

Mythen und Legenden aus dem Reich der Wärmeleitmaterialien

Die thermische Auslegung von Leistungselektronik ist die Grundlage dafür, dass später die Applikation ihre prognostizierte Lebensdauer erreicht und damit einer der Schlüsselfaktoren im Designprozess. Kern eines leistungselektronischen Systems ist der Wärmetransport, darin enthalten das Thermische Interface Material (TIM). Falscher Umgang mit diesem Material oder Ungenauigkeiten bei der Auslegung können zu verheerenden Folgen beim Betrieb der Anlagen führen.

Dr.-Ing. Martin Schulz

Immer wenn die Neuentwicklung oder die Optimierung bestehender Systeme ansteht stellt sich dem Entwickler die Frage, welcher Leistungshalbleiter auf welchem Kühlkörper zum Einsatz kommt. Das thermische Interface, das den Halbleiter an den Kühlkörper anbindet, wird oft nicht mit in Betracht gezogen. Häufig ist ein Material im Einsatz, von dem der Entwickler als gegeben ausgeht; was seit Jahren gut ist kann eben heute auch nicht schlecht sein.

Dies ist bereits die erste Fehleinschätzung, denn genau wie Leistungshalbleiter haben sich auch die Wärmeleitmaterialien in den letzten Jahren weiterentwickelt.

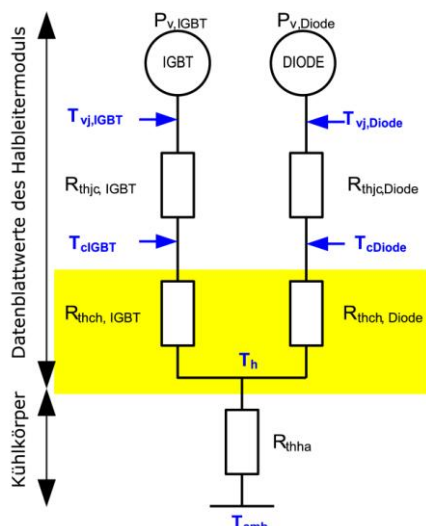
Begibt sich der Entwickler auf die Suche nach einem Ersatz, steht er vor einer unüberschaubaren Menge an potentiellen Kandidaten und der Frage, wie diese zu bewerten und gegeneinander abzuwägen sind.

Mythos Datenblattwert

Nach Recherche und dem Zusammentragen von Daten bezüglich möglicher Alternativen macht der Entwickler den gewohnten Schritt: Er greift zum Datenblatt eines Herstellers, vergleicht verschiedene Materialien anhand ihrer thermischen Leitfähigkeit und berechnet in einer Simulation die resultierende Chiptemperatur.

Ein typisches Szenario umfasst dabei

- Die höchste zu erwartende Umgebungstemperatur
- Den bekannten thermischen Widerstand R_{thJC} von der Hitzequelle, dem Chip, bis zur Modulbodenplatte
- Den aus Messungen bekannten thermischen Widerstand des Kühlkörpers R_{thHA}
- Den Widerstand einer homogenen Schicht aus Wärmeleitpaste mit einem thermischen Widerstand nach Datenblatt
- Wahlweise können Datenblattwerte des Halbleiterherstellers Angaben für den Übergang von Bodenplatte zu Kühlkörper R_{thch} einfließen, die im Datenblatt als typischer Wert unter der Annahme eines üblichen Wärmeleitmediums gegeben sind.



Mit Hilfe dieses vereinfachten thermischen Modells, dargestellt in Bild 1, ergibt sich bei genauer Kenntnis der Verlustleistung im Chip die Chiptemperatur aus reiner Mathematik.

Bild 1: Thermisches Ersatzschaltbild unter Verwendung von Datenblattangaben. Im gelb unterlegten Bereich fließt das verwendete thermische Interface-Material mit ein.

Wie wenig zuverlässig ein solches Modell ist zeigt sich, wenn Vergleiche zwischen den rechnerischen Werten aus dem Modell echten Messwerten gegenüberstehen. In einem Versuchsaufbau, der dem Test verschiedener Alternativen galt, wurden Leistungshalbleiter mit Wärmeleitmaterialien in einem Schablonendruckprozess beschichtet und auf Kühlkörper montiert. Der Aufbau bestand aus sechs gleichen Einheiten und lieferte über eine Versuchsdauer von acht Monaten Ergebnisse bezüglich der Chiptemperatur.

Die Erwartungshaltung ist, dass ein Wärmeleitmaterial mit höherer Leitfähigkeit zu einem geringeren Temperaturhub am Chip und damit zu höherer Lebensdauer führt. Aus dem acht Monate laufenden Versuch gehen täglich ermittelte Maximaltemperaturen innerhalb der Halbleiter hervor. Als Endergebnis ist für jedes Material die aus den Maximalwerten gemittelte Größe festgehalten. Bild 2 fasst die Ergebnisse des Belastungstest zusammen in dem jeder Halbleiter über 100.000 Lastzyklen ausgesetzt war.

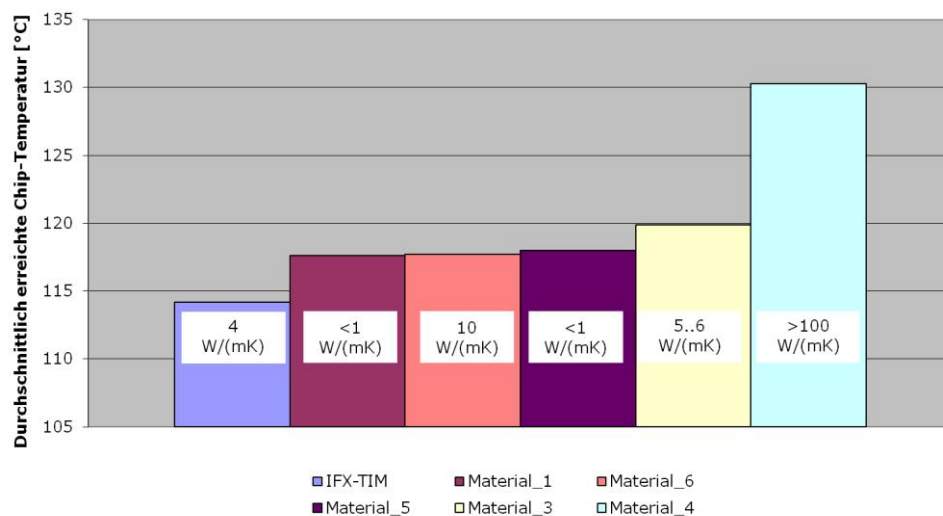


Bild 2: Vergleich der thermischen Ergebnisse unter Verwendung unterschiedlicher Wärmeleitmedien

Das Diagramm verdeutlicht sehr eindrucksvoll, dass es keinen Zusammenhang zwischen der erreichten Chiptemperatur und dem Datenblattwert für Leitfähigkeit gibt. Das Material mit der höchsten Leitfähigkeit erreicht das schlechteste Ergebnis. Gleichzeitig erzielen Materialien die um einen Faktor 10 auseinander liegen ähnliche Ergebnisse. Eine Bewertung der thermischen Qualität eines Wärmeleitmaterials auf Basis der Datenblattwerte ist somit unmöglich.

Der Grund für diese Tatsache ist in den Beschreibungen zu suchen, nach denen dieser Datenblattwert zu bestimmen ist.

Die Vorgaben der Norm ASTM5470-12 sehen hier einen Aufbau vor, dessen Eigenschaften nicht zu der Applikation von Leistungshalbleitern passen und eher die Situation von Prozessoren und diskreten Bauelementen beschreiben.

Oberflächenstrukturen und Andruckkräfte die durch Schraubverbindungen entstehen bleiben ebenso unberücksichtigt wie die Tatsache, dass ein großer Teil des Wärmeflusses über Metall-Metall-Kontakte, insbesondere Schrauben, abfließen kann. Andere wichtige Parameter, die das Fließverhalten oder die Benetzungsfähigkeiten von Wärmeleitmedien beschreiben fehlen in den Dokumentationen oder lassen sich gar nicht in vergleichbare Zahlenwerte fassen.

Dem Entwickler bleibt als einzige Möglichkeit, das in Frage kommende Material in seinem eigenen Aufbau zu integrieren und ausgiebig zu untersuchen.

Die Sage von der Glasscheibe

Ein häufig wiederkehrender Versuch besteht darin, ein beschichtetes Modul auf einer Glasplatte zu montieren und zu beobachten, wie sich ein Wärmeleitmaterial nach der Montage bewegt und wie es sich im Aufbau verteilt.

Was auf den ersten Blick wie eine gute Idee erscheinen mag ist bei genauer Betrachtung allerdings äußerst fragwürdig, da dieser Beobachtung kein Kenntniserwerb über eine thermische Qualität folgen kann.

Eine Glasscheibe weist in der Regel keine mikroskopische Oberflächenstruktur auf wie es plangefräste Kühlkörper tun. Genau diese Strukturen begünstigen aber das Fließen der meist zähflüssigen pastösen Materialien, die an der Glasplatte gemachte Aussage über Fließverhalten ist also zweifelhaft.

Montiert man statt des Moduls eine mit Wärmeleitpaste bedruckte Glasplatte auf einen Kühlkörper so verfügt dieser zwar über die mikroskopische Struktur, der Glasplatte fehlen aber die Kavitäten die einem Halbleitermodul eigen sind. Auch in dieser Konfiguration entsteht keine belastbare Aussage zum Fließverhalten der Wärmeleitmedien. Bild 3 zeigt einen solchen Aufbau.

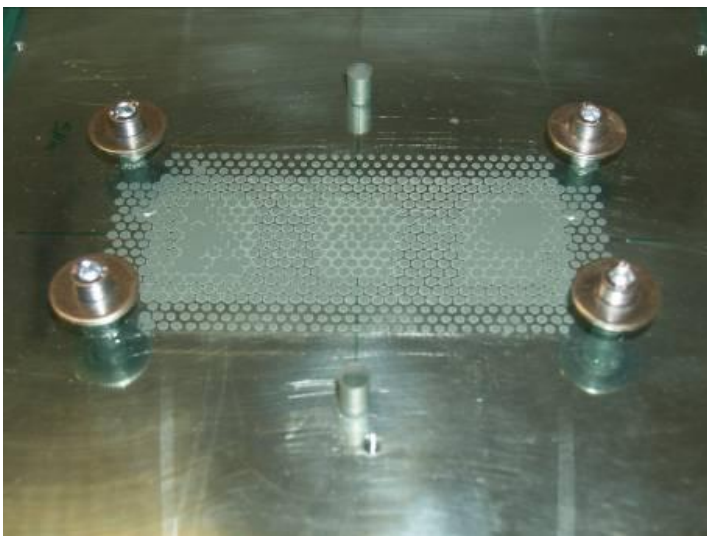


Bild 3: Glasplatte mit Wärmeleitmaterial auf einen Kühlkörper montiert.

Im Bild 3 ist gut zu erkennen, dass die Glasplatte wegen ihrer ebenen Form bereits im kalten Zustand sehr homogenen Druck ausübt. Dieses Verhalten unterscheidet sich deutlich von dem, das Halbleitermodule an den Tag legen.

Bereits im kalten Montagezustand entsteht so ein falscher Eindruck der bei Einfluss durch Temperatur in seiner Aussagekraft noch fragwürdiger wird.

Die Bodenplatten großvolumiger Halbleiter in Modulbauform arbeiten unter Wärmeeinwirkung aufgrund der bimetalartigen inneren Struktur; dabei nähert sich die Bodenplatte im heißen Zustand dem Kühlkörper und übt eine erhebliche Kraft auf das Wärmeleitmedium aus.

Ein Erwärmen des auf eine Glasscheibe montierten Moduls verbietet sich aber, da die Glasscheibe dem thermischen und mechanischen Stress nicht gewachsen ist und beim Versuch zerstört würde. Somit ist das Beobachten des sich in der Applikation einstellenden Verhaltens unmöglich, der gesamte Versuch ist wegen seiner Aussageslosigkeit nicht zielführend.

Die Legende vom Abdruckbild

Nicht weniger irreführend als der Blick durch die Glasplatte ist die Interpretation von Abdruckbildern. Die Idee dahinter ist, dass man einen Aufbau aus Halbleiter, Wärmeleitpaste und Kühlkörper für eine begrenzte Zeit arbeiten lässt, anschließend demontiert und die verbleibenden Abdrücke der Wärmeleitmaterialien auf Kühlkörper und Modul bewertet. Der gleiche Ansatz wird oft verfolgt, wenn Halbleiter zerstört wurden und Ursachenforschung unumgänglich wird.

Im zweiten Fall besteht zwar die Möglichkeit, dass man auf ein völliges Versagen der thermischen Anbindung tippen kann, eine belastbare Aussage gewinnt man allerdings nicht.

Für eine Bewertung, welche thermischen Qualitäten das zerlegte, bei Raumtemperatur betrachtete Material unter applikationsnahen Temperaturen und unter hohem mechanischen Druck stehend gehabt haben könnte gibt es allerdings keine Grundlage. Als Beispiel dient der Abdruck eines Moduls der Bauform EconoPACK™ + wie er in Bild 4 dargestellt ist.

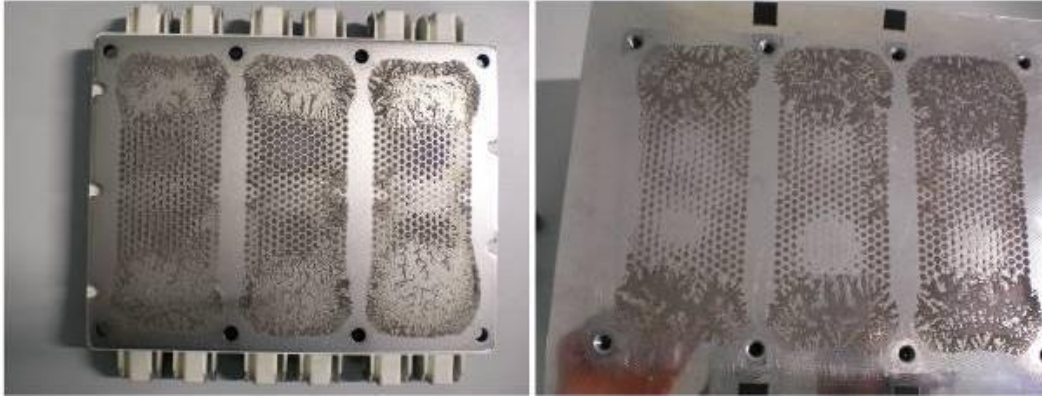


Bild 4: Optisches Erscheinungsbild des Interfacematerials nach zyklischer Belastung. Auf der linken Seite das Modul, auf der rechten Seite der Kühlkörper

Die übliche Aussage zu einem solchen Erscheinungsbild ist, dass sich das Material nicht verteilt habe, die aufgetragene Menge ganz offensichtlich zu gering war und der thermische Transport daher mangelhaft gewesen sein muss.

Die mit diesem Modul gemessenen Chiptemperaturen im Belastungstest ergeben genau das gegenteilige Bild. Hier wurde mit keinem anderen Material eine ähnlich niedrige Chiptemperatur erreicht; das mit Thermographie ermittelte Testergebnis war das konkurrenzlos beste.

Das NTC-Gerücht

Der NTC ist ein Temperatursensor, der häufig im Modul integriert ist. Ist das thermische Modell, das den NTC an die Chiptemperatur koppelt, genau genug definiert, kann aus dem Widerstandswert des NTC ein Rückschluss auf die Chiptemperatur erfolgen.

Tatsächlich ist der NTC an den thermischen Pfad angeschlossen und solange das hinterlegte thermische Modell stimmt ist der Zusammenhang zwischen NTC-Temperatur und Chiptemperatur deterministisch.

Eine Störung am thermischen Modell, die z.B. auf das Versagen des thermischen Interfaces zurückzuführen ist, kann zu einer Fehlinterpretation der vom NTC gelieferten Daten führen. Bild 5 zeigt das Ergebnis aus einem Versuchsaufbau, in dem das Modul senkrecht montiert und zyklisch belastet ist.

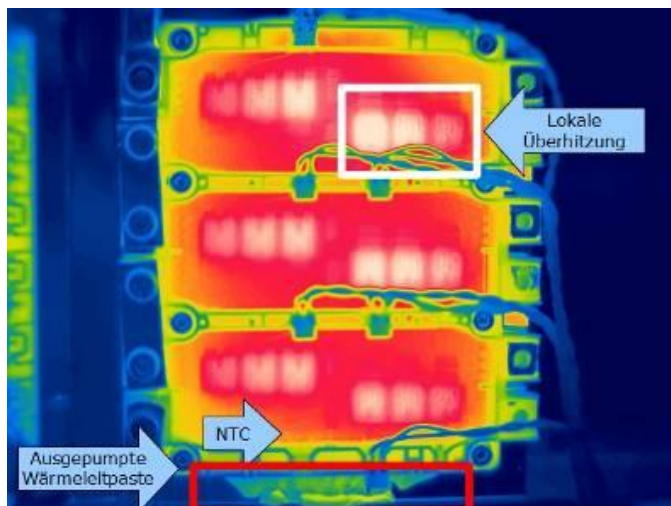


Bild 5: Thermographische Aufnahme eines EconoPACK™ + während des Belastungstests

Durch die senkrechte Montage entsteht eine Vorzugsrichtung für die Bewegung von pastösen Materialien. Durch die thermo-mechanische Belastung fließt die im Test verwendete Paste nach unten. Im oberen Bereich des Moduls entsteht ein schlechter angebundenes Areal, die Chiptemperaturen steigen.

Der im Modul montierte NTC sitzt hier an der unteren Kante. Seine thermische Situation veränderte sich im Test bis zur Zerstörung des Halbleiters nicht.

Die Interpretation des Abdruckbildes nach dem Test war allerdings eindeutig, unterhalb des oberen Drittels des Moduls war kein Material mehr vorhanden.

Fazit

Im Umgang mit Wärmeleitmaterialien wird häufig mehr geglaubt als gemessen. Dem Entwickler kann daher nur empfohlen werden, den einzigen entscheidenden Parameter – die Chiptemperatur - genau zu beobachten.