

Dissipazione termica

Le problematiche di raffreddamento delle schede elettroniche sono complesse e difficili da gestire. Diversi sono gli approcci, così come le tecnologie che ne derivano

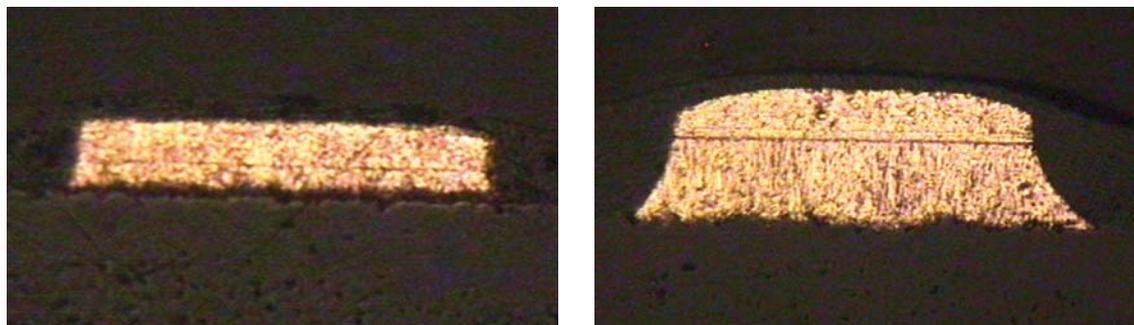


Fig. 1 - Differenza di sezione di tratti conduttivi al variare del rame di base (18 μm e 70 μm)

La dissipazione dei substrati

DI ING.
G. SCARPA

La continua ricerca di maggiori prestazioni di ogni apparato elettrico, unita alla costante ricerca della riduzione del suo ingombro meccanico ha reso fondamentale uno studio appropriato, già a livello della fase di progetto, atto a tenere sotto controllo il suo surriscaldamento. È quindi essenziale discutere in ambito elettronico di dissipazione termica legata all'effetto Joule.

LE BASI DEL PROBLEMA

Un conduttore elettrico dissipa un'energia, sotto forma di calore, proporzionale all'intensità di corrente elettrica che lo attraversa: tale effetto fu scoperto dal fisico James Prescott Joule nel lontano 1840.

Da quel momento l'effetto è stato utilizzato come base del funzionamento di moltissimi apparati.

È pur vero però che lo stesso effetto ha delle implicazioni negative notevoli. Primo fra tutti il fatto che l'energia dissipata abbatte il valore del rendimento di ogni macchina elettrica, quando tale generazione di calore non sia lo scopo del suo funzionamento. Secondo, il calore, sia esso voluto o meno, può essere la causa di malfunzionamenti o totali rotture dell'apparato stesso che lo genera.

Quanto evidenziato da queste due ultime considerazioni è stato nel passato, lo è oggi e sarà in futuro, oggetto di studio di ogni progettista che si appresti a realizzare una macchina elettrica, sia essa molto semplice (fusibile) o complessa (microprocessore).

CONDUCEBILITÀ TERMICA E DISSIPAZIONE

Joule ha dunque enunciato che ogni apparato elettrico, inteso come insieme di conduttori percorsi da corrente elettrica, tende a riscaldare se stesso durante il funzionamento. Tale aumento di temperatura deve essere tenuto sotto controllo, nel periodo di utilizzo, onde evitare di avere la distruzione e la conseguente cessazione del servizio. Esistono due soli modi per realizzare tale forma di controllo:

- la cessazione temporanea del servizio;
- il raggiungimento di una temperatura stabile di funzionamento.

Tenuto conto che la prima forma implicherebbe l'esistenza di apparecchi utilizzabili solo per frazio-

Tabella I - Conducibilità termica di alcune sostanze

Sostanza	Conducibilità Termica (W/m°K)
Aria	0,026
Vetro	1
Alluminio	236
Rame	390

ni di tempo predeterminate e che tale cosa risulta ovviamente inaccettabile all'utilizzatore medio, resta solo la stabilizzazione termica come prerogativa non derogabile di ogni macchina elettrica. Sarà quindi necessario individuare per ogni apparato un sistema in grado di trasmettere l'energia generata all'ambiente circostante in forma di calore così da permettere il mantenimento di una temperatura, di funzionamento a regime costante. Questo effetto viene chiamato dissipazione termica perché il continuo trasferimento di tale energia ad ambienti di massa termica via via maggiori porta all'esaurimento della stessa, come se la stessa energia fosse andata totalmente dispersa (appunto dissipata).

La conducibilità o conduttività termica dei materiali è l'attitudine di ogni sostanza a trasmettere il calore e dipende solo dalla natura del materiale stesso: in formule è il rapporto fra il flusso di calore e il gradiente di temperatura che tale passaggio di calore genera.

In **Tab. I** sono riportati i valori di conducibilità termica di alcuni metalli e sostanze.

LA "TERMICA" DEI PCB

La tecnologia elettronica moderna ha imposto il montaggio di un notevole numero di dispositivi e di componenti sulle schede elettroniche e, con essi, ha dovuto tener conto delle accresciute potenze in gioco. Va da sé che il dimensionare adeguatamente su di essi i sistemi di trasferimento di calore diventa di fundamenta-

le importanza. La presenza di transistor di maggiore potenza, di integrati più efficienti e le relative maggiori intensità di corrente hanno reso indispensabile lo studio dei fattori di dissipazione.

La miniaturizzazione degli apparati ha ridotto drasticamente le possibilità di applicare a dette schede dei sistemi di raffreddamento esterni (ventole e/o alette di raffreddamento) cercando allo stesso tempo e sempre più di realizzare delle schede che si "autoraffreddino". Le metodologie utilizzate per aumentare il potere di dissipazione delle schede sono principalmente tre:

- l'utilizzo di uno spessore maggiorato dei conduttori;
- l'utilizzo di piani di dissipazione connessi al case del componente;
- l'utilizzo di laminati per la costruzione dei pcb ad alta dissipazione.

Ognuna di queste metodologie ha dei pregi e delle controindicazioni, ma tutte possono essere coinvolte e applicate alla stessa scheda, per migliorarne il controllo termico.

SPESSORE DI RAME MAGGIORATO

Ogni pcb ha come requisito/caratteristica lo spessore di rame dei tratti conduttivi (conduttori). Ricordiamo che i circuiti stampati possono essere sottoposti a processi di incremento di detto spessore quando vi sia richiesto un processo di galvanica atto a generare delle metallizzazioni attraverso i vari layer (conduttori trasversali o fori metallizzati), ma tale incremento, essendo influenzato da molti fattori, non dovrebbe essere considerato per il computo né delle caratteristiche elettriche né di quelle termiche: il calcolo andrà eseguito sempre e solo considerando il valore di base richiesto al produttore di stampati. Il rame ha una conduttività termica ben più alta dell'aria per cui è un ottimo "veicolo" dell'energia termica dei componenti.

La limitazione si trova nel fatto che il componente contatta il rame tipicamente solo nella zona di connessione elettrica (piedino del componente SMD, reoforo del tradizionale) per cui le vie di scambio termico ad alta con-

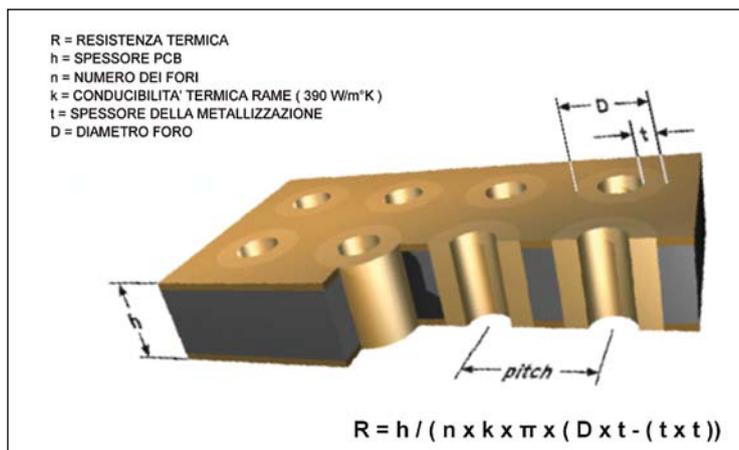


Fig. 2 -
Resistenza termica fori metallizzati

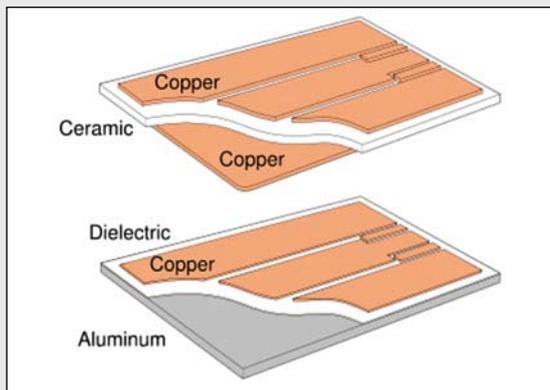
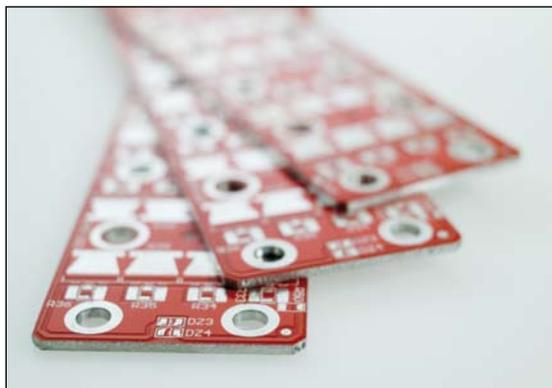


Fig. 3 - Tecnologie DBC e IMS (monofaccia)

duzione sono limitate a tali aree (ricordiamo che il flusso di calore è proporzionale alla sezione di attraversamento, quindi nel nostro caso all'area di contatto). Per tale motivo la sola realizzazione di schede con spessori di rame maggiorati può non essere sufficiente alla regolazione termica dell'apparato ma di certo incrementa il fattore dissipativo dei tratti conduttivi. Se poi si considera la macchina elettrica data dal solo pcb (quindi senza considerare i componenti in esso montati) tale metodologia potrà ridurre di molto il surriscaldamento degli stessi tratti, per cui, indirettamente, l'ambiente in cui si trovano a funzionare i componenti in essa montati.

Il metodo deve tener conto di alcune importanti controindicazioni legate ai sistemi di produzione degli stampati. Primo fra tutti è da considerare che l'aumento dello spessore del rame di base comporta delle limitazioni soprattutto in termini di ampiezza minima del tratto conduttivo e di isolamento minimo fra conduttori contigui, per cui in assoluta disarmonia con la necessità di miniaturizzazione degli apparati e con essa la presenza "on board" di componenti a passo ridotto.

Fig. 4 - Pcb IMS



Il motivo è presto spiegato se si considera il solo processo di incisione normalmente utilizzato nella produzione degli stampati. L'elevata quantità di rame di base da incidere modifica sensibilmente la sezione dei tratti (vedi Fig. 1) fino a rischiare di ottenere delle sezioni non conformi. Al pari una distanza fra tratti conduttivi insufficiente non permette una completa asportazione del rame di base se non ricadendo nella problematica appena sopra descritta.

PIANI TERMICI

Un sistema pratico e poco dispendioso per migliorare la termica dei componenti sfruttando il pcb è l'utilizzo dei piani di massa termica. Se un componente elettronico viene assemblato facendo aderire perfettamente parte del suo case a un metallo si potrà sfruttare la maggiore conducibilità termica di quest'ultimo (rispetto all'aria) per convogliare l'energia da dissipare del componente stesso. Questo perché la resistenza termica dell'aria è molto superiore rispetto alla resistenza termica del metallo (si ricordi che la resistenza termica di una sostanza quantifica la facilità con cui il calore fluisce attraverso di essa; una minore resistenza termica indica una maggiore capacità di estrazione del calore). Molti componenti, che abbiano nella loro caratteristica funzionale, vengono dotati ad hoc di un piano termico inferiore, che dovrà essere saldato al piano di massa termica realizzato sullo stampato. Come detto, lo scopo è quello di trasferire il calore di una certa massa (compo-

nente) a una massa maggiore (ambiente), in questo caso trasferendolo prima a una massa (piano termico) intermedia. Nel semplice circuito monofaccia standard vi sarà un trasferimento di calore dal componente al metallo (rame), dal metallo al dielettrico (substrato isolante) e da questo all'ambiente. La notevole massa termica del substrato rispetto al componente e la maggiore area esposta dello stesso può permettere la regolazione termica. Considerato però che il dielettrico maggiormente utilizzato nella produzione dei pcb ha una conducibilità termica non particolarmente alta (normalmente un terzo di quella del vetro), tale metodologia trova miglior applicazione sui circuiti dotati di fori metallizzati. Il vantaggio nell'applicare a detti piani termici dei fori metallizzati fa sì di sfruttare la maggiore conducibilità termica del metallo (rame $390 \text{ W/m}^2\text{K}$) nell'attraversamento del substrato.

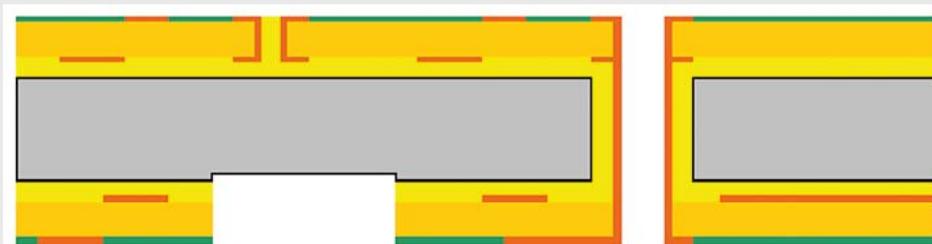
Si noti che il substrato continuerà la sua dissipazione al pari di quanto precedentemente descritto, per cui la presenza di tale metodo costruttivo determinerà certamente un incremento di dissipazione data dall'accresciuta massa/area metallica (rame di superficie più rame dei fori metallizzati), nonché dall'effetto convogliatore del foro.

In Fig. 2 è illustrata la formula che permette di quantificare tale incremento in termini di resistenza termica.

Infine, la realizzazione di un piano di massa termica esteso posto sul lato opposto al lato di posizionamento del componente e connesso a quest'ultimo mediante dei fori metallizzati, incrementa ulteriormente la dissipazione termica dell'apparato.

La metodologia ha dei limiti prin-

Fig. 5 - Pcb IMS
(substrato metallico
integrato su
4 layer - fori
ciechi - fresatura
controllata in Z)



cialmente legati alla dimensione dei piani termici realizzabili. Come detto, non sempre vi sono le possibilità di dedicare parte dei layer metallici a semplici piani termici. Considerando che la miniaturizzazione delle schede obbliga lo sfruttamento di un numero di layer sempre crescenti dedicati al solo funzionamento elettrico del circuito, tale concetto risulta abbastanza ovvio.

LAMINATI AD ALTA DISSIPAZIONE

Ulteriore step di tecnologia (per lo meno in ambito termico), fonda le sue radici nella scelta ad hoc dei substrati utilizzati per la realizzazione dei pcb, sfruttando quelli che permettono appunto un'alta dissipazione termica. In particolare, oggi vi sono almeno tre distinti approcci a tale riguardo: la tecnologia DBC, la tecnologia IMS e la tecnologia HTC.

LA TECNOLOGIA DBC

La Direct Bond Copper and thick-film ceramics è una tecnologia produttiva di pcb basata su un processo di bonding di un foglio di rame su un substrato ceramico che permette di ottenere un "laminato" che offre una elevata conducibilità termica (anche 180 W/m²K). Al pari si ottengono bassa dilatazione termica, alta tolleranza alle temperature, bassa costante dielettrica, rigidità e stabilità dimensionale. Ciò ne fa la metodologia preferita per diverse applicazioni di potenza.

Sfortunatamente il costo della materia prima è piuttosto alto in quan-

to il processo costruttivo del laminato (processo termico in atmosfera controllata) ha una gestione complessa; la lavorabilità meccanica è delicata (il laminato si taglia praticamente solo con il laser); il processo di metallizzazione ha esigenze particolari, per cui il prodotto finito è accessibile solo per applicazioni senza compromessi, là dove prezzo e tempi di produzione non hanno, praticamente, nessuna importanza. La ceramica, poi, a causa della sua eccezionale durezza, è molto fragile rispetto all'FR4 o a un metallo, per cui ciò ne va della fragilità finale dell'assemblato.

LA TECNOLOGIA IMS

Isolated Metallic Substrate (IMS) indica una metodologia per la quale il calore generato da un apparato (insieme pcb più componenti) viene trasferito a una massa metallica connessa termicamente allo stesso, ma isolata elettricamente (ciò è ovviamente necessario al funzionamento dell'apparato). Tale massa risulta dimensionalmente uguale al pcb in quanto ne è il reale substrato, per cui viene miniaturizzata di pari passo con la riduzione dell'estensione del circuito, risulta integrata nell'apparato, può essere variata nel volume, modificandone lo spessore, risulta essere un esteso piano termico senza occupare spazi destinati ai tratti conduttivi o ai componenti. Permette inoltre – nella maggior parte dei casi – il montaggio di ulteriori estensioni di dissipazione (alette o ventole) senza accorgimenti particolari che debbano rispettare l'isolamento elettrico dello stampato (in quanto il piano di contat-

to risulta già isolato). Il metallo utilizzato per tale massa termica usualmente è l'alluminio, ma vi sono possibilità di integrare anche substrati di rame o di lega di ottone (con risultati termici ovviamente diversi).

L'effetto dissipativo è ovviamente limitato dalla presenza di un'intercapedine (l'isolante elettrico) che riduce la conduttività termica totale dell'apparato, conduttività che altrimenti sarebbe pari a quella dei soli metalli coinvolti. Tali isolanti – come vedremo oltre – sono realizzati ad hoc incrementandone la capacità di conduzione termica così di raggiungere dei valori di assoluto rilievo.

Nella tecnologia IMS la limitazione maggiore rispetto a un pcb standard è legata al fatto che se è sufficientemente semplice realizzare dei cs monostrato (in quanto esistono ormai in commercio innumerevoli laminati utilizzabili con ampia scelta di caratteristiche elettrico/termiche), la realizzazione di doppi o multi layer è abbastanza complessa: ci sono evidenti limitazioni di masterizzazione e/o assemblaggio legate ai legami fisici fra metallo e materiale isolante interposto (vedi Fig. 3). L'impilaggio realizzato andrà calibrato e progettato tenendo ben conto di tutti i fattori coinvolti: da quelli elettrici e, soprattutto, da quelli termici (ciò in particolare in relazione più all'assemblaggio che al funzionamento). È infatti inutile dire che su tali pcb la presenza di una massa termica integrata incrementa le possibilità di ottenere delle difettosità post assemblaggio quali delaminazioni o fratture delle connessioni elettriche trasversali, per cui la gestione accurata di tutti i processi è tassativa.

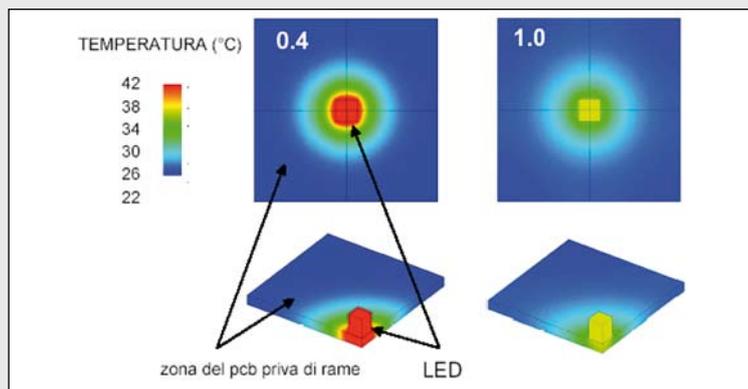


Fig. 7 - Evidenza di variazione termica fra pcb standard e htc pcb (dati Panasonic)

In più tale substrato ha una lavorabilità meccanica ben diversa da quella dei laminati usuali; introduce delle limitazioni di layout di rame nelle vicinanze ai bordi del circuito sia per i tratti conduttivi (piste elettriche) sia per le aree di contatto (pad): non tenendone conto si potrebbe incorrere in una forte riduzione di isolamento elettrico che potrebbe inficiare il funzionamento dell'apparato. Ad esempio, se in un circuito in FR4 è richiesta una distanza di almeno 100 μm del tratto conduttivo più vicino a un tratto fresato (bordo o cava che sia) al netto delle tolleranze di lavorazione, con un substrato metallico di 1 mm di spessore la limitazione è 10 volte maggiore (quindi 1 mm).

Per quello che riguarda i doppia faccia o multilayer in tecnologia IMS (vedi Fig. 4), esiste sia una possibilità produttiva che inserisce il substrato metallico fra i layer sia una che accoppia un pcb praticamente standard e un piano di massa termica posizionato su un lato esterno del pcb. In quest'ultimo caso la dissipazione è maggiore (per ovvie ragioni), ma il pcb non avrà accesso a uno dei lati esterni sia in termini di contatto elettrico sia di montaggio componenti (salvo qualche particolare eccezione).

Nel caso dei circuiti dove il piano termico è interno, la realizzazione dei

fori metallizzati passanti (vedi Fig. 5) prevede alcuni importanti scelte tecnologiche, che vanno gestite già in fase di master. È infatti necessario che il substrato metallico risulti elettricamente isolato sia dai tratti conduttivi superficiali (pad e piste) sia dai tratti conduttivi trasversali (fori metallizzati).

LA TECNOLOGIA HTC

High Thermal Conductivity indica una branca di laminati di denominazione standard (principalmente FR4 e CEM) che vogliono fare dello stesso materiale isolante il piano termico di dissipazione. Nascono dall'esperienza maturata con i materiali isolanti utilizzati nella tecnologia IMS, là dove devono coesistere alta rigidità dielettrica e alta conducibilità termica. Il tutto nasce dalla considerazione che non sempre la conducibilità termica cresca al crescere delle conducibilità elettrica, vi sono dei materiali considerati buoni isolanti elettrici che sono perfetti conduttori termici: ad esempio il diamante (ca 2500 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$). Considerato che il diamante è carbonio, che il carbonio è grafite e che la grafite è un ottimo conduttore elettrico, si capisce come la sola capacità di variare le strutture di certi composti permetta la variazione della loro conducibilità elettrica e termica. Studiando e sfruttando tali concetti (qui enunciati in modo assolutamente semplicistico) sono state realizzate delle amalgame polimero-ceramiche, caricate talvolta con polveri metalliche, atte alla realizzazione dei substrati IMS. Oggi si arriva a materiali di rigidità 6 kV/mm con conducibilità termica di 1,5 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ che è certamente un ottimo risultato.

Esportando tali concetti alla realizzazione dei laminati si sono ottenuti materiali praticamente standard (FR4 o CEM), con una formulazione della resina modificata che incrementa molto il loro potere di conduttori termici a parità di potere isolante. Al riguardo, si ricorda che il valore di rigidità dielettrica dell'FR4 standard è di circa 3 kV/mm , con un valore di conducibilità termica di circa 0,4 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$; alcuni materiali modificati arrivano a valori di 5 kV/mm e 1 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ (CEM3).

Certo, 1 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ non è un risultato eccezionale, se paragonato alla ben più performante tecnologia DBC, ma può essere un ottimo compromesso se applicato a un mercato in forte espansione quale quello, ad esempio, dei LED (vedi Fig. 6). Alcuni test eseguiti su una basetta (pcb) realizzata in materiale FR4 standard e su una paritetica basetta realizzata con tali materiali HTC privi di supporto metallico isolato, ove fosse stato applicato un led SMD di potenza 1 W, hanno evidenziato una riduzione di temperatura a regime di circa 15 °C. La stessa prova eseguita su supporto metallico isolato con conducibilità termica di 1,2 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ha ridotto di soli altri 2 °C la temperatura raggiunta (vedi Fig. 7).

L'assoluta semplicità del processo produttivo dei pcb quando si utilizzino tali laminati, sia in termini di processi umidi (in particolare in fase di metallizzazione, di plating elettrolitico, di incisione e di finitura) sia di processi meccanici (foratura, fresatura e v-cut) autorizzano a pensare alla possibilità di una loro ampia diffusione.

Autore:

Ing. Guido Scarpa - AAB-Tech srl

Fig. 6 - LED a montaggio superficiale

