

UNITA' 8 – ALLEGATO 1

8. CONDUZIONE STAZIONARIA IN GEOMETRIA PIANA

8.1. SUPERFICI ALETTATE E PROBLEMI DI SMALTIMENTO DEL CALORE

8.1.1. La resistenza termica di contatto

8. CONDUZIONE STAZIONARIA IN GEOMETRIA PIANA

8.1. SUPERFICI ALETTATE E PROBLEMI DI SMALTIMENTO DEL CALORE

8.1.1. La resistenza termica di contatto

Un settore in cui si hanno spesso problemi notevoli di smaltimento del calore è quello elettronico. Infatti, i moderni processori dissipano potenze elettriche dell'ordine di diverse decine di watt e producono quindi per effetto Joule potenze termiche di pari entità, che devono essere smaltite attraverso superfici di scambio termico con dimensioni particolarmente ridotte.

Il cuore di un processore è tipicamente costituito da una piastrina quadrata o rettangolare, il *die*, che include la microcircuiteria elettronica fotoincisa su supporto in silicio, e dall'eventuale involucro che protegge il *die* stesso, realizzato in materiale elettricamente isolante ma termicamente conduttivo (ad esempio un materiale non metallico cristallino, che presenta conduttività elettronica pressoché nulla e conduttività fononica molto elevata).

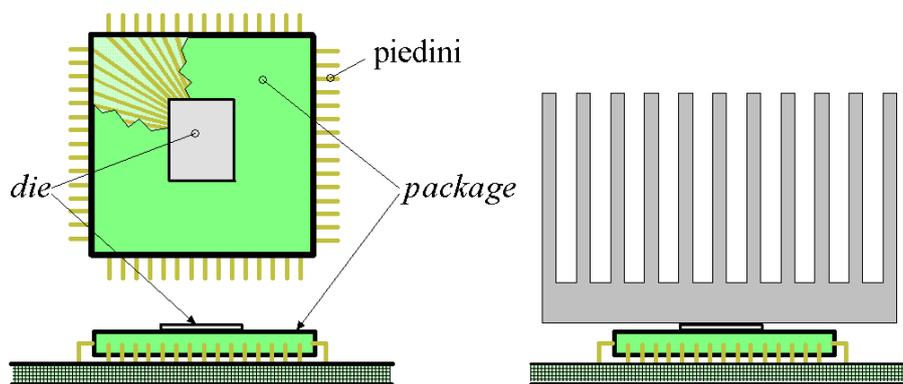


Fig. 2.2.2.A. Microprocessore (a sinistra) e sistema microprocessore-dissipatore termico (a destra).

Il *die* è solitamente integrato sulla sommità di una piastra di maggiori dimensioni, in materiale plastico o ceramico (o comunque elettricamente isolante), in cui sono annegate le connessioni elettriche in rame che collegano la microcircuiteria del *die* alle terminazioni esterne del processore, cioè ai piedini in rame ricoperti in oro (per garantire un contatto elettrico ottimale) che sono distribuiti attorno o sotto al processore stesso. I piedini vanno poi a collegarsi alla circuiteria della scheda a circuito stampato su cui il processore è installato, per saldatura diretta o innestandosi nei fori di un apposito alloggiamento recettore, il *socket*.

Per effetto Joule, l'energia elettrica assorbita dal processore viene trasformata in energia termica all'interno del *die*. Da qui il calore deve essere trasferito nel modo più efficiente possibile all'ambiente, al fine di evitare surriscaldamenti e danneggiamenti. Ciò può avvenire attraverso due percorsi: il primo passa attraverso le connessioni elettriche tra *die* e piedini e, quindi, attraverso i piedini stessi, ma non è molto efficiente; il secondo passa attraverso la superficie superiore del *die*, ed è quello principale.

La superficie superiore del *die* presenta area superficiale ridottissima, dell'ordine del centimetro quadrato. Il flusso termico da trasferire attraverso la superficie superiore, ovvero la potenza termica da scambiare rapportata alla superficie di scambio, è perciò elevatissimo (a titolo di esempio, un processore AMD Athlon64 3400+ funzionante a 2.2 GHz, che integra un *die* da 106 milioni di transistor con superficie 193 mm^2 , assorbe una corrente massima $I_{\max}=57.8 \text{ A}$ alla tensione nominale $\Delta V=1.50 \text{ V}$; a ciò corrisponde una potenza termica dissipata $\dot{Q}_{\max}=\Delta V \cdot I_{\max}=86.7 \text{ W}$, ovvero una potenza per unità di superficie pari a 450 kW/m^2). Alla superficie deve essere pertanto applicato un dissipatore di calore a superficie alettata, usualmente munito di ventola per forzare l'aria attraverso le alette.

Trascurando la conduzione attraverso i piedini, il circuito termico relativo ad un processore munito di dissipatore è quello schematizzato in Fig. 2.2.2.B.

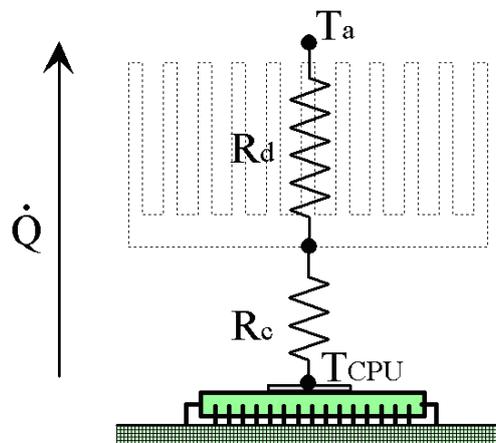


Figura. 2.2.2.B. Sistema microchip-piastra alettata.

La resistenza termica R_d include i processi di trasmissione del calore che hanno luogo sia all'interno del basamento e delle alette del dissipatore (per conduzione), sia sulle superfici del dissipatore esposte all'aria ambiente (per convezione ed irraggiamento). R_d può essere stimata (con una certa approssimazione) mediante le soluzioni analitiche disponibili per il calcolo dell'efficienza e dell'efficacia delle superfici alettate, oppure (con minore approssimazione) tramite verifica sperimentale diretta. Generalmente, i produttori di superfici alettate rendono disponibili i valori della resistenza termica (in $^{\circ}\text{C/W}$ o K/W) misurati nelle condizioni di funzionamento tipiche previste, spesso considerando differenti situazioni operative (senza ventola, con ventola, per differenti velocità del flusso d'aria, ecc.).

In Fig. 2.2.2.B appare una seconda resistenza R_c in serie con quella associata al dissipatore. R_c è la cosiddetta resistenza termica di contatto tra dissipatore e superficie di scambio (del *die*) ed è conseguenza del fatto che, a livello microscopico, l'effettiva superficie di scambio termico tra dissipatore e processore non è pari al suo valore nominale, ma all'area di contatto tra le sommità delle microasperità superficiali delle due superfici in contatto reciproco. Altrove, tra le superfici sono interposte microscopiche cavità riempite di aria, che è assai poco conduttiva.

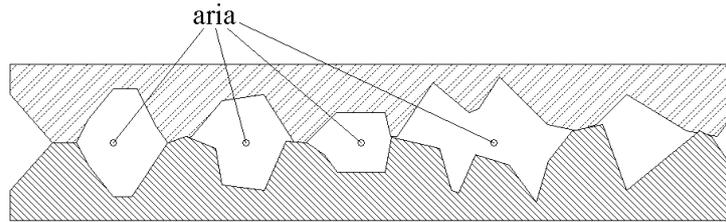


Figura 2.2.2.C. Interfaccia di contatto a livello microscopico (sezione).

Valori tipici delle resistenze di contatto, di solito riferiti all'unità di superficie (in $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ o, più spesso, in $\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$), sono disponibili in letteratura per svariate soluzioni d'accoppiamento. Tali valori possono essere correlati alla resistenza termica totale dell'interfaccia di contatto (in $^\circ\text{C}/\text{W}$) mediante la relazione:

$$R_c = R_c''/A$$

ove A è l'area nominale della superficie di contatto.

La resistenza termica complessiva della serie interfaccia di contatto/dissipatore in definitiva vale:

$$R = R_c + R_d$$

La massima temperatura che si può avere nel microprocessore è quindi pari a:

$$T_{\text{CPU}} = T_a + R \cdot \dot{Q}_{\text{max}} = T_a + (R_c + R_d) \cdot \dot{Q}_{\text{max}}$$

In molti casi pratici, la resistenza di contatto presenta valore comparabile o addirittura superiore a quella del dissipatore. Ne consegue che è spesso conveniente lavorare sulla sua riduzione piuttosto che adottare dissipatori più efficienti, ma anche più ingombranti e costosi. Per ridurla, si adottano varie strategie, in genere simultaneamente:

- a) lucidare a specchio (per lappatura) le superfici da porre in contatto, in modo da ridurre lo spessore medio delle microcavità;
- b) serrare tra loro le due superfici, applicando una pressione elevata (ad esempio, tramite sistemi a molla o a vite), in modo da schiacciare le asperità ed aumentare la superficie effettiva di contatto e scambio termico;
- c) interporre tra le due superfici un sottile film di materiale più conduttivo dell'aria (paste siliconiche, resine epossidiche, ecc.), che sostituisca in tutto o quantomeno in parte l'aria all'interno delle microcavità.

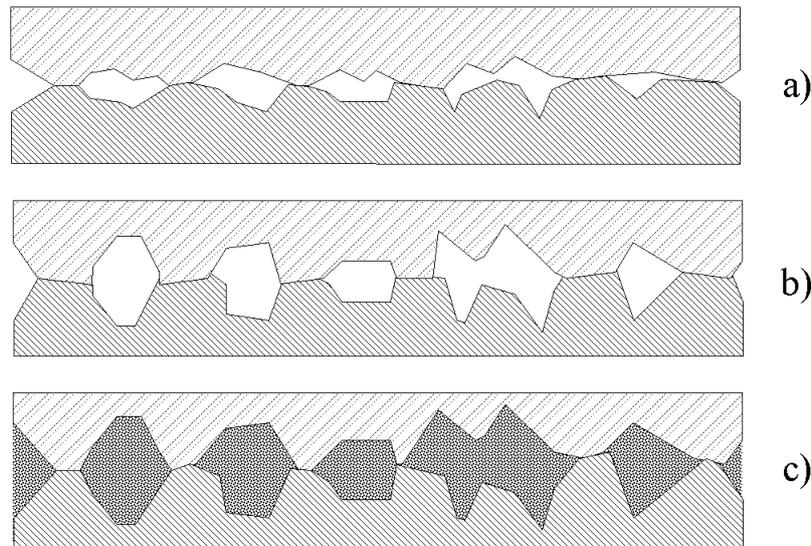


Figura 2.2.2.D. Interfaccia di contatto e risultato delle soluzioni di accoppiamento termico: a) lucidatura delle superfici, b) compressione, c) introduzione di materiale di interfacciamento termico.

Si noti che, nel terzo caso, il film deve essere sottilissimo, poiché la sostanza che lo costituisce è comunque relativamente poco conduttiva. Essa deve perciò riempire i vuoti e non interporre tra le sommità delle microasperità superficiali, che sono fatte di materiale con conduttività assai più elevata. In ogni caso, anche solo sostituire l'aria nelle microcavità con una pasta oleosa o una resina polimerica, per la quale $\lambda \approx 0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, può abbattere la resistenza di contatto ad un quarto del valore iniziale.

- I materiali per interfacciamento termico da interporre tra due superfici per ridurne la resistenza termica di contatto sono generalmente identificati con l'acronimo inglese TIM – *thermal interface material*.

I TIM di più vasto uso sono le paste conduttive a base di oli siliconici o di idrocarburi, solitamente caricati con particelle micrometriche di ossidi (allumina, ossido di magnesio, nitrato di boro o anche polvere di diamante) o di metalli (argento) al fine di aumentarne la conduttività termica intrinseca. Questa varia da $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, per oli non caricati, ad oltre $7 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, per oli caricati con polvere d'argento. Una pressione di contatto di circa 300 kPa è generalmente sufficiente per ottenere buone prestazioni termiche, con resistenze di contatto che vanno da $1 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ per paste di tipo comune a meno di $0.2 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ per i materiali più sofisticati.

Un difetto delle paste conduttive risiede nel fatto che la loro messa in opera è difficoltosa e non può essere automatizzata. Un altro difetto importante è che, quando la temperatura dell'interfaccia aumenta, la pasta diventa molto fluida, si dilata e tende a fluire fuori dell'interfaccia, mentre il processo non s'inverte quando l'interfaccia si raffredda e la viscosità della pasta diventa elevata. Ne può conseguire che, dopo un certo numero di cicli termici, la pasta lascia l'interfaccia (*pump-out* o *thermal pumping*) ed è sostituita da aria.

Recentemente sono stati sviluppati gel con caratteristiche simili alle paste conduttive, ma che, sottoposti ad opportuno trattamento termico di cura, sviluppano al loro interno strutture molecolari reticolate in grado di limitare il fenomeno del *pump-out*. Le resistenze di contatto ottenibili per questi materiali sono comprese, con pressione di contatto di circa 300 kPa , tra $0.4 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ e $0.8 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$.

I pad elastomerici sono film con spessore sottile, anche inferiore a 0.25 mm, e sono costituiti da gomme polimeriche caricate con riempitivi inorganici simili a quelli usati per le paste conduttive. I film spesso incorporano un tessuto (in fibra di vetro) per migliorarne la lavorabilità. Sono meglio manipolabili delle paste conduttive perché possono essere preformati esattamente nelle forme richieste e, inoltre, non sono soggetti al *pump-out*. Di contro, sono necessarie pressioni di contatto notevoli, superiori a 700 kPa, per ottenere prestazioni tutto sommato non eccezionali, con resistenze di contatto comprese tra $1 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ e $3 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$. Il loro uso è quindi limitato ad applicazioni in cui i flussi termici da asportare non sono particolarmente intensi.

Un'alternativa ai pad elastomerici è fornita dai film adesivi termici (*thermal tapes*), tipicamente costituiti da un film metallico o di tessuto (in fibra di vetro o simile), rivestito da entrambi i lati con un materiale adesivo sensibile alla pressione (PSA – *pressure sensitive adhesive*). Il loro principale vantaggio è di non richiedere l'applicazione di pressioni di contatto, eccetto che nella fase di messa in opera, e di rendere superfluo l'impiego di dispositivi di fissaggio. Tuttavia, le resistenze di contatto che si ottengono sono piuttosto elevate, essendo comprese tra $1 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ e $4 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, e possono aumentare considerevolmente se l'adesione non è ottimale. L'uso dei film adesivi è limitato a campi in cui le loro proprietà adesive sono più importanti delle loro prestazioni termiche.

L'interfacciamento termico migliore è dato dal collegamento permanente delle due superfici in contatto per mezzo di un opportuno film metallico di saldatura. Le resistenze termiche ottenibili sono eccellenti, anche dell'ordine di $0.05 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ e senza bisogno di dispositivi di fissaggio, ma il processo di saldatura è particolarmente difficoltoso e non può essere messo in opera se vi sono problemi di resistenza alle alte temperature dei materiali da saldare, o se le dilatazioni termiche delle due superfici in contatto sono molto diverse tra loro.

L'uso di adesivi termicamente conduttivi (resine epossidiche o siliconiche caricate) presenta vantaggi simili alla saldatura, con processi di lavorazione meno complicati e resistenze di contatto comprese tra $0.15 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ e $1 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$. Tuttavia, è necessario che il procedimento d'incollaggio sia affidabile e ben ripetibile, poiché in seguito non è più possibile separare le due superfici incollate.

Stanno infine prendendo piede materiali a cambiamento di fase (PCM – *phase change material*, una denominazione che però si applica anche a sostanze con funzioni completamente diverse, finalizzate all'accumulo termico). In fase di lavorazione e messa in opera, tali materiali presentano consistenza simile ai pad elastomerici, ma in condizioni operative superano la loro temperatura di fusione (compresa tra 50°C e 80°C) ed acquistano proprietà conduttive simili alle paste, andando a riempire perfettamente le microcavità dell'interfaccia. Le loro prestazioni sono buone a temperature sia inferiori che superiori alla temperatura di fusione, che in certi casi è superata solo al primo ciclo termico per effetto del maggiore valore della resistenza di contatto del materiale applicato a nuovo. Pressioni di circa 300 kPa sono di solito sufficienti ad ottenere resistenze di contatto comprese tra $0.3 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ e $0.7 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$. Il difetto dei PCM è la rilavorabilità, poiché, pur non essendo classificati come adesivi, la loro asportazione dalle superfici d'interfaccia è molto difficoltosa.

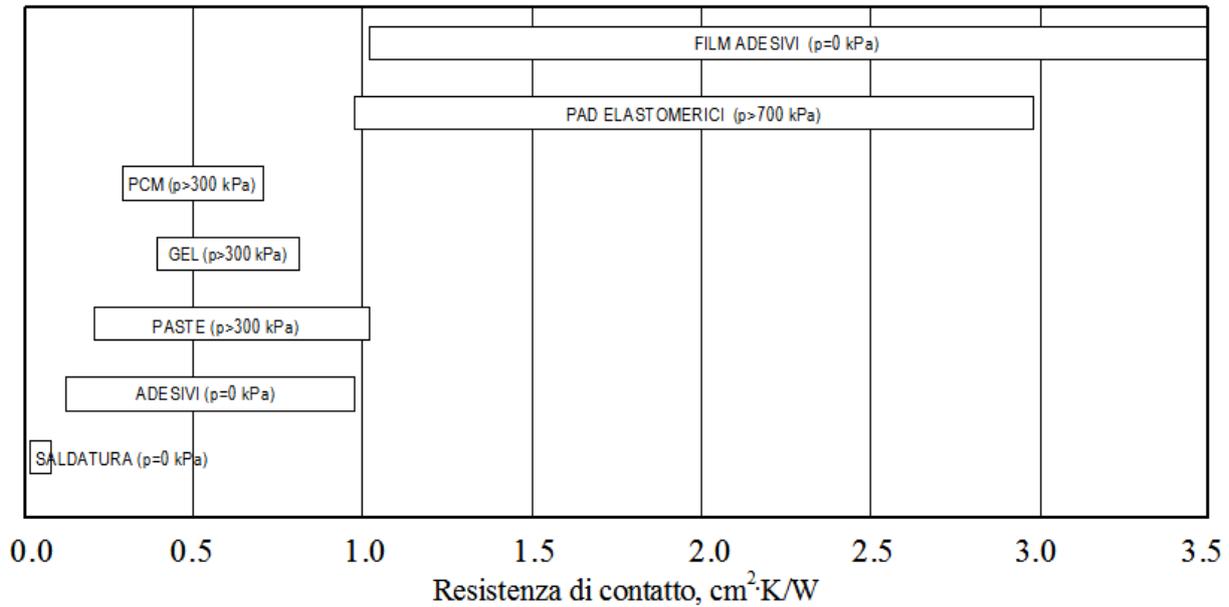


Figura 2.2.2.E. Intervalli di variabilità tipici della resistenza di contatto per le diverse soluzioni di accoppiamento termico.

- In generale, le tecniche d'interfacciamento termico (lappatura, compressione, inserimento di film solidi) ed i vari materiali d'interfaccia precedentemente illustrati non si utilizzano soltanto nel settore elettronico, ma in tutti gli ambiti industriali in cui esistono problemi di contatto termico e, più in generale, di smaltimento del calore. Viceversa, in problemi di isolamento termico, la resistenza termica di contatto tra diversi strati di materiale è generalmente piccola rispetto a quella complessiva di parete ed è comunque trascurabile in favore di sicurezza.