

Micro-refrigeratori termoelettrici on-chip

Paolo De Vittor

È stata messa a punto una tecnologia in grado di consentire la realizzazione di refrigeratori termoelettrici talmente miniaturizzati da poter essere impiegati direttamente all'interno dei package dei microcircuiti o addirittura on-chip

Il raffreddamento di processori o sensori per via termoelettrica rappresenta una tecnica ormai consolidata da parecchi anni e utilizzata in quelle applicazioni dove sono determinanti l'assenza di parti in movimento nonché l'affidabilità del sistema.

Un modulo termoelettrico (anche denominato TEC da Thermoelectric Cooling) è in pratica una vera e propria pompa di calore allo stato

solido, e si basa sull'impiego di una "termocoppia" realizzata connettendo due materiali semiconduttori P e N con una lastra metallica. Applicando una differenza di potenziale ai due estremi (Fig. 1) si genera un trasferimento di calore da un elettrodo all'altro, e in tal modo si può trasferire calore ad esempio da un circuito integrato a un dissipatore.

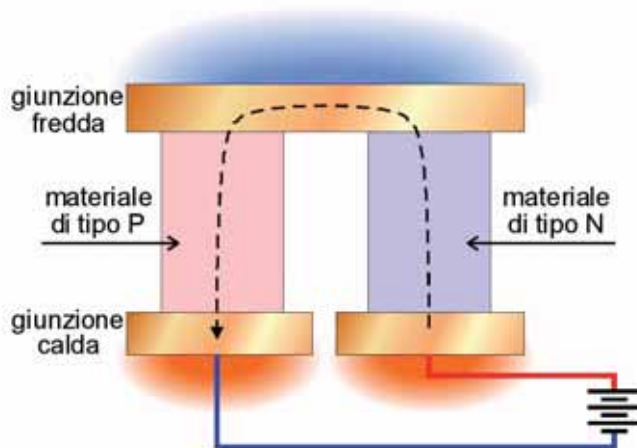


Fig. 1 – Schema di principio e costituzione di un refrigeratore termoelettrico, detto anche "cella di Peltier"

Invertendo la tensione applicata, verrà invertito anche il flusso di calore. Un modulo termoelettrico è realizzato ponendo in parallelo molte decine di celle elementari (Fig. 2), e viene anche denominato "cella di Peltier" poiché si basa sull'omonimo effetto. Si ricordi che l'effetto inverso, detto effetto Seebeck, viene comunemente sfruttato nelle ter-

mocoppie per la misura della temperatura.

I moduli presentano però taluni inconvenienti che ne limitano spesso l'impiego, quali ad esempio l'elevato assorbimento di corrente, la formazione di condensa dell'umidità atmosferica, l'ingombro e la fragilità, dovuta alla presenza dello strato isolante di ceramica. È per questo motivo che molti costruttori si stanno concentrando sullo sviluppo di moduli ter-

moelettrici a film sottile, gli unici in grado di garantire dimensioni estremamente compatte e miniaturizzate.

Il vantaggio del thin-film

Questi micro-moduli sono caratterizzati anche da una retta di carico che si differenzia sostanzialmente da quella di un elemento standard. La versione miniatu-

rizzata è in grado infatti di offrire un'efficienza più elevata, essendo in grado di "pompare" il calore 4 volte la versione "bulk", sebbene sia in grado di gestire una temperatura differenziale che è solo il 60% di un dispositivo standard. Un dispositivo TEC in tecnologia a film sottile è in grado di applicare un gradiente termico di 40 °C con lo spessore di un foglio di carta, con un tempo di risposta di alcuni millisecondi.

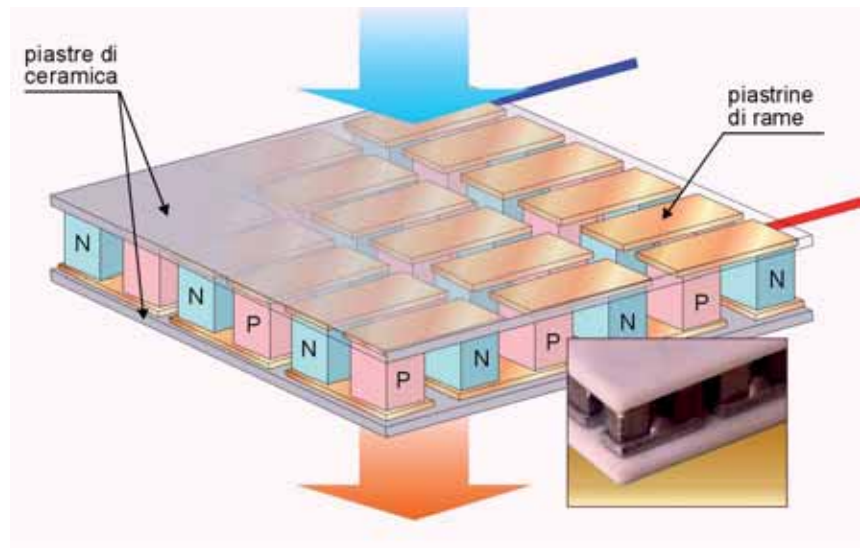


Fig. 2 - Un modulo termoelettrico è costituito da molte decine di celle di Peltier elementari

| refrigeratore termoelettrico | L (cm) | W (cm) | H (cm) | ΔT_{max} (°C) | Q_{max} (W) | $\Delta T_{max}/H$ (°C/cm) | Q_{max}/A (W/cm ²) | tempo di risposta |
|------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------|---------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------|
| bulk | 1.03 | 0.62 | 0.18 | 64 | 4.0 | 360 | 6.3 | secondi |
| film sottile | 0.35 | 0.30 | 0.01 | 40 | 16 | 4000 | 150 | millisecondi |

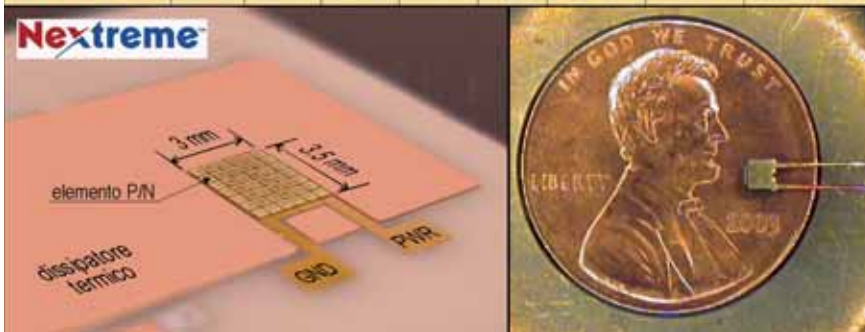


Fig. 3 - Confronto fra le caratteristiche e le prestazioni offerte da un refrigeratore termoelettrico standard in versione bulk (Melcor HOT2.0) e il nuovo TEC in versione miniaturizzata a film sottile di Nextreme

Un confronto più approfondito può essere dedotto dai dati riportati nella tabella di figura 3, basata sui dati relativi ai TEC a film sottile prodotti dalla statunitense Nextreme Thermal Solution, visibile nella foto.

Per i medesimi due dispositivi, il confronto fra le due rette di carico (Fig. 4) mostra come la tecnologia a film sottile offre in realtà un regime di lavoro decisamente più favorevole. Infatti, sebbene il dispositivo a thin-film permetta un ΔT di soli 40 °C (contro i 65 °C del bulk), si deve tener conto che tale gradiente termico si sviluppa su di uno spessore di soli 0,1 millimetri. Non solo, ma come si può vedere dalla figura 4 la densità di potenza è di ben 150 W/cm² contro gli 8 W/cm² del cooler tradizionale.

Tale vantaggio viene spiegato dal fatto che il flusso termico dipende dall'inverso dello spessore del materiale, e poiché le versioni a film sottile hanno uno spes-

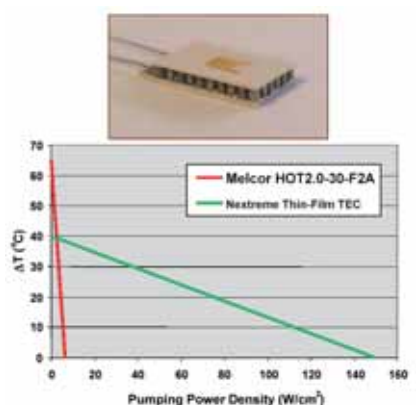


Fig. 4 - Il confronto fra le rette di carico mostra come la tecnologia a film sottile offre un regime di lavoro decisamente più favorevole

sore che è solo un ventesimo di quello degli elementi Peltier tradizionali, ci si può avvantaggiare di un trasporto del calore che è 20 volte più efficiente. In figura 5 è visibile una foto all'infrarosso dell'elemento termoelettrico a film sottile di Nextreme montato sul dissipatore.

Infine, le piccole dimensioni e soprattutto il ridotto spessore permettono di utilizzare il TEC a film sottile direttamente a intimo contatto con gli elementi che debbono essere raffreddati, sia che si tratti di processori grafici sia di sensori (quali ad esempio quelli ottici, che debbono operare a bassa temperatura per massimizzare la sensibilità e ridurre l'influenza dei disturbi termici) o di emettitori per i quali la durata dipende strettamente dalla temperatura operativa.

L'integrazione nel package

Il fatto di poter integrare direttamente nel package dei semiconduttori l'elemento refrigerante rappresenta un'opportunità finora non consentita per i costruttori, che potranno ora trarre vantaggio da questa nuova tecnologia. Gli odierni circuiti integrati di elevate prestazioni che ospitano un sensore termi-

co (un diodo o un bjt che rilevano la temperatura istantanea interna) permettono di attuare un oculato controllo dell'eventuale surriscaldamento del chip, che viene limitato generalmente riducendo il clock oppure ritardando l'esecuzione delle operazioni.

Se però viene integrato un TEC a film sottile direttamente all'interno del package (Fig. 6) è possibile agire istantaneamente aumentando la corrente nel refrigeratore, e con una corrente di 3 A è possibile ridurre localmente la temperatura di oltre 10 °C. Se invece si utilizza un package standard, è comunque possibile interporre l'elemento refrige-

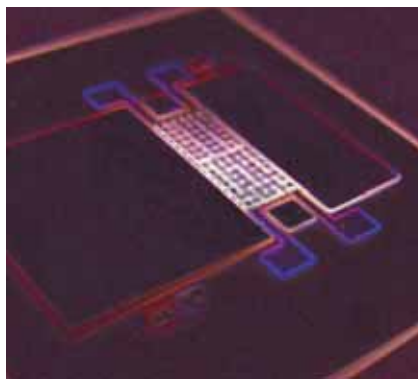


Fig. 5 - Mappa termica all'infrarosso dell'elemento termoelettrico a film sottile di Nextreme montato su dissipatore

che coinvolge direttamente i costruttori di circuiti integrati - Nextreme propone la propria soluzione, rivolta a quelle applicazioni power-intensive che impongono ai componenti elevate dissipazioni di potenza e quindi non semplici problemi di smaltimento del calore generato. Proprio a questo proposito l'industria si è sbizzarrita, affidando lo scambio termico fra componenti elettronici e ambiente a soluzioni quali dissipatori, ventole, raffreddamento a liquido, camere di vapore, elementi ceramici, paste termiche, celle di peltier (Fig. 8), e così via. Con il progressivo evolvere delle tecnologie elettroniche verso geometrie

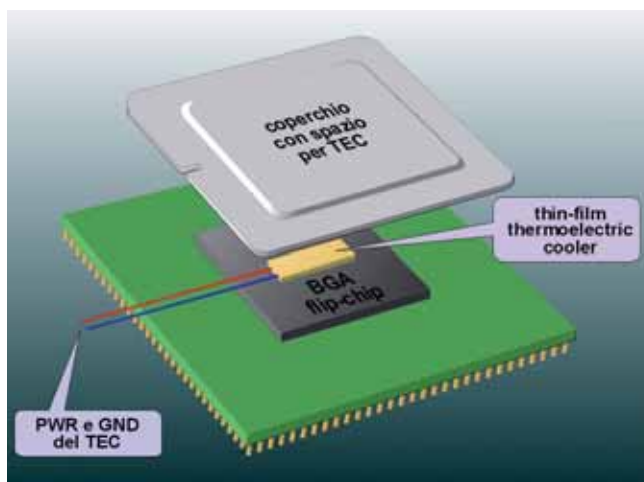


Fig. 6 - Se viene integrato un TEC a film sottile direttamente all'interno del package è possibile agire istantaneamente riducendo la temperatura del contenitore

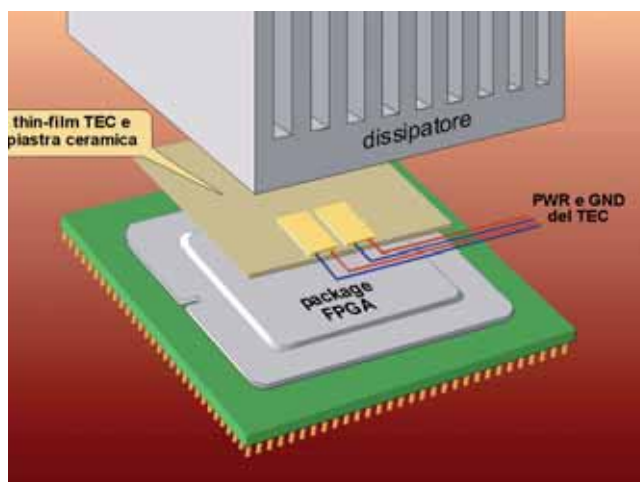


Fig. 7 - Se si utilizza un package standard è comunque possibile interporre l'elemento refrigerante fra package e dissipatore

rante fra lato superiore del package e dissipatore, magari utilizzando due elementi in parallelo (Fig. 7).

Una soluzione ancora più drastica consiste nell'incapsulare gli elementi refrigeranti direttamente all'interno del contenitore stesso del circuito integrato, a contatto diretto con il die, per esempio al di sotto del chip. Per questo impiego -



Fig. 8 - Un esempio d'impiego di una cella di Peltier interposta fra package e dissipatore con ventola

nanometriche e con il progressivo aumento della dissipazione a causa delle correnti di fuga, però, il problema si è di fatto acuitizzato, ed è sempre più necessario poter rimuovere il calore in aree sempre più localizzate, proprio in prossimità alle zone di silicio dove questo calore viene generato.

Ecco quindi la soluzione Nextreme: un

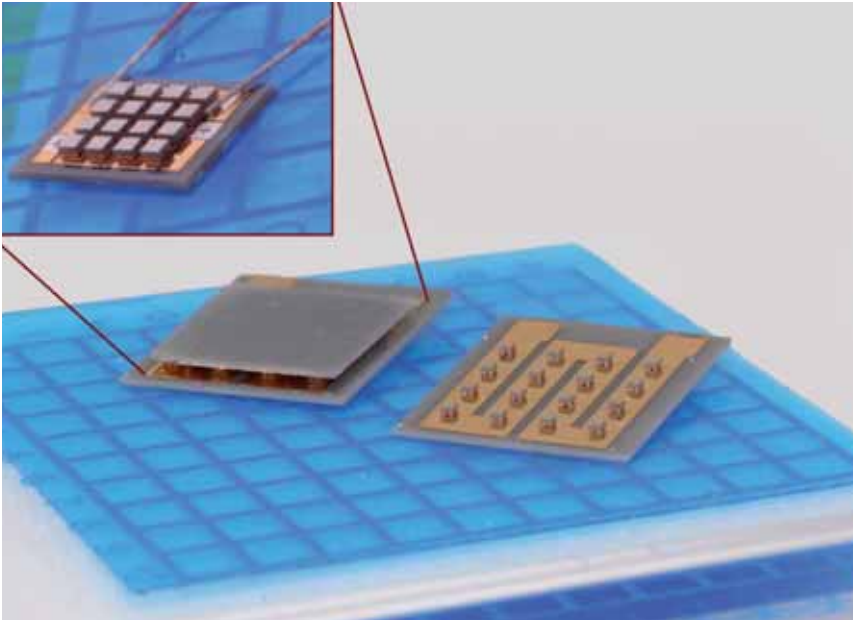


Fig. 9 – Gli array di micro-elementi termoelettrici TEC a film sottile di Nextreme quale l'NX2 possono essere messi direttamente a contatto con i chip al silicio

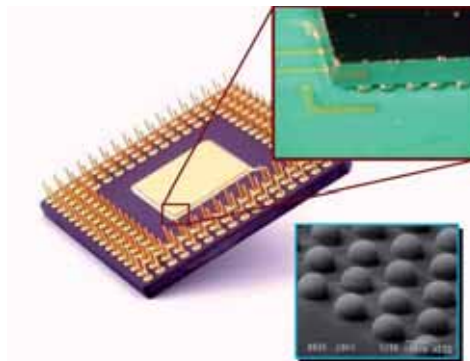


Fig. 10 – Con la tecnica "flip chip" i contatti vengono realizzati sulla superficie del chip sotto forma di micro-sfere e il die viene saldato "a rovescio" direttamente sul supporto del package

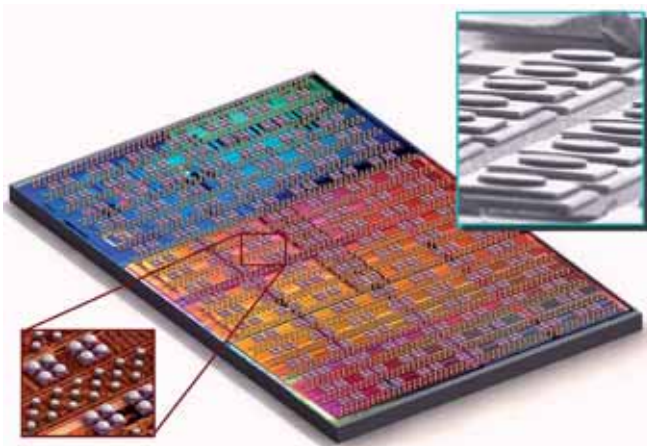


Fig. 11 - L'idea di Nextreme è quella di intercalare ai normali "bump" degli elementi termoelettrici, in modo da poter accedere direttamente nelle porzioni di chip che più di altre hanno bisogno di rimuovere il calore

array di elementi refrigeranti in grado di essere integrato proprio sotto al chip di silicio (Fig. 9). Ciò permette di agire tempestivamente, senza dover attendere i consistenti ritardi dovuti all'elevata capacità (e quindi inerzia) termica dei tradizionali dissipatori di calore, ventilati o no. Anche il raffreddamento a liquido (heat pipe) presenta comunque una non trascurabile inerzia termica.

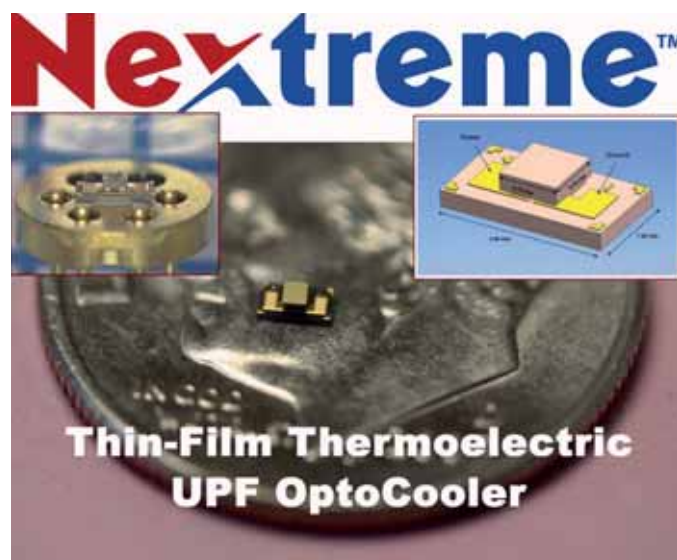
Direttamente on-chip

Per venire incontro a queste esigenze Nextreme - forte dell'esperienza maturata in questo settore - ha proposto un metodo applicabile agli attuali microprocessori, controller grafici o comunque i

dispositivi che si avvalgono della tecnologia "flip chip". Con questa tecnica i contatti vengono realizzati sulla superficie del chip sotto forma di micro-sfere e il die viene saldato "a rovescio" direttamente sul supporto del package (Fig. 10). L'idea di Nextreme è quella di intercalare ai normali "bump" (le micro-sfere usate per i contatti elettrici) degli elementi termoelettrici, in modo da poter accedere direttamente nelle porzioni di chip che più di altre hanno bisogno di

rimuovere il calore. Si realizza in tal modo una struttura composita nella quale si alternano i normali bump alle micro-celle Peltier, e l'aspetto finale è quello visibile in figura 11. I costruttori di microcircuiti potrebbero in tal modo risolvere il problema degli "hot spot", ovvero delle zone localizzate del chip dove l'intensa attività elettrica provoca un eccessivo surriscaldamento. Non solo, ma calcolando opportunamente il numero di bump da utilizzare come termoregolatori, sarebbe possibile raffreddare il sistema in maniera dinamica, attivando e disattivando le varie zone (o regolandone la corrente di lavoro e quindi la temperatura) a seconda delle necessità.

Fig. 12 - Le dimensioni dell'OptoCooler UPF4 di Nextreme risultano estremamente ridotte, al punto da poter essere integrato direttamente all'interno del package dei dispositivi optoelettronici



essere integrato nel contenitore dei diodi laser utilizzati nelle telecomunicazioni per la trasmissione dati nei cavi di fibra ottica al fine di controllare la temperatura del diodo e di mantenere le condizioni operative adeguate a garantirne le migliori prestazioni.

Per il raffreddamento di componenti di maggiori dimensioni quali ad esempio gli amplificatori ottici, Nextreme ha sviluppato un

Soluzioni per l'optoelettronica

Nextreme non ha trascurato alcuna applicazione, e ha individuato un altro settore dove il problema del raffreddamento e soprattutto della stabilità termica dei componenti è di notevole importanza: quello dei componenti ottici.

Per questo motivo la società ha sviluppato quella che ha chiamato la "piattaforma termoelettrica", denominata UPF OptoCooler, dove la sigla UPF sta a significare Ultra-High Packing Fraction. Questo modulo è indicato per le applicazioni di tipo optoelettronico, medicale, di laboratorio, militare e aerospaziale, ed è stato ottimizzato per dispositivi quali i led, i diodi laser e i sensori ottici di nuova concezione.

L'OptoCooler UPF4 - le cui dimensioni sono estremamente ridotte (Fig. 12) - sebbene occupi solo 0.55 mm^2 di superficie è in grado di rimuovere 420 mW di calore a una temperatura ambiente di 25°C ; ne risulta una densità di potenza di ben 78 W/cm^2 , ovvero dieci volte quella dei dispositivi termoelettrici convenzionali.

A 85°C esso può rimuovere 610 mW , con un'efficienza di 112 W/cm^2 , e grazie alle sue ridotte dimensioni può essere integrato direttamente all'interno del package del dispositivo optoelettronico,

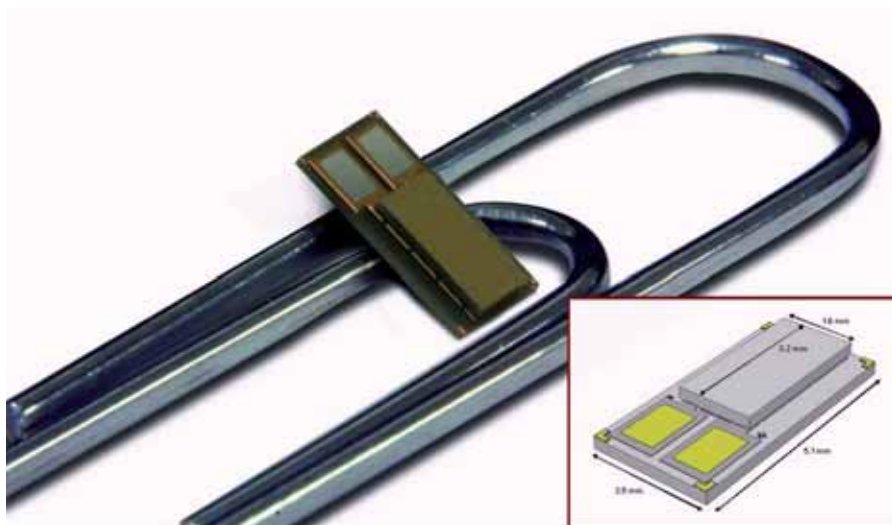


Fig. 13 - L'OptoCooler UPF40 permette di smaltire fino a 3.7 Watt di calore

a intimo contatto con il chip semiconduttore. In tal modo, questo micro-TEC è in grado di ridurre la temperatura di lavoro di 45°C , a tutto vantaggio dell'efficienza, della stabilità e dell'affidabilità e durata del componente ottico. Ad esempio, grazie alle sue dimensioni (il modulo, visibile nella Figura 12, misura $2.34 \times 1.24 \text{ mm}$ e ospita la cella di Peltier da $0.74 \times 0.74 \text{ mm}$) l'OptoCooler può

modulo di maggior potenza, l'UPF40, visibile in Figura 13. L'UPF40 è in grado di offrire una densità di potenza di 72 W/cm^2 a 25°C , ovvero rimuovere fino a 3.7 Watt di calore in un'area di 5.1 mm^2 , con un'efficienza che è da 4 a 5 volte quella dei TEC tradizionali. Il suo impiego, oltre che nelle telecomunicazioni per gli amplificatori ottici, può essere ideale per i led ad alta luminosità, nei diodi laser, nei rilevatori ad alta sensibilità e nei VCSEL di potenza (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser).

Nextreme
www.nextremethermal.com