

SIMULAZIONE TERMICA ANALITICA PER DISPOSITIVI ELETTRONICI DI POTENZA

Paolo Emilio Bagnoli (*)
Emilio Franchi (**)
Fabio Stefani (***)

Una nuova tecnica di simulazione termica dedicata ai dispositivi elettronici di potenza e alle loro strutture di assemblaggio basata sulla risoluzione analitica delle equazioni di trasmissione del calore

Nella fase progettuale dei sistemi elettronici di potenza e dei loro assemblaggi l'aspetto termico è di cruciale importanza per garantire elevate prestazioni e assicurare un'alta affidabilità del prodotto. Per questa ragione, anche da parte dell'utente dei dispositivi elettronici, è indispensabile l'uso di opportuni strumenti di simulazione che siano in grado di prevedere con sufficiente accuratezza entità e localizzazione delle temperature massime e dei gradienti termici nel sistema. Infatti l'assetto termico interno al dispositivo elettronico dipende anche dalla struttura di assemblaggio che il cliente utilizzatore costruisce come supporto dissipativo, dal numero degli strati da cui è composto, dalla loro geometria, dai materiali e soprattutto dalle condizioni di incollaggio, saldatura o in generale dalla qualità dei contatti tra gli strati.

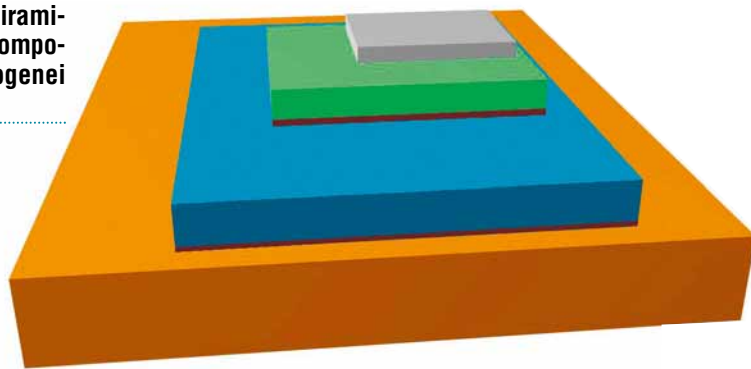
L'uso di metodi o strumenti di previsione

(*) Professore ordinario di Fotonica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa

(**) Progettista per la società Rico di Castelfidardo di Ancona; distaccato presso il Laboratorio di Elettronica di Potenza del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa

(***) Dottorando di ricerca in autoveicoli e sistemi elettronici di potenza presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa

Fig. 1 - Struttura piramidale asimmetrica composta da strati omogenei sovrapposti



delle temperature massime inadeguati o troppo semplicistici comporta una incertezza sui reali assetti termici dei dispositivi che naturalmente si traduce in un eccessivo sovradimensionamento di dispositivi e dissipatori con conseguente aumento di costi e ingombri.

Attualmente gli strumenti di calcolo e di simulazione termica più comuni sono basati sul ben noto metodo agli elementi finiti (FEM) adattabile a qualunque tipo di geometria. Esso implica la suddivisione del solido in oggetto in un reticolo tridimensionale composto da un numero molto grande di celle di varie forme e dimensioni. Con la tecnica FEM, il calcolo delle distribuzioni di temperatura interne al sistema viene ricondotto alla risoluzione di un sistema algebrico di grandi dimensioni.

Nonostante siano strumenti molto diffu-

si sia in ambito scientifico sia nella progettazione meccanica, tuttavia nell'ambito della piccola e media industria l'onerosità dei programmi di tipo FEM, il numero eccessivo di variabili da calcolare, il tempo necessario all'implementazione dei modelli e soprattutto la necessità di una specifica competenza da parte dell'operatore favoriscono una certa ritrosia al loro uso. Oltre a ciò, è in generale difficoltoso inserire nei modelli FEM le resistenze termiche di contatto tra due strati diversi che di fatto costituiscono l'elemento di maggiore incertezza nella conoscenza delle reali temperature massime.

Proprio al fine di risolvere il dilemma tra sistemi di calcolo di tipo general purpose ma onerosi e procedimenti troppo semplicistici e inaccurati, stanno prendendo piede, sia in ambito accademico sia in

Fig. 2 - Elementi inseribili nel modello DJOSER: temperature di riferimento (T_a , T_o), resistenze termiche di contatto (R^*), sorgenti termiche (P , P^*), coefficienti di convezione (H_o , H_e , H_w , H_s , H_n), isolamenti delle superfici (I_o , I_e , I_w , I_s , I_n)

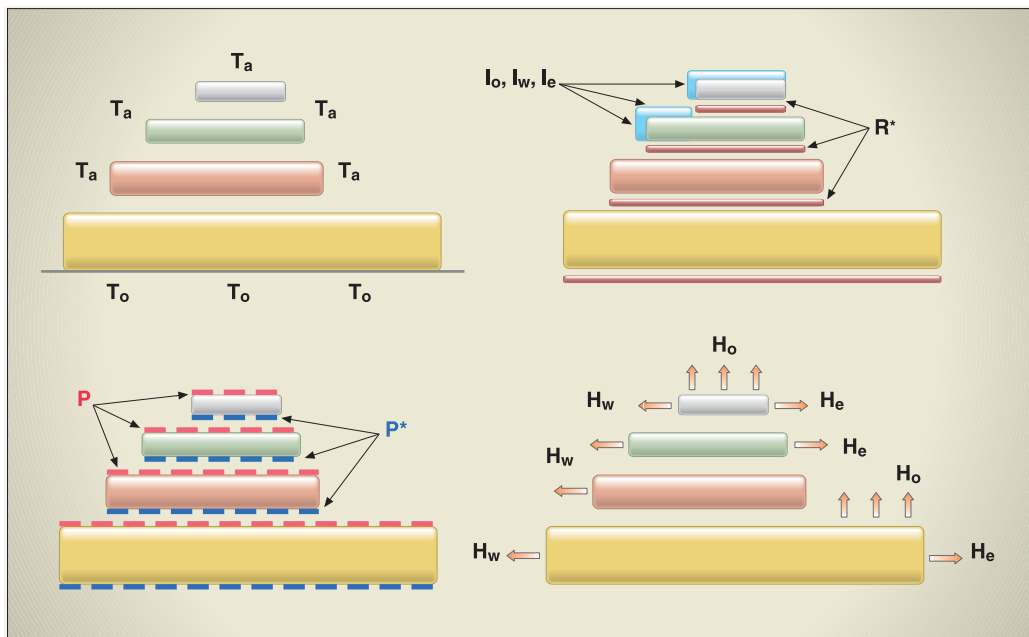
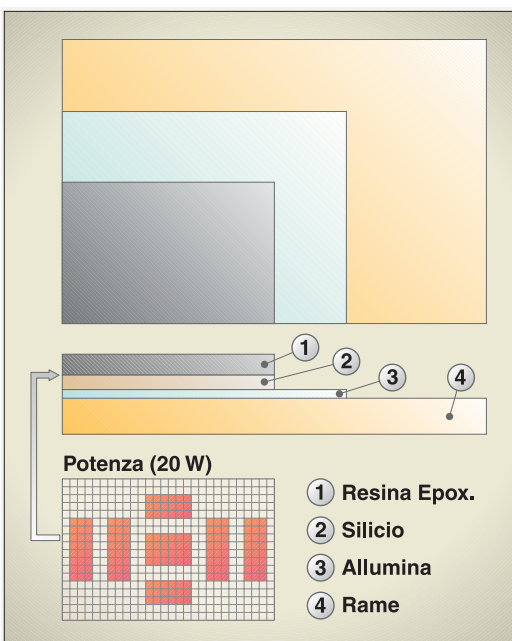


Fig. 3 - Pianta e vista laterale del campione virtuale usato come dimostratore. In basso è riportata la mappa delle sorgenti termiche sulla superficie superiore del silicio



quello industriale, alcune tecniche di simulazione termica di tipo analitico, ovvero basate sulla risoluzione esplicita delle equazioni di conduzione del calore. L'implementazione di questi codici è resa possibile dalla semplicità delle geometrie dei sistemi di assemblaggio

elettronico consistente per lo più nella sovrapposizione asimmetrica di strati rettangolari omogenei, come illustrato nella figura 1, e dalla sostanziale natura bidimensionale delle sorgenti di calore in generale localizzabili sulla superficie superiore del primo strato oppure all'interfaccia tra strato e strato.

Di fatto i simulatori basati su queste tecniche si pongono in posizione intermedia tra gli strumenti numerici sofisticati e le semplici valutazioni di tipo monodimensionale. Infatti, mediante i codici analitici è possibile ottenere mappe ter-

miche tridimensionali aventi un'accuratezza confrontabile con quelle calcolate dai programmi FEM (entro l'1%) ma con un numero di variabili sensibilmente inferiore, con minore tempo di calcolo, con una maggiore semplicità e automatismo nella costruzione del modello e soprattutto non necessitano di uno specifico e approfondito retroterra culturale da parte dell'operatore. In questi programmi analitici si possono inserire tutti i dettagli e le condizioni al contorno (incluse quelle convettive) che li rendono adatti a simulare dal punto di vista

termico una vasta gamma di tipologie di montaggio elettronico, come il flip-chip, il montaggio superficiale dei dispositivi, il naked chip e le strutture ibride a film spesso.

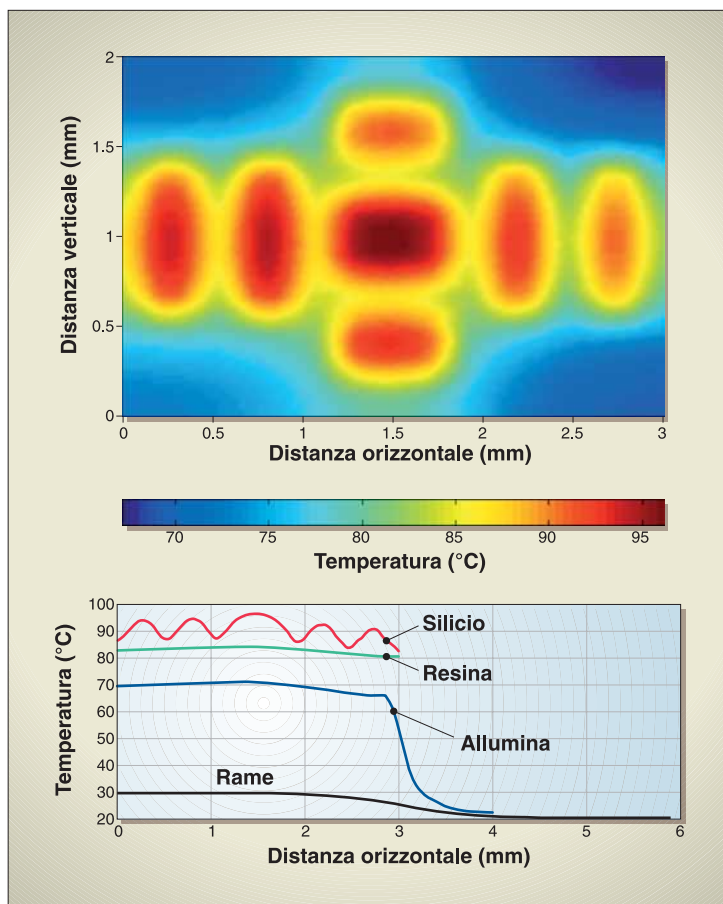
Inoltre, proprio grazie alla loro velocità di calcolo, essi sono particolarmente adatti a essere utilizzati come accurati risolutori termici nei sistemi ciclici di simulazione elettro-termica congiunta dei dispositivi elettronici di potenza.

Uno di questi sistemi, implementato in ambiente MATLAB nella sua forma definitiva presso il LEP (Laboratorio di Elettronica di Potenza) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, prende il nome convenzionale di DJOSER, proprio perché il modello base della struttura di assemblaggio è costituito dalla sovrapposizione di strati di forma

Per l'utilizzo gratuito del programma DJOSER o per ulteriori informazioni, contattare il Prof. Paolo Emilio Bagnoli presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

**Via Caruso 16, 56100 Pisa
Tel. 050 2217511
Fax 050 2217522
p.bagnoli@iet.unipi.it**

Fig. 4 - Mappa della temperatura del silicio. In basso sono riportati i grafici delle temperature di tutti gli strati lungo l'asse mediano orizzontale



parallelepipedo, del tutto simile a una piramide a gradoni come quella costruita dal noto faraone della III dinastia.

Il modello DJOSER

La figura 2 illustra in modo schematico il tipico modello DJOSER dell'assemblaggio di un dispositivo di potenza, composto da un certo numero di strati omogenei, con differente conducibilità termica e collocati l'uno sopra l'altro in modo eventualmente asimmetrico. Nella stessa figura sono indicate tutte le caratteristiche e le condizioni termiche al contorno inseribili nel modello.

To, Ta. I riferimenti di temperatura sono due: la temperatura dell'ambiente circostante (T_a) che lambisce le superfici laterali degli strati e quella superiore del primo strato e la temperatura di un eventuale pozzo termico (T_o) posto a contatto con la superficie inferiore dello strato in fondo. È da notare che, mentre T_a è un valore unico di temperatura uniforme, T_o può anche avere un andamento non uniforme sul piano assegnato.

R*. Tra due strati contigui può essere prevista la presenza di una resistenza termica di contatto R^* , espressa per unità di superficie. Essa rappresenta il contributo termico di eventuali strati sottili di saldatura o di incollaggio o

della non perfetta adesione tra i due elementi della piramide dovuta alla rugosità delle due aree a contatto. A questi fattori, che di fatto creano un impedimento al flusso di calore per conduzione, vanno in generale attribuite tutte le incertezze sul valore sperimentale della resistenza termica globale di un dato assemblaggio meccanico.

P(x,y), P*(x,y). Le sorgenti di potenza, ovvero le zone corrispondenti alle giunzioni o alle resistenze dove viene dissipato il calore sono supposte essere distribuite spazialmente in modo bidimensionale in corrispondenza delle interfacce tra strato e strato, eventualmente anche sulle superfici degli strati non coperte da quello superiore (piantottoli). Per ogni strato sono previsti due diversi tipi di sorgenti di calore: quella posta sulla superficie superiore $P(x,y)$ e quella sulla superficie inferiore $P^*(x,y)$. Quest'ultimo tipo di sorgente,

che ha senso soltanto in presenza di una resistenza termica di contatto sottostante, permette di simulare i dispositivi in montaggio flip-chip in cui la superficie del chip di silicio contenente i dispositivi è montata verso il basso ed è separata dal substrato sottostante da un sottile strato di isolante (underfilling).

Ho, Hn, Hs, He, Hw. Il sistema DJOSER consente di imporre delle condizioni al contorno di tipo convettivo su tutte le superfici della piramide esposte all'ambiente, a patto che il coefficiente di scambio termico per convezione sia supposto uniforme sulla singola faccia. Ogni superficie di ogni strato, sia laterale sia superiore, possiede un diverso coefficiente

impostabile separatamente. La possibilità di tenere in conto anche dello scambio termico convettivo risulta estremamente utile dal punto di vista applicativo, in quanto consente di verificare l'efficacia della ventilazione interna agli apparati nello smaltimento del calore in eccesso.

Io, In, Is, Ie, Iw. Sempre sulle facce esposte all'ambiente è possibile prevedere un isolamento termico superficiale imponendo, separatamente per ogni faccia e per ogni strato, spessore e conducibilità termica dell'isolamento. Di fatto la presenza dello strato isolante si traduce semplicemente in una opportuna modifica (diminuzione) del coefficiente di scambio termico convettivo della faccia corrispondente.

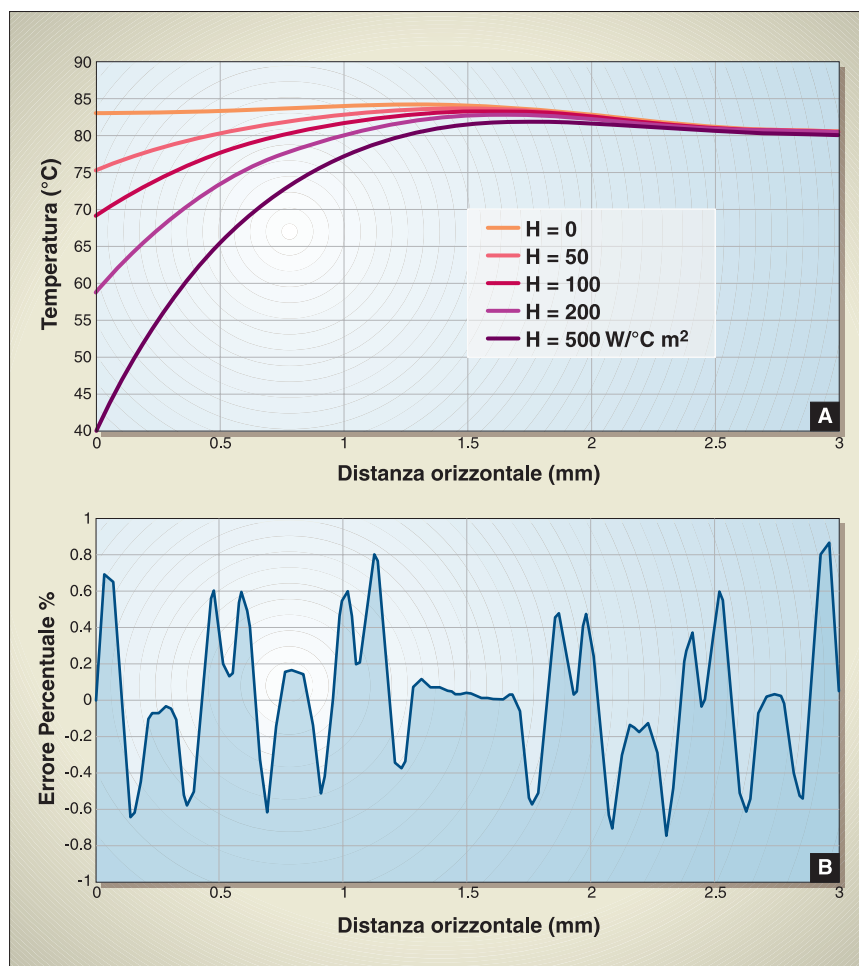
La procedura di calcolo

Il modello matematico che è alla base della simulazione analitica prende le

Fig. 5 - (A) Grafici della temperatura dello strato di resina lungo l'asse mediano orizzontale in funzione di vari valori del coefficiente di convezione sui lati ovest e sud degli strati. (B) Grafico dell'errore relativo tra le temperature calcolate con il programma DJOSER e con un programma basato sugli elementi finiti

mosse dal tipico problema termico relativo alla singola lastra omogenea. Se si conoscono le distribuzioni del flusso termico sulla superficie superiore del parallelepipedo e della temperatura su quella inferiore, è possibile ricavare, per mezzo di espressioni analitiche di tipo esplicito, le distribuzioni della temperatura sulla superficie superiore e del flusso termico uscente da quella inferiore. Queste espressioni sono degli integrali in due dimensioni delle funzioni temperatura e flusso moltiplicate per una doppia serie infinita di funzioni armoniche di tipo di Green, ciascuna caratterizzata da un insieme infinito ma numerabile di autovalori. In altre parole, per conoscere la temperatura di un punto della superficie superiore bisogna calcolare gli integrali della temperatura inferiore e del flusso superiore sulle rispettive superfici, ciascuno moltiplicato per la doppia serie di funzioni di Green corrispondente.

Da quanto detto consegue che, se la struttura è composta da una pila di lastre sovrapposte anziché da un singolo strato, è possibile impostare un sistema di equazioni integrali del tipo sopra descritto in cui le funzioni incognite sono tutte le distribuzioni di temperatura e di flusso termico in corrispondenza delle superfici di interfaccia tra le lastre, mentre le funzioni note sono il flusso sulla superficie superiore dello strato più in alto, la temperatura del pozzo ter-



mico alla base della struttura e naturalmente le distribuzioni dei due tipi di sorgenti di calore impostate in fase di definizione del modello.

Il sistema di equazioni integrali in realtà non è risolvibile in quanto le distribuzioni di temperatura e flusso sono incognite. La risoluzione del problema passa attraverso l'applicazione di un metodo numerico per il calcolo approssimato degli integrali. Questa tecnica prevede la suddivisione della superficie di integrazione in un reticolo uniforme di celle rettangolari. La funzione incognita in due dimensioni viene approssimata da una griglia di elementi parallelepipedici la cui altezza è pari al valore assunto dalla funzione nel centro della cella corrispondente. Questo accorgimento consente di trasformare gli integrali in una sommatoria di valori assunti dalla funzione nei punti centrali delle celle.

Come conseguenza, il sistema di equazioni integrali può essere trasformato in un sistema algebrico facilmente risolvibile, le cui incognite sono appunto i valori di temperatura e flusso termico sulle superfici di contatto tra gli strati in corrispondenza dei punti scelti. Utilizzando questo insieme di valori e le stesse equazioni che compongono il sistema, si può calcolare la temperatura in ogni punto della struttura e con la risoluzione spaziale che si vuole.

Rispetto quindi alla tecnica FEM completamente numerica che utilizza un reticolo irregolare di elementi tridimensionali, il programma DJOSER fa uso di griglie regolari in due dimensioni, con conseguente drastica riduzione del numero di variabili da calcolare e del tempo di calcolo.

Inoltre la regolarità delle griglie bidimensionali utilizzate consente un com-

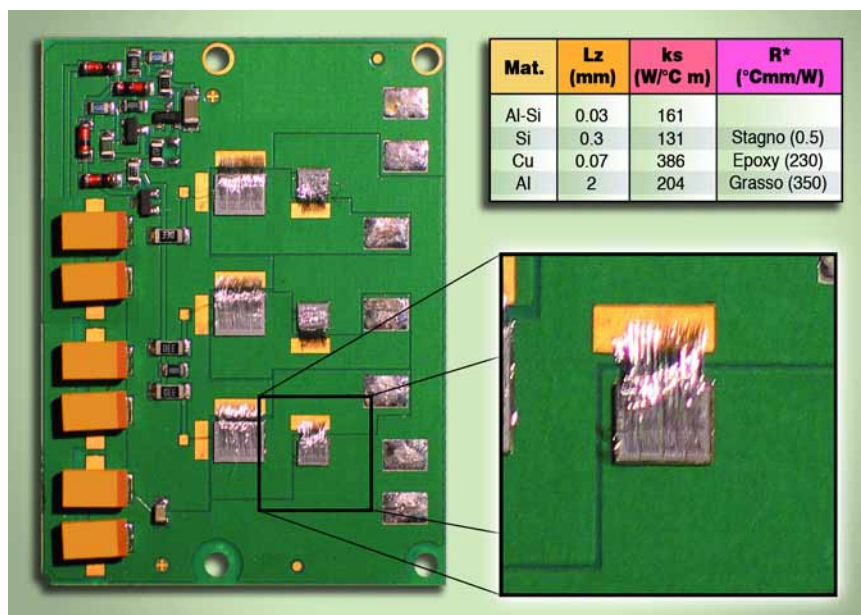


Fig. 6 - Circuito regolatore di tensione utilizzato per la validazione dei dati termici forniti dal programma DJOSER

pleto automatismo nella costruzione dei modelli facilitando grandemente il pre-processamento dei dati.

Esempi di applicazione e validazione

Di seguito viene illustrato un esempio di applicazione di calcolo termico su un campione virtuale la cui struttura è riportata nella figura 3.

Si tratta della sovrapposizione asimmetrica di quattro strati (resina epossidica, silicio, allumina e rame, per uno spessore totale di 3,2 mm) che rappresentano un tipico assemblaggio per un dispositivo elettronico di potenza, incluso l'incapsulamento del dispositivo in resina epossidica. Si è supposto che la sorgente termica sia localizzata sulla superficie dello strato di silicio e che sia organizzata in sette isole rettangolari aventi uguale densità di potenza. La potenza totale dissipata è stata fissata a 20 watt mentre si è supposto che le temperature di riferimento siano le seguenti: la temperatura del pozzo termico T_0 pari a 20°C e la temperatura dell'ambiente circostante T_a uguale a 0°C . La mappa delle sorgenti di calore sulla superficie del silicio, insieme alla griglia utilizzata per questo stesso strato, è illustrata nella figura 3 in basso.

Per mezzo del programma DJOSER sono state calcolate le temperature della

superficie superiore di tutti gli strati in presenza di varie condizioni al contorno. I risultati relativi al caso adiabatico, ovvero in assenza di trasmissione di calore per via convettiva, sono sintetizzati nella figura 4 che illustra la mappa termica in scala cromatica della superficie superiore del silicio (in alto) e i grafici delle distribuzioni di temperatura su tutti gli strati lungo l'asse orizzontale passante per il centro della lastra di silicio. Si notino in particolare due dettagli dovuti alle particolarità strutturali del campione. Dai grafici di confronto si vede chiaramente che lo strato di allumina, essendo quello che meno conduce il calore (conducibilità termica pari a $24\text{ W/m}^\circ\text{C}$ contro $135\text{ W/m}^\circ\text{C}$ del silicio e $386\text{ W/m}^\circ\text{C}$ del rame), assorbe la maggior parte della caduta termica tra la sorgente e il pozzo termico sottostante. Inoltre si osservi che la mappa termica del silicio risulta chiaramente asimmetrica proprio a causa della posizione asimmetrica degli strati sottostanti. Questo comporta una maggiore difficoltà nello smaltimento del calore sui lati ovest e sud della struttura.

L'effetto dello scambio termico convettivo sul dispositivo è chiaramente visibile nei grafici della figura 5 in alto (Fig. 5A). Questi rappresentano gli andamenti orizzontali della

temperatura sulla superficie superiore della resina epossidica. Le varie curve del grafico si riferiscono al caso adiabatico ($H=0\text{ W/}^\circ\text{C m}^2$) e all'imposizione di vari valori ($H = 50 - 1000\text{ W/}^\circ\text{C m}^2$) del coefficiente convettivo soltanto ai lati ovest e sud degli strati della struttura. Si vede chiaramente che in presenza di uno scambio termico laterale più consistente la superficie della resina tende a raffreddarsi sempre più sul lato sinistro. In ultimo, al fine di verificarne l'accuratezza, i dati di temperatura forniti dal simulatore DJOSER sono stati confrontati con quelli ottenuti per mezzo di un simulatore termico tradizionale basato sulla tecnica FEM (ANSYS). Il modello tridimensionale FEM della struttura è stato assemblato con un numero sovrabbondante di elementi tridimensionali proprio al fine di garantire l'accuratezza del riferimento e minimizzare gli errori dovuti alla approssimazione numerica.

Il risultato del confronto è visibile nella figura 5B che illustra l'andamento dell'errore relativo tra le due curve di temperatura (DJOSER - FEM) sulla superficie del silicio e lungo il consueto asse mediano orizzontale.

L'errore relativo rimane ovunque contenuto entro lo 0.8%: i picchi della curva di errore si verificano in corrispondenza dei punti in cui è maggiore il gradiente termico, ovvero ai bordi delle isole delle sorgenti di calore.

A fronte del sostanziale accordo tra i dati, va rilevato che il tempo di calcolo impiegato dal sistema DJOSER è circa il 15% di quello del programma FEM, senza contare il risparmio di tempo relativo alla elaborazione dei rispettivi modelli.

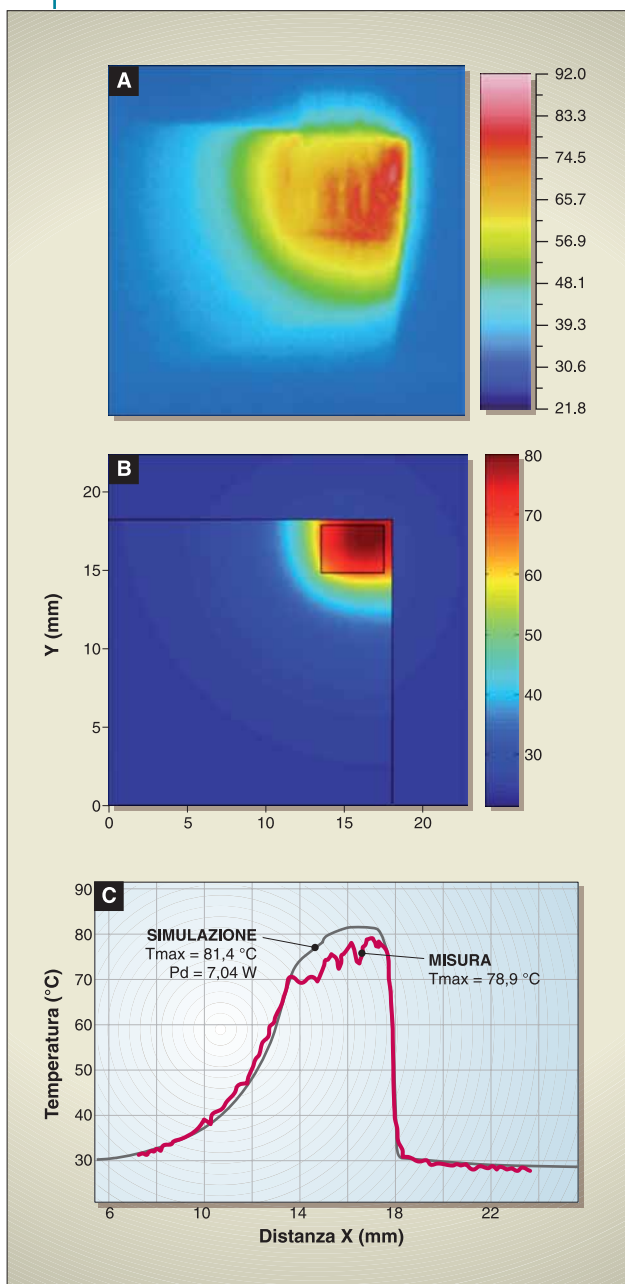


Fig. 7 - (A) Termografia sperimentale, (B) mappa di temperatura calcolata e (C) confronto tra gli andamenti lungo l'asse centrale orizzontale del diodo utilizzato per l'esperimento

nella foto piccola della figura 6. La tabella inclusa elenca la sequenza degli strati che compongono il dispositivo e il suo montaggio, gli spessori, le conduttività termiche e le resistenze termiche di contatto utilizzate. Esse rappresentano rispettivamente la saldatura in stagno tra chip e rame, il sottile isolante epossidico (60 micron) del substrato in alluminio e infine il grasso termico di giunzione tra il substrato e il piatto del termostato sottostante tenuto alla temperatura uniforme di 20 °C. Sul diodo prescelto è stata fatta dissipare una potenza di 7.04 Watt e l'andamento

della temperatura a regime è stato rilevato per mezzo di una termocamera a raggi infrarossi opportunamente calibrata e corredata di una lente per aumentarne la risoluzione spaziale. La figura 7 illustra il confronto tra la mappa termica rilevata sperimentalmente (in alto) e quella prodotta dal simulatore DJOSER (nel mezzo). Inoltre, nella stessa figura 7 in basso è riportato il confronto diretto tra i due andamenti della temperatura presi lungo l'asse orizzontale passante per il centro del diodo. Come si può vedere dalla sostanziale coincidenza tra le due curve, il simula-

tore DJOSER è in grado di replicare i profili termici presenti nella struttura con sufficiente accuratezza, sia dal punto di vista quantitativo sia da quello qualitativo dei gradienti termici. In particolare si noti che le temperature maggiori si sviluppano principalmente in un quadrante a causa del fatto che il chip è saldato su un angolo della metallizzazione di rame.

I due andamenti si discostano soltanto in corrispondenza del centro del diodo a causa della presenza dei fili di bonding che funzionano in parte come aletta di raffreddamento e di cui il simulatore DJOSER non può tenere in conto.

Bibliografia essenziale

- M. Montesi, P. E. Bagnoli, C. Casarosa, M. Pasquinelli, "Steady-State thermal mapping of electronic devices with multi-layer stack mountings by analytical relationships". Proceedings of ITSS II ASME-ZSIS Conference, Bled, Slovenia, 13-16 giugno, 2004.
- P. E. Bagnoli, C. Casarosa, M. Montesi, DJOSER: Analisi termica stazionaria di assemblaggi multistrato per l'elettronica di potenza, XXIII Congresso Nazionale dell'Unione Termotecnica Italiana UIT, vol. 1, pp. 27-32, Parma 2005
- P. E. Bagnoli, C. Bartoli G. Pasquinelli, F. Stefani, "DJOSER: Verifica teorica e sperimentale dell'accuratezza del simulatore termico stazionario per l'elettronica di potenza", XXIII Congresso Nazionale U.I.T., vol. 1, pp. 33-38, Parma 2005
- P. E. Bagnoli, C. Bartoli, F. Stefani, "Validation of the DJOSER analytical thermal simulator for electronic power devices and assembling structures", *Microelectronic Journal*, vol. 38, pp. 185-196, 2007
- P. E. Bagnoli, C. Casarosa, F. Stefani, "DJOSER: Analytical thermal simulator for multilayer electronic structures. Theory and numerical implementation. Proceedings of Thermal Issues in Emerging Technologies ThETA 1 Conference, vol. 1, pp. 1-8, Cairo, Egypt 2007

Come ulteriore esempio di applicazione e di validazione dei dati forniti dal simulatore DJOSER, è stata presa in esame una parte di un circuito illustrato in figura 6. Il sistema è un regolatore di tensione di applicazione autonoma montato su substrato metallico isolato (IMS) e prodotto da RICO di Castelfidardo (AN). I dispositivi di commutazione, diodi bipolari di potenza e transistori MOS, sono costituiti da chip nudi saldati direttamente sulla pista metallica in rame e il cui contatto superiore è assicurato da un numero elevato di fili di bonding. Il test di dissipazione termica è stato effettuato sul diodo evidenziato