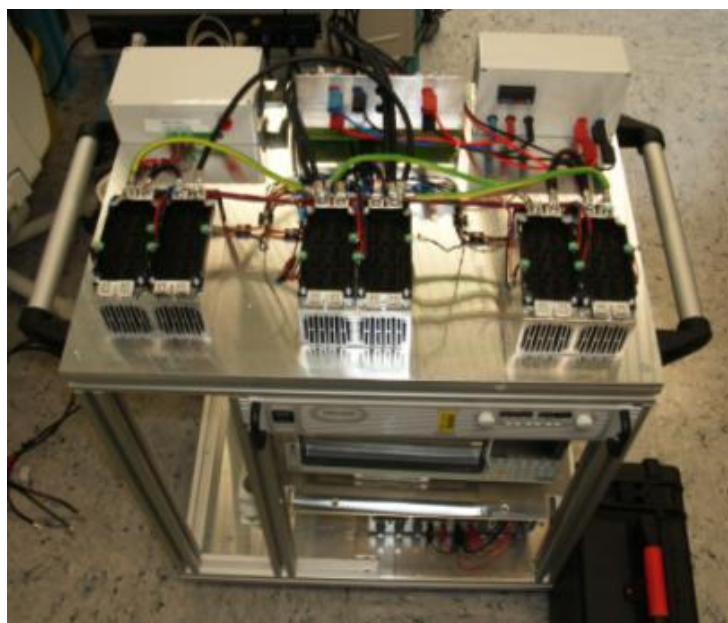


Bild 2: Teststand zur Bewertung thermisch leitender Materialien unter Wechsellastbeanspruchung, gleichzeitiger Test von bis zu 6 Materialien möglich

Ein Auspumpen des thermisch aktiven Materials als Folge von thermomechanischer Bewegung führt über die Lebensdauer zur Reduzierung des unter dem Modul vorhandenen Materialvolumens wodurch die Qualität des thermischen Überganges leidet. Der Effekt führt zur Bildung von Kanälen im Interfacematerial was die Austrocknung beschleunigt [1]. Zyklisches aktives Erwärmen des Halbleiters erlaubt das Beobachten dieses Effektes. Im Test sind Module mit appliziertem TIM auf gleiche Kühlkörper montiert, die Erwärmung wird mittels Stromfluss im Modul eingestellt. Ein Zyklus besteht aus einer einminütigen Einschaltphase gefolgt von einer zweiminütigen Abkühlphase. Die Zeiten wurden so gewählt, dass sich der gewünschte Temperaturhub und ein stabiles Temperaturmaximum einstellen. Diese zeitintensive Art der Belastung stellt die realen Bedingungen am besten nach. Die Module (Bild 2) sind geschwärzt was eine Erfassung der Chiptemperatur mittels thermographischer Kamera gestattet. Die tägliche Aufzeichnung liefert genaue Erkenntnisse über den Alterungsprozess der unterschiedlichen Materialien. Unter Ausschluss weiterer Fehlerbilder kann der Vergleich auf Basis der gemittelten Maximaltemperaturen über die gesamte Testdauer geschehen. Die in 100.000 Zyklen ermittelten Daten sind in Bild 3 dargestellt.

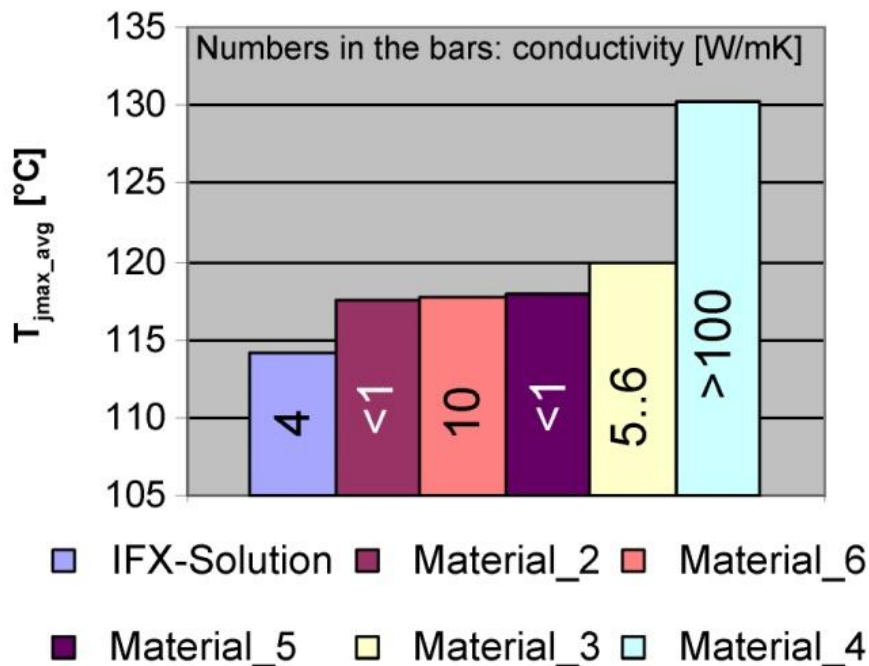


Bild 3: Durchschnitt der maximal erreichten Chiptemperaturen bei Verwendung unterschiedlicher Wärmeleitmaterialien, ermittelt als Durchschnitt von 100.000 Zyklen

Die Differenz zwischen bestem und schlechtestem Material im Test beträgt 18K. Auf Grund der exponentiellen Zusammenhänge kann, je nach Betriebspunkt, eine Differenz von 20K beim Temperaturhub die Lastwechselfestigkeit eines Leistungshalbleiters um den Faktor 10 vergrößern. Eine weitere Erkenntnis aus dem Test ist, dass Chiptemperatur und Datenblattwerte für thermische Leitfähigkeit nicht korrelieren. Grund hierfür ist die Ermittlung des Datenblattwertes bzw. das hierfür genutzte Messverfahren dessen Randbedingungen sich erheblich von denen zwischen Leistungshalbleiter und Kühlkörper unterscheiden. Die zu den Testkandidaten gehörenden Datenblattwerte in W/(mK) sind zur Verdeutlichung im Diagramm enthalten.

Lagerung bei hohen Temperaturen

In weiteren Tests wird die Belastung des Materials erhöht um eine gesicherte Aussage über die Langzeitstabilität zu erhalten. Es erfolgt die Lagerung von montierten Einheiten aus Modul, TIM und Kühlkörper, bei Temperaturen von 125°C. Nach der Montage folgt die Ermittlung der initialen Eigenschaften. Hierzu sind einige Zyklen auf der in Bild 2 dargestellten Testapparatur notwendig. Die sich einstellende Chiptemperatur wird aufgezeichnet und anschließend die Heißlagerung begonnen. Nach je 168 Stunden kommen die Testkandidaten erneut auf den Prüfstand. Die zu absolvierende Gesamtdauer des Tests beträgt 1000 Stunden. Für vier unterschiedliche Materialien ist in Bild 4 das Ergebnis im Überblick dargestellt.

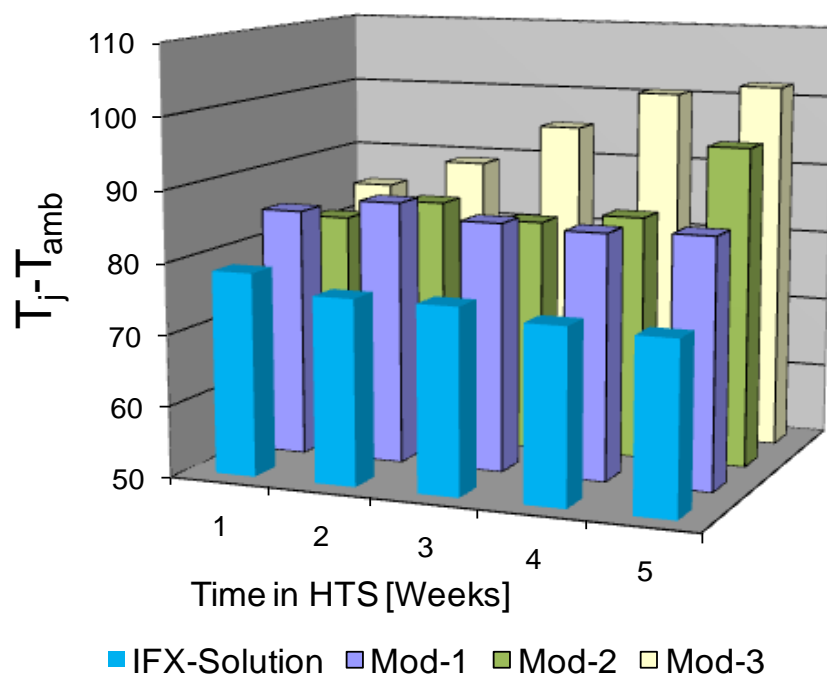


Bild 4: Temperaturentwicklung an vier Kandidaten unter Einfluss der Hochtemperaturlagerung

Das Diagramm lässt verschiedene Alterungsmechanismen erkennen. Mod-1 zeigt ein Material das sich so verhält wie es die Applikation verlangt; es zeigt keine nennenswerte Veränderung des thermischen Verhaltens. Mod-2 zeigt zunächst ähnlich gutes Verhalten, nach ca. 700 Stunden steigt die Temperatur sprunghaft, was auf ein beginnendes Versagen schließen lässt. Hintergrund sind Effekte wie Separation und Trocknung der thermisch aktiven Schicht. Die Erwartungshaltung ist, dass die dominanten Effekte zu einer kontinuierlichen Verschlechterung führen was einer kontinuierlich steigenden Chiptemperatur gleichkäme. Dies ist bei Mod-3 zu erkennen. Die bei Infineon entwickelte Lösung zeigt die niedrigste Temperatur zu Beginn und eine sichtbare Verbesserung während des Tests. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen auch, dass die Langzeitstabilität nicht durch Messung an einigen Zyklen gelingt. Selbst nach Tagen im Test ist keine fundierte Aussage möglich, auch die Beobachtung über einige tausend Zyklen und mehrtägige Belastung führt zuweilen auf trügerische Ergebnisse.

Auftragen von TIM

Materialmenge, Schichtdicke und Verteilung beeinflussen das Ergebnis. Ziel muss sein, so viel Material wie nötig aber so wenig wie möglich aufzutragen. Die Grenze zwischen „noch genug“ und „schon zu wenig“ ist allerdings schmal.

Um zu verhindern, dass zu wenig Material aufgebracht wird empfiehlt es sich, auf manuelle Prozesse zu verzichten. Erster Schritt in die richtige Richtung ist die Applikation via Schablonendruck. Über eine geeignete Anordnung von Löchern gelingt die Verteilung der Wärmeleitmaterialien an die Stellen an denen sie notwendig sind, Lochdurchmesser und Schablonenstärke definieren lokal die zuvor bestimmten Volumina. Automatisierung ist empfehlenswert, das Foto in Bild 5 zeigt einen geeigneten Drucker.

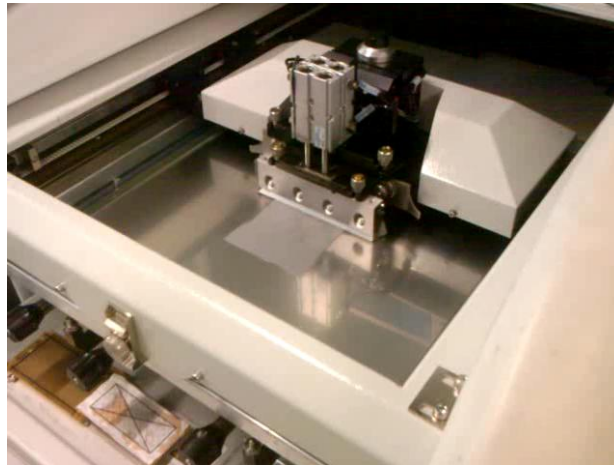


Bild 5: Schablonendrucker zur automatisierten Bedruckung mit Wärmeleitmaterial. Alle relevanten Prozessparameter werden hier in engen Grenzen gehalten

Prozessparameter wie Anstellwinkel, Druck und Geschwindigkeit bleiben konstant was eine hohe Qualität und gute Reproduzierbarkeit gewährleistet.

Für die Erstellung einer geeigneten Schablone ist die genaue Kenntnis der Bodenplattengeometrie erforderlich. Homogene Schichtstärken erzeugen in dieser Art der Applikation nie das beste thermische Ergebnis; es sind zwei Dinge zu beachten

1. Thermisch aktives Material sollte nur die Hohlräume füllen
2. TIM darf die Bildung von Metall-Metall-Kontakt nicht verhindern da hier der beste Wärmetransport besteht.

Die in Bild 6 dargestellte Schablone zeigt wie ein optimiertes Druckbild die lokal unterschiedliche Verteilung von Wärmeleitmaterial gestattet.

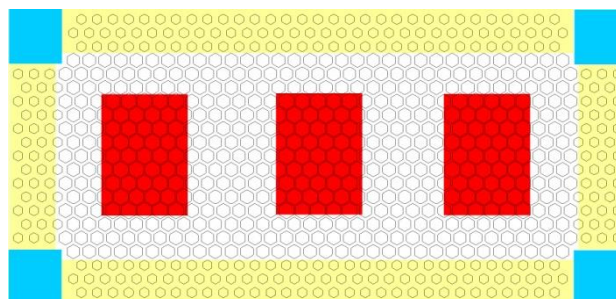


Bild 6: Schablone mit Wabenstruktur zur lokal variierenden Verteilung von TIM. Unterschiedliche Farben weisen auf unterschiedliche Volumina hin

Die dargestellten Ecken bleiben unbeschichtet da hier gute Metall-Metall-Anbindung auf Grund der Schraubkräfte entsteht. Entlang der Ränder ist weniger TIM aufgetragen, in der Region der Kavitäten im Zentrum der Bodenplatte ist eine größere Menge vorgesehen. Die Wabenstruktur stellt eine Lösung dar die den Einschluss von Luft in den Wärmeleitmaterialien weitestgehend verhindert und so beschleunigter Alterung entgegenwirkt [1].

Eine Anpassung der Schablone auf die zu bedruckende Bodenplattegeometrie ist notwendig. Diese Geometrie hängt von den verwendeten Keramiksubstraten, Lötprozessen und der Form des Rohlings ab. Es ist ratsam einen Ansatz zu verfolgen der Modul, Schablone und TIM als eine Einheit betrachtet, testet und qualifiziert.

Wegen der unerwarteten Komplexität des Themas ist absehbar, dass Hersteller dazu übergehen, zukünftig Module mit vorab aufgetragenem TIM anzubieten. Auf diese Weise ergibt sich eine hohe Qualität, Prozess-Stabilität und Reproduzierbarkeit die durch den Modulhersteller definiert sind und dadurch den Entwickler bei Aspekten bezüglich des thermischen Designs entlasten.

Verbesserung durch TIM

Da Leistungselektronik ständig an jedem neuen Limit arbeiten muss wäre es kurzsichtig, den Einfluss des thermischen Interfaces zu unterschätzen. Das Diagramm in Bild 7 zeigt, welcher Gewinn aus dem Aufbau einer guten thermischen Anbindung hervorgeht.

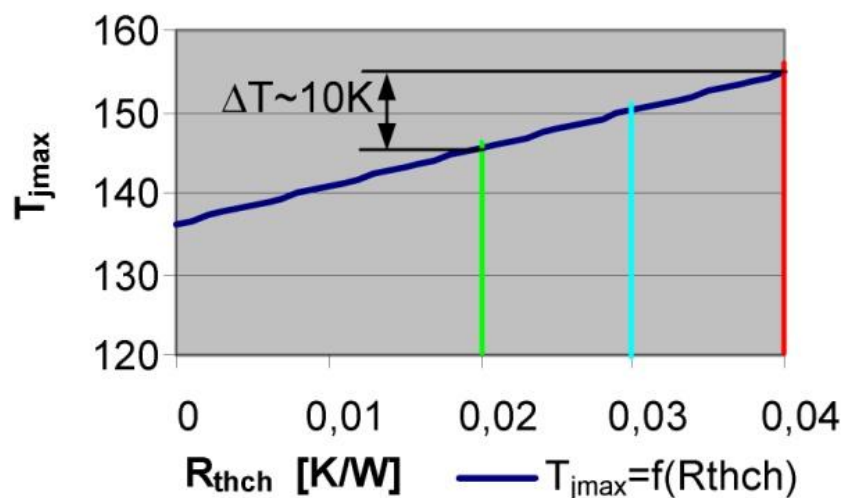


Bild 7: Chiptemperatur unter definierten Bedingungen als Funktion des thermischen Übergangswiderstandes R_{thch} von Modulboden zum Kühlkörper

Die Linie bei $R_{thch}=0,03$ repräsentierte den Datenblattwert [2] des gewählten Moduls. Während mit einer guten Anbindung sogar bessere Werte erreichbar sind, sind oft weniger gute Werte aus dem Feld bekannt. Dies kann leicht 10K Differenz ausmachen. Die die Lebensdauer begrenzenden Effekte sind von exponentieller Natur, eine Reduktion des Chiptemperaturhubes um 10K von $\Delta T_j=40K$ auf $\Delta T_j=30K$ vergrößert die Wechsellastfähigkeit bezüglich des Power-Cyclings um den Faktor 10 [3]. Der Gewinn am thermischen Budget kann optional auch durch höhere Stromausbeute genutzt werden.

Zusammenfassung

Die marktgetriebene Steigerung von Leistungsdichten führt unausweichlich auf höhere Chiptemperaturen. Modulhersteller und Geräteentwickler müssen sicherstellen, dass das thermische Problem heute und in Zukunft beherrschbar bleibt. Seitens der Modultechnologie beschreibt Infineon innovative Wege um dies zu gewährleisten.

Literatur:

[1] Ijeoma M. Nebe and Claudius Feger
Drainage-Induced Dry-Out of Thermal Grease
IEEE Transaction on advanced packaging, VOL31, No3, August 2008

[2] Infineon Technologies,
Datenblatt des FF450R12ME4
www.infineon.com

[3] Infineon Technologies
Power Cycling Capabilities of IGBT4
www.infineon.com