

## ZUSAMMENFASSUNG

Es ist allgemein bekannt, dass Leistungshalbleiter derzeit eine rasche Entwicklung durchlaufen. Insbesondere sind IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) Module in der Industrie mehr und mehr akzeptiert und werden als Hochleistungs- und Hochspannungs-Schaltkomponenten verwendet. Dies ist das Resultat des stetigen Fortschritts wie hohe Eingangsimpedanz, niederere Durchlassspannung und Hochfrequenzverhalten, die durch die Kombination der Eigenschaften des Leistungs-Bipolartransistors und des Leistungs-VDMOSs erreicht wurden.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit elektronischer Komponenten hängt wesentlich von der Betriebstemperatur und insbesondere von der Temperatur an der Sperrschicht ab. Thermische Ueberbeanspruchung ist die häufigste Ausfallursache in elektronischen Systemen. Aus diesem Grund kommt dem Verständnis des statischen und dynamischen Verhaltens der Module, auf denen die IGBTs montiert sind, hohes Gewicht zu.

In diesem Projekt wurde das thermische Verhalten der IGBT Leistungsmodule, die von ABB Semiconductors unter der Bezeichnung E2 Modul produziert werden, unter statischen und dynamischen Bedingungen untersucht. Effekte wie die thermische Beeinflussung und fehlerhafte Lötstellen bildeten den Gegenstand statischer Untersuchungen. Beim dynamischen Verhalten wurde die thermische Impedanz durch 2 Umschaltzeiten charakterisiert. Im Falle der PWM (Pulse Width Modulation) werden Leitungs- und Schaltverluste betrachtet und ein RC Komponentenmodell für die Vorhersage des thermischen Verhaltens unter periodischen Gleichgewichtsbedingungen verwendet.

Zur Untersuchung der statischen und dynamischen thermischen Eigenschaften der IGBT Leistungsmodule wurde der 3D thermo-mechanische Simulator SOLIDIS-ISE verwendet. Durch die Extraktion des RC Komponentenmodells konnte das langfristige thermische Verhalten der Module vorhergesagt werden.

Der thermische Widerstand  $R_{jc}$  (junction to case) wurde berechnet und es resultierte ein Wert von 8.88 [K/kW] pro Modul auf den IGBTs. Die minimale Temperatur auf der Molybdänoberfläche war 9K unter der Maximaltemperatur von 322.2K. Mit der Thermoelementmethode wurde der thermische Widerstand  $R_{jm}$  (junction to the middle of baseplate) mit 5.32 [K/kW] zwischen dem Modul und den IGBTs gemessen. Dieser Wert ist um einiges kleiner als das Resultat der Simulation von 6.3 [K/kW], allerdings verursachten Grösse und Position des Thermoelements auf der Montageplatte eine grosse Unsicherheit bei den gemessenen Resultaten. Es wurden auch Infrarot-Messungen zur Eruiierung des thermischen Widerstands einer Montagegruppe verwendet. Das gemessene Resultat von 98.1 [K/kW] zwischen IGBT Chip und Modul kommt dem simulierten Wert von 92.5 [K/kW] ziemlich nahe. Die Differenz zwischen dem gemessenen und simulierten Wert ist kleiner als 6% und dies gilt auch bei unterschiedlichen Leistungen. Diese gute Uebereinstimmung des gemessenen und simulierten Resultats können als Verifikation der verwendeten Modelle angesehen werden.

Unter Gleichgewichtsbedingungen wurde der Einfluss der Materialdicke, die thermische Beeinflussung zwischen benachbarten Chips und der Einfluss der Lötfläche simuliert und analysiert. Es stellte sich heraus, dass die bei den E2 Modulen verwendete Löttechnik bei der Wärmeübertragung eine entscheidende Rolle spielt. Es kann nicht mehr als eine Reduktion der Lötfläche um 20% zugelassen werden, damit der thermischer Widerstand in einem Bereich von 10% gehalten werden kann. Die minimale Distanz zwischen benachbarten Chips beträgt 6mm damit keine thermische Beeinflussung auftreten kann.

Beim dynamischen Verhalten der thermischen Impedanz wurden zwei unterschiedliche Umschaltzeiten von 400 $\mu$ sec und 80msec beobachtet. Die erste Umschaltzeit wird durch eine Aenderung des Wärmeflusses bestimmt, der durch die Differenz der Wärmekapazität des oberen und unteren Teils des E2 Moduls verursacht wird. Dreidimensionale Ausbreitungseffekte der Grundplatte treten nach 74msec auf und führen zu der zweiten Umschaltzeit in der Kurve des thermischen Widerstands der E2 Module.

Damit die Uebertragungsleistung in der PWM Darstellung realistisch wiedergegeben wird, wurde die Umschaltenergie eines Zeitschritts mitberücksichtigt und es wurden 1500 Zeitschritte durchgeführt um 3 Zyklen der Kurve bis 0.06sec darzustellen. Während des ersten Zyklus erhöhte sich die maximale Temperatur um 16.03K und für 3 Zyklen um 27.25K. Im weiteren Verlauf wurde die Temperatur erhöht bis der periodische Gleichgewichtszustand erreicht wurde. Der Einfluss von Schaltverlusten und Leitungseffekte der Dioden wurden ebenfalls simuliert und untersucht.

Das vereinfachte RC\_CM Modell (RC Component Model) wurde unter Benutzung der Resultate einer einzelnen SOLIDIS-ISE Simulation entwickelt. Das Ziel des RC\_CM Ansatzes war die Entwicklung eines genauen, rechenzeitsparenden und einfach benutzbaren Modells damit dynamische Simulationen über einen grossen Zeitbereich effizient durchgeführt werden können. Das dynamische Verhalten von SOLIDIS-ISE und des RC\_CM Modells stimmen an den untersuchten Punkten (Mitte des Chips, Oberfläche des Substrats Oberfläche der Grundplatte) gut überein. Mit dem RC\_CM Modell wurden mittlere Temperaturerhöhungen von 42.82K auf dem IGBT und von 3.73K auf der Diode für den periodischen Gleichgewichtszustand berechnet. Im weiteren wurde auch

das Frequenzverhalten untersucht. Die Rechenzeit für den Fall des periodischen Gleichgewichtszustandes konnte mit dem RC Komponenten-Modell auf einer SUN UltraSpac-II 250MHz Workstation auf 2 Minuten reduziert werden. Die entsprechende Simulation mit SOLIDIS-ISE würde rund 10 Tage dauern.

Die Arbeit in diesem Projekt hat sehr anschaulich gezeigt, wie sich die Wärme statisch und transient in den Halbleitermodulen ausbreitet. Dies war möglich, nachdem die existierende Simulationssoftware auf die Bedürfnisse dieser Problematik angepasst worden war. Als Nutzen für Entwicklung und Produktion von Halbleitermodulen ergibt sich daraus bezüglich Verlust-Energie und -Leistung, dass Temperaturverteilungen innerhalb und ausserhalb von Modulstrukturen genauer abgeschätzt und simuliert werden können. Dies verringert die notwendigen Sicherheitsmargen in der Spezifikation solcher Bauelemente. Dadurch kann die Leistungsfähigkeit und somit die mit einer gegebenen Dimensionierung umsetzbare Nutzleistung der Bauelemente gesteigert werden. Im Zusammenhang mit gelegentlich auftretenden Schwierigkeiten bei Lötungen im Modul-Herstellungsprozess wurde im Projekt ausserdem gezeigt, mit welchen Temperaturinhomogenitäten zu rechnen ist, wenn in Lotschichten Lunker auftreten. Diese Information ist sehr wichtig für die Beurteilung zulässiger Nichtidealitäten von Lötungen.