

AN2008-03

Thermische Ersatzschaltbilder

ersetzt AN2001-05

Industrial Power



Never stop thinking

Edition 2008-06-16

**Published by
Infineon Technologies AG
59568 Warstein, Germany**

**© Infineon Technologies AG 2008.
All Rights Reserved.**

LEGAL DISCLAIMER

THE INFORMATION GIVEN IN THIS APPLICATION NOTE IS GIVEN AS A HINT FOR THE IMPLEMENTATION OF THE INFINEON TECHNOLOGIES COMPONENT ONLY AND SHALL NOT BE REGARDED AS ANY DESCRIPTION OR WARRANTY OF A CERTAIN FUNCTIONALITY, CONDITION OR QUALITY OF THE INFINEON TECHNOLOGIES COMPONENT. THE RECIPIENT OF THIS APPLICATION NOTE MUST VERIFY ANY FUNCTION DESCRIBED HEREIN IN THE REAL APPLICATION. INFINEON TECHNOLOGIES HEREBY DISCLAIMS ANY AND ALL WARRANTIES AND LIABILITIES OF ANY KIND (INCLUDING WITHOUT LIMITATION WARRANTIES OF NON-INFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF ANY THIRD PARTY) WITH RESPECT TO ANY AND ALL INFORMATION GIVEN IN THIS APPLICATION NOTE.

Information

For further information on technology, delivery terms and conditions and prices please contact your nearest Infineon Technologies Office (www.infineon.com).

Warnings

Due to technical requirements components may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact your nearest Infineon Technologies Office.

Infineon Technologies Components may only be used in life-support devices or systems with the express written approval of Infineon Technologies, if a failure of such components can reasonably be expected to cause the failure of that life-support device or system, or to affect the safety or effectiveness of that device or system. Life support devices or systems are intended to be implanted in the human body, or to support and/or maintain and sustain and/or protect human life. If they fail, it is reasonable to assume that the health of the user or other persons may be endangered.

AN2008-03

Revision History: 2008-06-16 V1.0

Previous Version: none

Page	Subjects (major changes since last revision)

Author: Dr. Thomas Schütze IFAG AIM PMD ID TM

We Listen to Your Comments

Any information within this document that you feel is wrong, unclear or missing at all?
Your feedback will help us to continuously improve the quality of this document.
Please send your proposal (including a reference to this document) to:

Info.power@infineon.com



Einleitung

Das thermische Verhalten von Halbleiterbauelementen lässt sich in Form verschiedener Ersatzschaltbilder beschreiben:

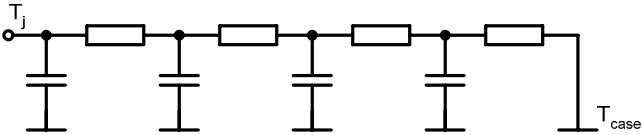


Bild 1: Kettenbruchschialtung (auch Leitungs-Ersatzschaltbild, Cauer-Modell, T-Modell, continued fraction model, ladder network ...)

Die Kettenbruchschialtung spiegelt den realen, physikalischen Aufbau des Halbleiters - Wärmekapazitäten mit dazwischengeschalteten Wärmewiderständen - wider. Das Modell lässt sich, bei Kenntnis der Materialeigenschaften der einzelnen Schichten, aufstellen, wobei allerdings die korrekte Abbildung der thermischen Spreizung auf die einzelnen Schichten problematisch ist. Die einzelnen RC-Glieder sind dann den einzelnen Schichten des Moduls (Chip, Chip-Lot, Substrat, Substrat-Lot, Bodenplatte) zuordbar. Die Knoten des Netzwerks erlauben damit einen Zugriff auf innere Temperaturen der Schichtfolge.

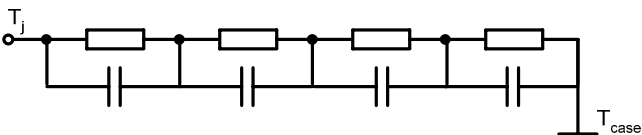


Bild 2: Partialbruchschialtung (auch Reihen-Ersatzschaltbild, Foster-Modell, Pi-Modell, partial fraction model,)

Im Gegensatz zur Kettenbruchschialtung repräsentieren die einzelnen RC-Glieder der Partialbruchschialtung nicht mehr die Schichtenfolge. Die Knoten des Netzwerks besitzen keine physikalische Bedeutung. Dennoch kommt diese Darstellung in Datenblättern zur Anwendung, da man die Koeffizienten aus der meßtechnisch ermittelten Abkühlkurve des Moduls einfach extrahieren und darüber hinaus mit ihnen analytisch rechnen kann.

Im Datenblatt werden die Partialbruch-Koeffizienten in Form von r - und τ -Paaren tabellarisch angegeben. Hier ein Beispiel dazu:

i	1	2	3	4
r_i [K/kW] : IGBT	1,56	4,25	1,26	1,44
τ_i [sec] : IGBT	0,0068	0,0642	0,3209	2,0212
r_i [K/kW] : Diode	3,11	8,49	2,52	2,88
τ_i [sec] : Diode	0,0068	0,0642	0,3209	2,0212

Mit $\tau_i = r_i \cdot C_i$ lässt sich die Wärmeimpedanz-Kurve als geschlossene Gleichung darstellen:

$$Z_{thjc}(t) = \sum_{i=1}^n r_i \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}})$$

Die Sperrschichttemperatur T_j kann bei Kenntnis der umgesetzten Schalt- und Durchlaßverluste und unter Annahme einer bekannten Bodenplattentemperatur T_{case} wie folgt bestimmt werden:

$$T_j(t) = P(t) * Z_{thjc}(t) + T_{case}(t)$$

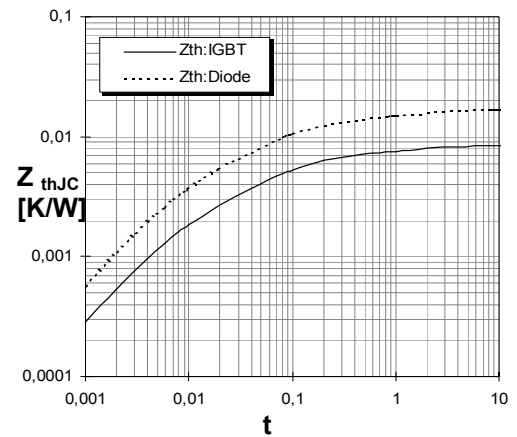
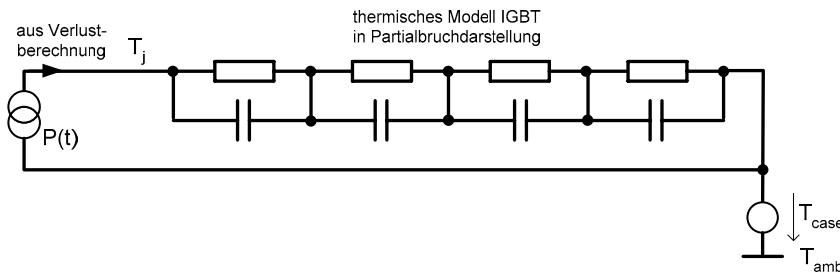


Bild 3: Simulationsmodell mit eingespeister Leistung $P(t)$, Casetemperatur T_{case} und IGBT in Partialbruchdarstellung

Die vereinfachende Annahme einer konstanten Bodenplatten- bzw. Kühlkörpertemperatur ist in der Praxis nicht immer gegeben, da die Periodendauer der Last nicht vernachlässigbar gering ist gegenüber der Zeitkonstanten des Kühlkörpers. Für die Betrachtung nicht-stationärer Betriebszustände muß daher ggfs. entweder $T_{case}(t)$ gemessen oder das IGBT Modell mit einem Kühlkörper-Modell verknüpft werden.

Berücksichtigung der Wärmeleitpaste

In beiden Modellen ist die Verwendung des R_{th} statt eines üblicherweise nicht bekannten Z_{th} für die Wärmeleitpaste im Sinne einer worst-case Abschätzung denkbar. In der Partialbruchdarstellung führt allerdings ein in den IGBT eingespeister Leistungssprung zu einem unmittelbaren Temperatursprung über der Paste und damit zu einem real nicht vorhandenen Sprung der Junctiontemperatur. Es bieten sich zwei Möglichkeiten, das Problem zu umgehen:

1) Wird das Modell des Kühlkörpers meßtechnisch ermittelt, sollte zur Aufnahme der Kühlkörper- Z_{th} -Kurve die Bodenplattentemperatur T_{case} – statt der Kühlkörpertemperatur T_{hs} – herangezogen werden. So geht die Wärmeleitpaste in die Kühlkörper-Messung mit ein und muß nicht mehr separat berücksichtigt werden.

2) Steht ein IGBT-Aufbau zur Verfügung, so kann bei bekanntem Verlauf der eingespeisten Verlustleistung $P(t)$ unmittelbar die Bodenplattentemperatur $T_{case}(t)$ gemessen und gemäß Bild 3 in die Rechnung mit einbezogen werden.

IGBT plus Kühlkörper als Partialbruch- oder Kettenbruchmodell ?

Vielfach wird der Anwender den Aufwand für Messungen scheuen und auf bestehende Modelldaten für IGBT und Kühlkörper zurückgreifen wollen. Sowohl ein Kettenbruch- wie auch Partialbruchmodell kann die jeweilige Übertragungsfunktion junction zu case des IGBTs bzw. heatsink zu ambient des Kühlkörpers repräsentieren. Sollen Modelle von IGBT und Kühlkörper zusammengefügt werden, stellt sich die Frage, in Form welcher der beiden Modelldarstellungen dies zu erfolgen hat, insbesondere wenn IGBT und Kühler getrennt voneinander charakterisiert wurden.

IGBT und Kühlkörper in Kettenbruchdarstellung

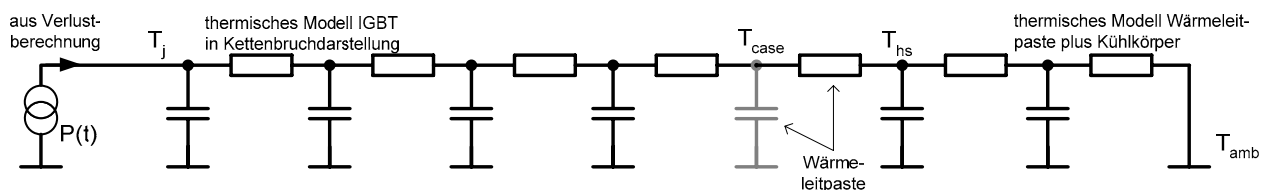


Bild 4: Zusammenfügen von Kettenbruchmodellen

Der Kettenbruch - und die Verknüpfung von einzelnen Modellen in dieser Darstellung - visualisiert die physikalische Vorstellung, daß sich die einzelnen Schichten des Aufbaus sequentiell aufladen und der Wärmefluß - der Strom in obigem Modell - erst verzögert den Kühlkörper erreicht und erwärmt. Ein Kettenbruchmodell kann durch Simulation oder durch Transformation aus einem gemessenen Partialbruchmodell gewonnen werden.

Naheliegender ist die Aufstellung des Modells durch Materialanalyse und FEM-Simulation der einzelnen Schichten des gesamten Aufbaus. Dies ist nur unter Berücksichtigung eines spezifischen Kühlers möglich, da der Kühlkörper eine Rückwirkung auf die Spreizung innerhalb des IGBTs und damit auf das Zeitverhalten und den resultierenden R_{thjc} des IGBTs hat. Weicht der real eingesetzte Kühler von dem simulierten Kühlkörper ab, berücksichtigt dies das Modell nicht.

In Datenblättern ist nur die Angabe der Partialbruchdarstellung üblich, da diese das Ergebnis einer meßtechnischen Auswertung ist und der Z_{thjc} vorteilhafterweise als geschlossener Ausdruck angegeben werden kann. Eine mathematische Überführung eines Partialbruch- in ein Kettenbruchmodell ist möglich. Die Transformation ist aber weder eindeutig – es gibt also verschiedene Lösungen für mögliche R_{th} / C Wertepaare – noch besitzen die einzelnen RC-Glieder und die Knotenpunkte des neu aufgestellten Kettenbruchmodells nach der Transformation eine physikalische Bedeutung. Ein Zusammenfügen von – nicht aufeinander abgestimmten - Kettenbruchdarstellungen führt damit zu beliebigen Fehlern.

IGBT und Kühlkörper in Partialbruchdarstellung

Das IGBT Partialbruch-Modell, so wie es sich im Datenblatt findet, basiert auf einer Messung in Verbindung mit einem spezifischen Kühlkörper. Während ein Luftkühler zu einer starken Spreizung des Wärmeflusses im Modul und damit in der Messung zu tendenziell besseren, d.h. niedrigeren R_{thjc} führt, hat die nur geringe Wärmespreizung eines Wasserkühlers einen vergleichsweise höheren R_{thjc} -Wert in der Messung zur Folge. Durch Verwendung einer Wasserkühlschiene bei der Charakterisierung repräsentiert das in den Infineon Datenblättern angegebene Partialbruchmodell daher einen vergleichsweise ungünstigen Betriebsfall und damit eine Abschätzung zur sicheren Seite hin für das Modul.

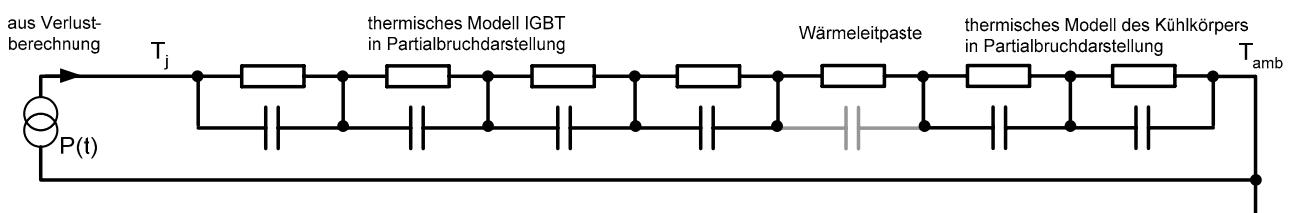


Bild 5: Zusammenfügen von Partialbruchmodellen

Bedingt durch die Serienschaltung der beiden Zweipole gelangt die in die Junction eingespeiste Leistung - im Ersatzmodell der Strom – unverzögert an den Kühlkörper. Der Anstieg der Junctiontemperatur hängt damit bereits in der frühen Phase, in der eigentlich nur die Wärmekapazitäten des Moduls aktiv sind, von der Art des Kühlers ab.

Bei luftgekühlten Systemen liegen allerdings die Zeitkonstanten der Kühler in der Größenordnung von einigen 10 bis weit über 100s vergleichsweise weit über der von IGBT Modulen mit nur ca. 1s. In diesem Fall verfälscht der berechnete Kühlkörper-Temperaturanstieg den IGBT-Temperaturhub nur in geringem Umfang. Kritisch dagegen sind wassergekühlte Systeme, die vergleichsweise geringe Wärmekapazitäten, d.h. entsprechend geringe Zeitkonstanten des Kühlers, aufweisen. Für „sehr schnelle“ Wasserkühler, also Systeme mit direkter Wasserkühlung der IGBT-Bodenplatte, sollte eine Z_{th} -Messung des vollständigen Systems aus IGBT plus Kühler erfolgen.

Nach dem im vorigen Abschnitt Gesagten ist die Verknüpfung von IGBT und Kühler wegen der Rückwirkung des Kühlers auf die Spreizung im Modul weder in der Kettenbruch- wie der Partialbruchdarstellung völlig fehlerfrei möglich, sofern Modellbildung bzw. Z_{th} -Messung von IGBT und Kühlkörper unanhängig voneinander erfolgt sind.

Ein vollständig fehlerfreies Modell für das System aus IGBT plus Kühlkörper erhält man nur durch eine Messung des gesamten thermischen Widerstandes Z_{thja} , also bei gleichzeitiger Messung des vollständigen thermischen Pfades von der Junction über IGBT, Wärmeleitpaste und Kühlkörper zur Umgebung. Dies liefert ein Partialbruchmodell des gesamten Systems, mit dem – bei Kenntnis der eingespeisten Verluste – die Junctiontemperatur fehlerfrei berechnet werden kann. Das Prinzip der dazu notwendigen Junctiontemperaturmessung soll jetzt beschrieben werden.

Meßtechnische Bestimmung einer Impedanzkurve

Beispiel: 3,3kV Modul mit 140x190mm Bodenplatte

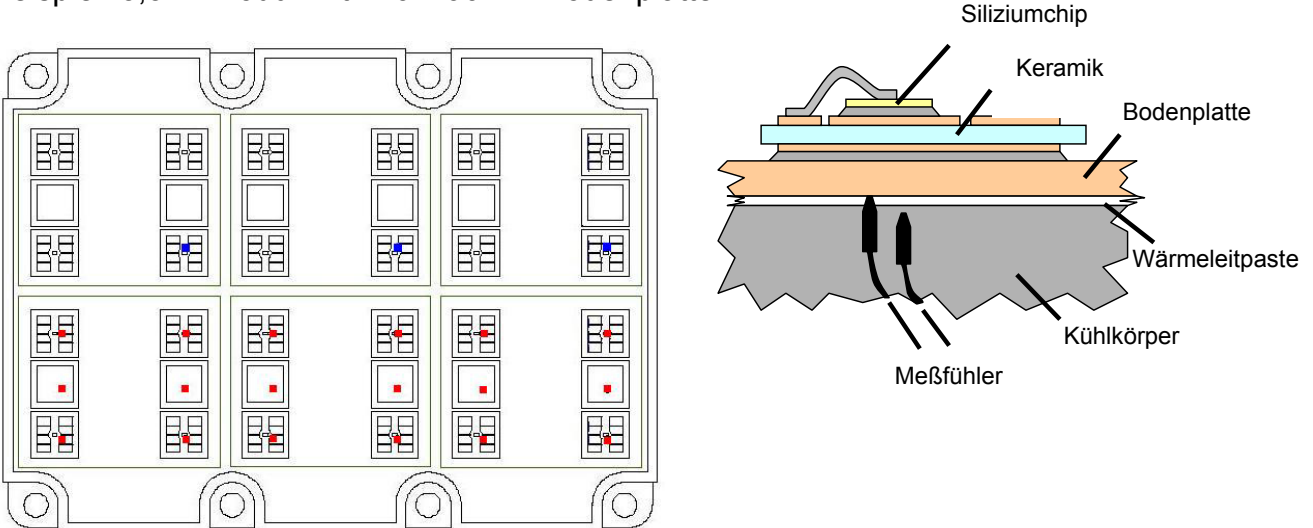


Bild 6: Position der Meßstellen zur Bestimmung der Bodenplattentemperatur

Dem Modul wird durch Stromfluß eine konstante Leistung P eingespeist, so daß sich nach entsprechender Einschwingdauer eine stationäre Junctiontemperatur einstellt. Dann wird die Leistung abgeschaltet und die Entwärmung des Moduls aufgezeichnet. Hierzu wird ein definierten Meßstrom (I_{ref} ca. $1/1000 I_{nom}$) eingespeist und die sich einstellende Sättigungs- oder Flußspannung aufgezeichnet. Die Junctiontemperatur $T_j(t)$ kann dann mit Hilfe einer Kalibrierungskurve $T_j = f(V_{CE} @ I_{ref})$, die vorab unter externer, homogener Erwärmung des untersuchten Moduls als $V_{CE} = f(T_j @ I_{ref})$ aufgenommen wurde, aus der gemessenen Durchlaßspannung bestimmt werden.

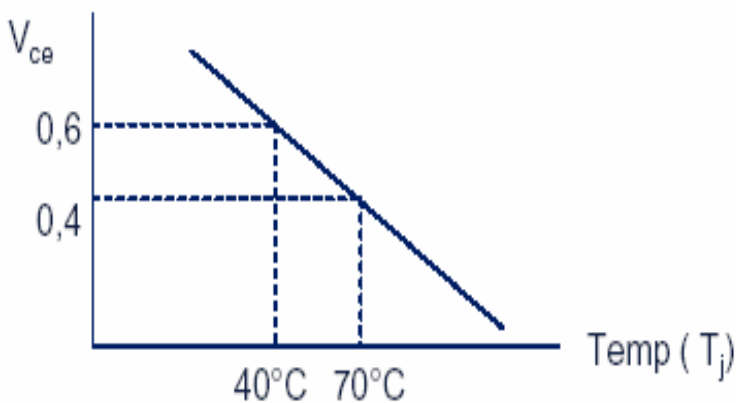


Fig. 7: Kalibrierungskurve zur Bestimmung der Junctiontemperatur aus einer Durchlaßspannungsmessung bei definiertem Meßstrom

Die Bodenplattentemperaturen unter den IGBT- und Diodenpositionen (siehe rote Markierungen) werden mit druckkontaktierten Sensoren gemessen. Die aus den Messungen gemittelte Bodenplattentemperatur T_{case} wird dann, für Dioden- und IGBT-Chips getrennt, zur Berechnung eines $Z_{thjc} = (T_j - T_{case}) / P$ verwendet. Inhomogenitäten und Streuungen in den Temperaturmessungen müssen durch entsprechende Sicherheitszuschläge abgedeckt werden.

Der Wärmeübergangswiderstand zum Kühlkörper kann mit Hilfe der drei blau gekennzeichneten Meßstellen, die sich im Kühlkörper befinden, separat errechnet werden. Vorteilhafter ist es allerdings, unmittelbar den Z_{thja} , also den thermischen Widerstand von Junction bis Ambient, zu ermitteln. Damit wird der gesamte Pfad aus IGBT, Übergang und Kühlkörper durch eine Messung abgedeckt.

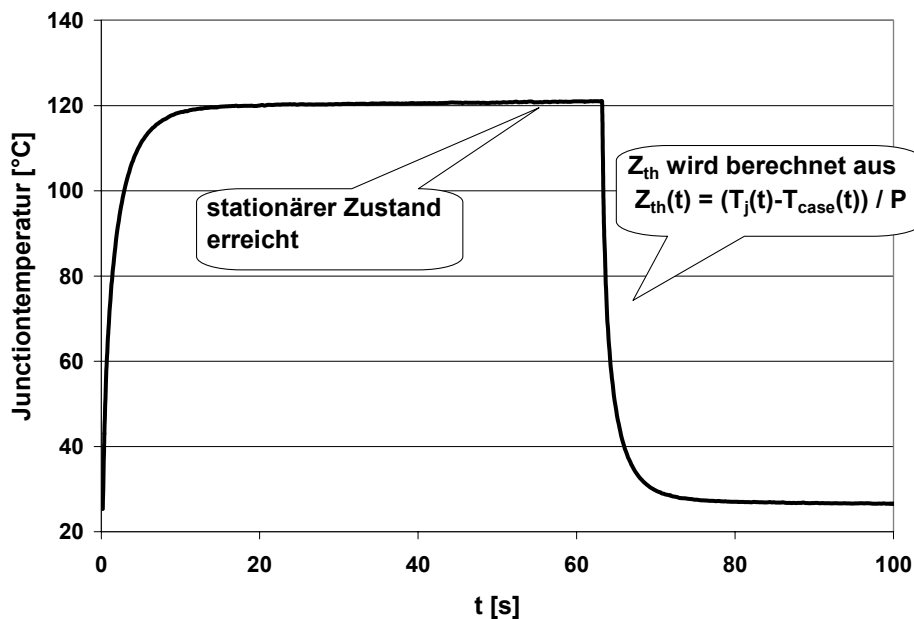


Bild 7: gemessene Erwärmungs- und Abkühlkurve

Wird der Aufwand der Junctiontemperaturbestimmung gescheut, so sollte zumindest die Wärmeleitpaste in die Charakterisierung des Kühlkörpers mit einbezogen werden. Hierzu ist dann der Z_{thca} , der thermischen Widerstand von Wärmeleitpaste plus Kühlkörper, durch Messung der Bodenplattentemperatur T_c gegenüber der Umgebungstemperatur T_{amb} zu ermitteln.