

散熱片之設計與在電子冷卻技術中之應用

劉君愷

一、介紹

利用散熱片來增加散熱的面積是熱管理技術中最常見也是最基本的方式，隨著電子元件發熱密度增加的趨勢，散熱的需求日益增加，散熱設計的困難度越來越高，所花費的成本也越來越多。舉例而言，早期 PC 的 CPU 如 286，發熱瓦數只有十幾瓦，因此只要約 3 公分高的散熱片加低轉速風扇就可解決，但是目前 PC 的 CPU 用散熱片高度卻達到 3 倍，鱗片數目增加 3 倍，風扇轉速也提升一倍，成本則增加 5、6 倍以上。雖然新製程及設計技術不斷提升，散熱片的應用在有限空間的限制下，似乎有漸漸趨向極限的趨勢，未來各種不同的冷卻技術如水冷、冷凍循環以及浸入式沸騰冷卻等都可能用來解決散熱問題。儘管如此，散熱片仍是最經濟、最可靠的散熱方式，因此如何提升散熱片的效率成了很重要的課題。

因此為了滿足未來電子散熱的需求，在散熱片的形狀、材料及製程上都必須有更新的技術，此外整合其他散熱元件的設計方式的也可以增加應用時的效率。本文將介紹散熱片的種類及製程，散熱片的應用以及未來的設計需求。

二、散熱片的種類

許多的散熱片設計由於忽略了製造的概念，使得研發產品的可靠度及成本成為最後量產的障礙。由製造方式來看，氣冷的散熱片可分為下面幾種，如圖一所示，表一則為製程性能參數的整理。

1. 壓印(Stampings)散熱片 銅片或鋁片可用壓印的方式製成所需的形狀。此種製程成本低，適合量產，可用於低熱密度的元件。而壓印的元件在組裝上也有自動化的便利性，因此可進一步降低成本。
2. 擠型(Extrusion)散熱片 擠型的製造方式是由將材料在高壓下強制流入模孔中成形而使得固體轉換為等截面的連續長條。擠形是散熱片製造中最廣泛使用的方式，設備投資的經額中等。可經由橫切的方式產生矩形的針狀散熱片，可產生鋸齒狀的鱗片以增加 10~20% 的效能，但會降低擠型的速度。擠型的高寬比限制可高到 6，使用特殊模具設計時則可到 10 的高寬比。
3. 鑄造(Casting)散熱片 將熔化的金屬加壓到金屬模中，以產生精確尺寸的元件。此技術可產生高密度的針狀散熱片。高的治具費用是最大的成本投資，但適合大量生產的低元件成本可補回此部分。鑄造散熱片的熱傳導性會受到固化時氣體滲入而產生多孔狀而降低。
4. 接著(Bonding)散熱片 接著散熱片將鱗片組裝於散熱片底部，接著劑對

散熱片的效率影響很大，如果製造不當，會形成熱的阻礙，一般使用導熱膠或是錒錫。接著散熱片的底部由於需特別加工，因此會使得成本較高，但由於製造技術的提升，以及接著劑的改良，如熱導性的鋁填充膠等，使得接著散熱片的成本降低。此種製程方式可製造高寬比高的散熱片，在不增加體積需求下可大量增加冷卻效率。

5. 摺疊(Folding)散熱片 摺疊散熱片將金屬片摺疊成鰭片陣列形狀，由於將摺疊的金屬片藉由錒錫及銅焊接的方式焊接於散熱片底部，因此在介面上造成額外的熱阻。在製作上的步驟增加，使得成本提升。而製造小間距的鰭片也是困難點。由於增加散熱面積，因此散熱效率不錯，
6. 改良式的鑄造(Modified die-casting)散熱片 此種製造方式是傳統鑄造方式的延伸，首先將相當薄的壓印鰭片陣列以間格物隔開，然後以夾具固定，使散熱片的底部鑄造時將鰭片固定於底部，而形成散熱片。此種方式消除了鰭片及底部材料的介面熱阻，此種製程可提供高的高寬比。
7. 鍛造(Forging)散熱片 鍛造散熱片是用非常高的壓力敲擊 (punch) 方式將金屬材料壓入模中使鰭片成形，可能遇到的製程上的問題是材料會阻礙在模子中，使得高度不均一，熱鍛造比較容易，而冷鍛造可製造較密及較強的鰭片。鍛造方式的優點包括高強度、較小的表面粗糙度以及材料的均一性等。鍛造方式的散熱片具有較高的高寬比。
8. 切削(Skiving)散熱片 這是一種新的散熱片製程方式，鰭片用特殊的刀具加工，使得弧狀的精密薄片由金屬塊削出，由於鰭片和金屬塊是相同材料，因此沒有接著散熱片或是摺疊散熱片的缺點。由於製程技術的增進，目前也可製造出高密度的鰭片。目前採用的是 6063 鋁，銅的切削還在實驗階段。由於切削深度可以相當低，鰭片的厚度可以較薄，可以設計較輕性能較高的散熱片。
9. 機械加工(Machining)散熱片 藉由機械加工的方式將材料從金屬塊中移除以形成鰭片的形狀。最常用的方式是在 CNC 機器上採用一組切割鋸，鋸子之間有精密的距離，以切割出鰭片幾何形狀。由於加工時容易造成鰭片的破壞或捲曲，因此需二次加工。優點是容易自動化，因此未來仍有使用空間。



圖一 散熱片製造方式

Parameter	Conventional Processes		Innovative Processes					
	Extruded	Die-Casting	Bonding	Folding	Modified Die-Casting	Forging	Skiving	Machining
Min. δ , mm	1	1.75	0.75	0.25	0.2	0.4	0.3	0.5
Max. H/s	8:1	6:1	60:1	40:1	-----	50:1	25:1*	50*
Min. s, mm	6.6*	8.3*	0.8*	1.25*	0.2	1	2	1
Material	Al	Al, Zn-Alloy	Al, Cu, Mg	Al, Cu	Al, Zn-Alloy	Al	Al	Al, Cu, Mg

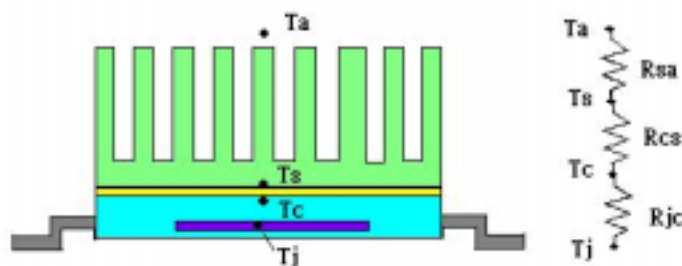
表一 各種製程的能力及材料【2】

三、散熱片的應用方式

散熱片的選用，最簡單的方式是利用熱阻的概念來設計，熱阻是電子熱管理技術中很重要的設計參數，定義為

$$R = T / P$$

其中 T 為溫度差， P 為晶片之熱消耗。熱阻代表元件熱傳的難易度，熱阻越大，元件得散熱效果越差，如果熱阻越小，則代表元件越容易散熱。IC 封裝加裝散熱片之後會使得晶片產生的熱大部分的熱向上經由散熱片傳遞，由熱阻所構成之網路來看，共包括了由熱由晶片到封裝外殼之熱阻 R_{jc} ，熱由封裝表面到散熱片底部經由介面材料到散熱片底部之熱阻 R_{cs} ，以及熱由散熱片底部傳到大氣中之熱阻 R_{sa} 三個部分。



圖二 散熱片應用之熱網路圖

R_{jc} 為封裝本身的特性，與封裝設計有關，在封裝完成後此值就固定，須由封裝設計廠提供【1】。

$$R_{jc} = (T_j - T_c) / P$$

T_j 為晶片介面溫度，一般在微電子的應用為 $115 \sim 180$ ，而在特定及軍事的應用上則為 $65 \sim 80$ 。 T_a 的值在提供外界空氣時為 $35 \sim 45$ ，而在密閉空間或是接近其他熱源時則可定為 $50 \sim 60$ 。

R_{cs} 為介面材料之熱阻，與介面材料本身特性有關，而散熱片設計者則須提供 R_{sa} 的參數。

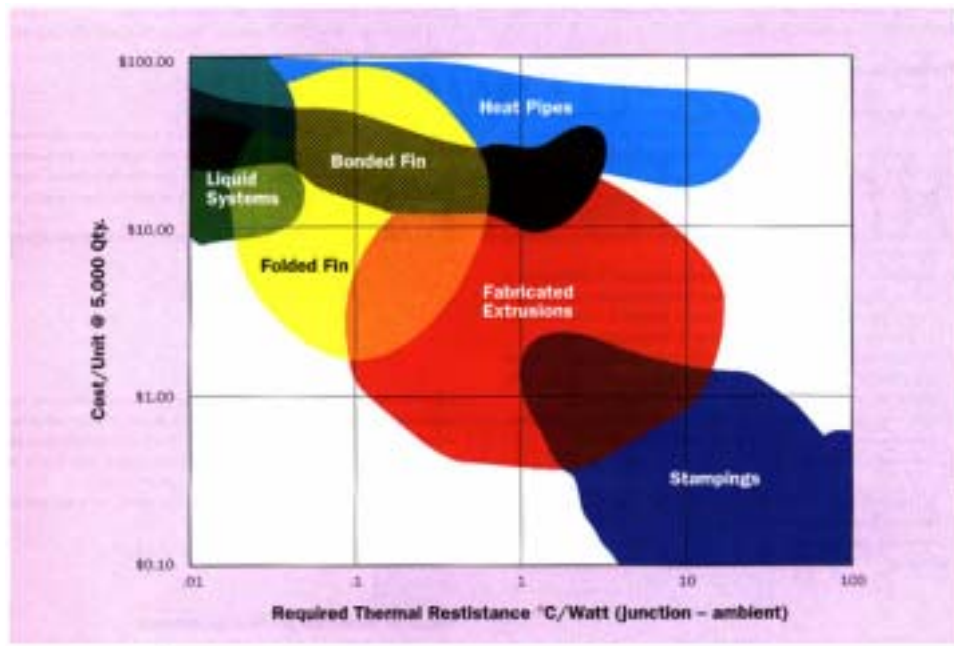
$$R_{cs} = (T_c - T_s) / P$$

$$R_{sa}=(T_s-T_a) / P$$

R_{cs} 和表面光滑度、介面材料的材料特性以及安裝壓力以及材料厚度有關，由於一般設計時常會忽略介面材料的特性，因此需特別注意。由熱阻網路來看，可以得到熱阻的關係為

$$R_{ja}=R_{jc}+R_{cs}+R_{sa}=(T_j-T_a) / P$$

散熱片的作用即是如何使用適當的散熱片使得晶片的溫度 T_j 保持在設定值以下。然而散熱設計時必須考慮元件的成本，圖三則為幾種傳統散熱片及元件的成本和性能估算，由圖中可知，性能佳的散熱片成本一般較高，如果散熱量較小的設計，就可以不必用到高性能高成本的散熱元件。散熱設計時必須瞭解散熱片的製作成本及性能的搭配，才能使散熱片發揮最大效益。



圖三 散熱片性能及成本之關係

四、散熱片的材料

傳統散熱片材料為鋁，鋁的熱傳導性可達 $209\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，加工特性佳，成本低，因此應用非常廣。而由於散熱片性能要求越來越高，因此對於散熱片材料熱傳導特性的要求也更為殷切，各種高傳導性材料的需求也越來越高。銅的熱傳導率 $390\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，比起鋁的傳導增加 70%，而缺點是重量三倍於鋁，每磅的價格和鋁相同，而更難加工。由於受限於高溫的成型限制，無法和鋁同樣擠型成形，而銅的機械加工花更多時間，使加工機具更易損毀。然而當應用的場合受限於傳導特性為重點時，銅通常可作為替代之用，此外利用銅做為散熱片的底部可提昇熱傳擴散的效率，降低熱阻值。

一些增進散熱的材料如高導熱的 polymer、碳為基材的化合物，金屬粉末燒結，化合的鑽石以及石墨等都是目前受矚目的熱傳導材料。然而最需要的性質是

什麼？控制的傳導性、高加工性、低重量、低熱膨脹係數、低毒性以及更重要的是成本必須低於鋁。許多新材料的物理特性高於鋁，但價格也多了許多倍。

AlSiC 是目前最新的材料，混合各種鋁合金以製成特殊的物理性質，控制的熱膨脹、高傳導性以及顯著的強度使得 AlSiC 更有吸引力，由於成本的關係，這種材料一般用在底部及作為功率模組底部和晶片直接接觸的基板。

	CTE	K
	Ppm	W/m-K
Aluminum	23	209
Copper	17	390
Copper-Molybdenum	7.2	195
Cu 20%-Tungston 80%	7	250
Copper Graphie	2	~350
AlSiC	6.5-8.0	180-210
Silicon	3.3-4.2	150

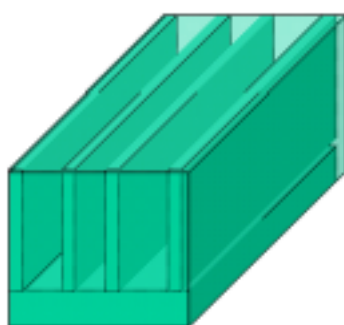
表二 各種不同散熱片的材料比較

五、散熱片的設計的一般原則

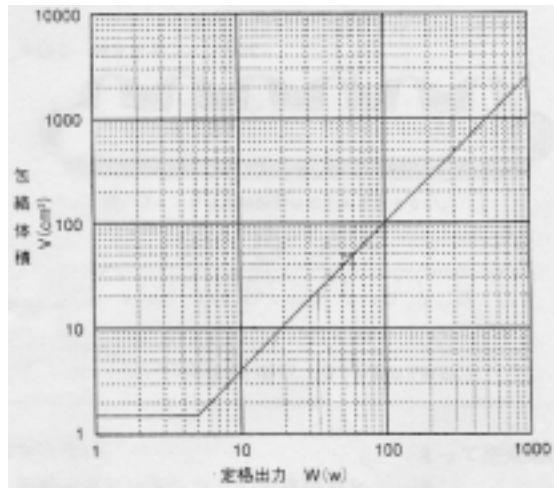
接著我們進一步討論散熱片的詳細的設計細節，首先介紹一般的方式，這些點單的方法可以對一些應用簡單的散熱片設計提供設計標準：

1. 包絡體積 以散熱片的設計而言，這裡介紹一個簡易的方法，也就是包絡體積的觀念，所謂包絡體積是指散熱片所佔的體積，如果發熱功率大，所需的散熱片體積就比較大。散熱片的設計可就包絡體積做初步的設計，然後再就散熱片的細部如鰭片及底部尺寸做詳細設計。發熱瓦數和包絡體基的關係如下式所示。

$$\text{Log}V=1.4 \times \text{log}W-0.8(\text{Min } 1.5\text{cm}^3)$$



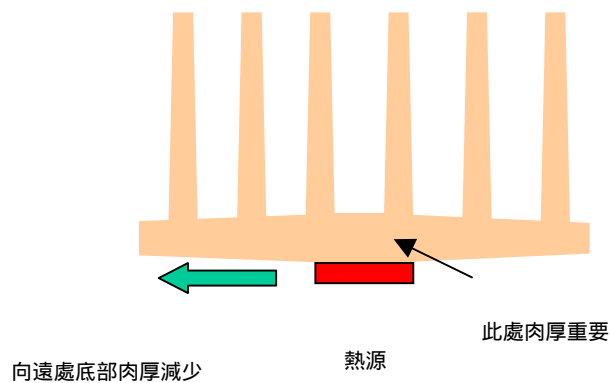
圖四 包絡體積示意圖



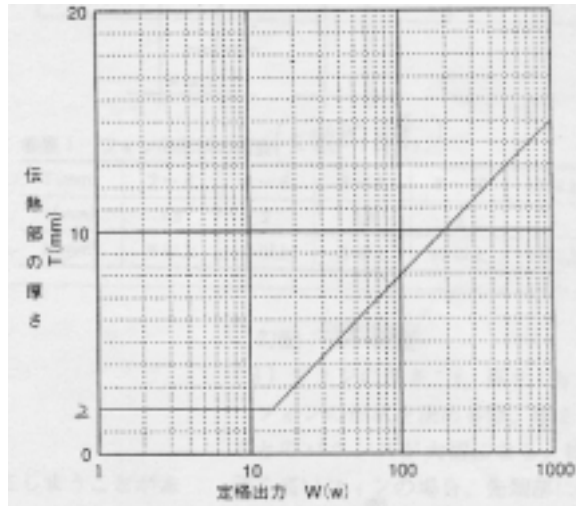
圖五 包絡體積和輸入功率的關係

2. 散熱片底部厚度：要使得散熱片效率增加，散熱片底部厚度有很大的影響，散熱片底部必須夠厚才能使足夠的熱能順利的傳到所有的鰭片，使得所有鰭片有最好的利用效率。然而太厚的底部除了浪費材料，也會造成熱的累積反而使熱傳能力降低。良好的底部厚度設計必須由熱源部份厚而向邊緣部份變薄，如此可使散熱片由熱源部份吸收足夠的熱向周圍較薄的部份迅速傳遞。散熱瓦數和底部厚度的關係如下式所示：

$$t = 7 \times \log W - 6 \quad (\text{min } 2\text{mm})$$



圖六 底部之厚度關係



圖七 底部厚度和輸入功率的關係

3. 鰭片形狀：

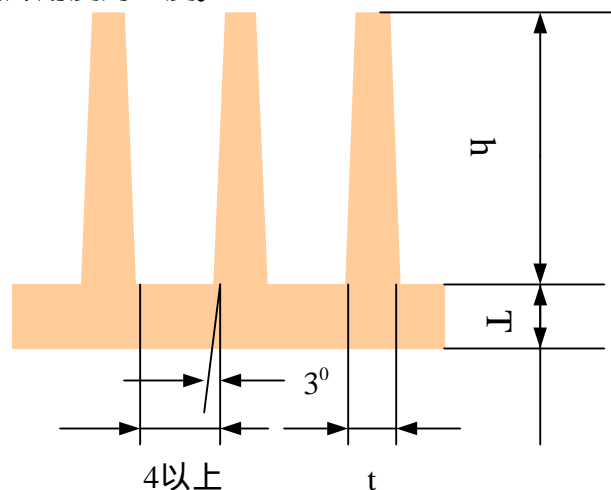
散熱片內部的熱藉由對流及輻射散熱，而對流部分所佔的比例非常高，對流的產生

(1) 鰭片間格 在散熱片壁面會因為表面的溫度變化而產生自然對流，造成壁面的空氣層（邊界層）流，空氣層的厚度約 2mm，鰭片間格需在 4mm 以上才能確保自然對流順利。但是卻會造成鰭片數目減少而減少散熱片面積。

鰭片間格變狹窄-自然對流發生減低，降低散熱效率。

鰭片間格變大-鰭片變少，表面積減少。

(2) 鰭片角度 鰭片角度約三度。



圖八 鰭片形狀

T(mm)	2~4	4~6	6~8	8~10	10 以上
t(mm)	1.5	2	2.5	3	4
h(mm)	6 以上	8 以上	8 以上	10 以上	10 以上

表三 鰭片形狀參考值

- (3) 鰭片厚度 當鰭片的形狀固定，厚度及高度的平衡變得很重要，特別是鰭片厚度薄高的情況，會造成前端傳熱的困難，使得散熱片即使體積增加也無法增加效率。散熱片變短時，增加表面積會增加散熱效率，但也會使散熱片的體積減少而造成的缺點（熱容量減少）因而產生。因此鰭片長度需保持一定才能產生效果。

鰭片變薄-鰭片傳熱到頂端能力變弱

鰭片變厚-鰭片數目減少（表面積減少）

鰭片增高-鰭片傳到頂端能力變弱（體積效率變弱）

鰭片變短-表面積減少

4. 散熱片表面處理：

散熱片表面做耐酸鋁(Alumite)或陽極處理可以增加輻射性能而增加散熱片的散熱效能，一般而言，和顏色是白色或黑色關係不大。表面突起的處理可增加散熱面積，但是在自然對流的場合，反而可能造成空氣層的阻礙，降低效率。

上述之設計方式僅供散熱片設計之參考，實際散熱片設計時還需考慮與元件以及環境的配合，尤其是高效能散熱片的設計需配合實驗量測驗證以及 CFD 的分析模擬。

六、強制對流散熱片設計

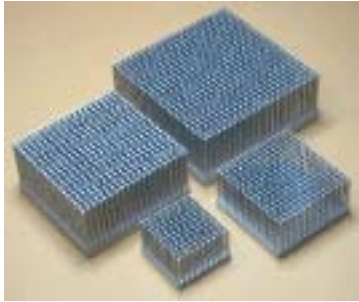
隨著散熱的需求日益增加，散熱片的效率需要進一步提升，基本上可透過兩個方式來改善，第一個方法是增加熱傳係數 h ，第二個方法則是增加散熱面積，可由牛頓冷卻定律說明。

$$q=hA(T_{\text{heat sink}}-T_{\text{air}})$$

熱傳係數可以透過幾個方法增加：

- (1) 增加空氣流速 這個是很直接的方法，可以配合風速高的風扇來達成目的，但是須注意當鰭片變密或是形狀形成阻礙時，會造成流阻，形成背壓或回流，產生噪音及灰塵。
- (2) 平板型鰭片做橫切 將平板鰭片切成多個短的部分，這樣雖然會減少散熱片面積，但是卻增加了熱傳導係數，同時也會增加壓。當風向為不定方向時，此種設計較為適當。
- (3) 針狀鰭片設計 針狀鰭片散熱片具有較輕及體積較小的優點，同時也有較高的體積效率，更重要的是具有等方向性，因此適合強制對流散熱片，如圖九所示。鰭片的外型有可分為矩形、圓形以及橢圓形，矩形散熱片是由鋁擠型橫切而成，圓形則可由鍛造或鑄造成型，橢圓形或液滴形的散熱片熱傳係數較高，但成型比較不易。
- (4) 衝擊流冷卻 利用氣流由鰭片頂端向底部衝擊，這種冷卻的方式可以增

加熱傳導性，但是須注意風的流向配合整體設計。

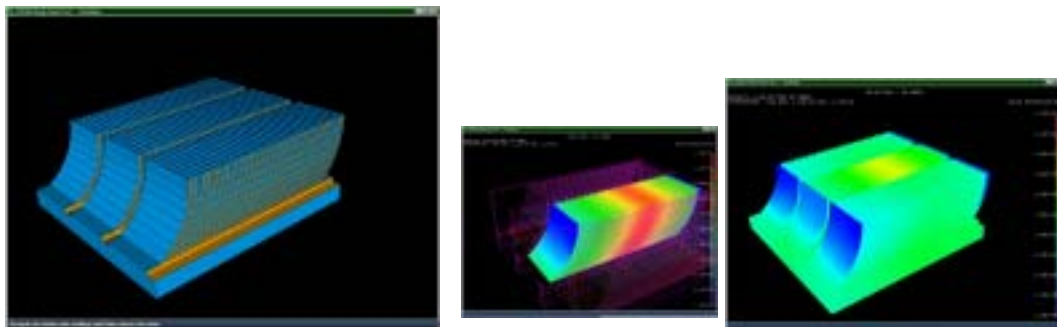


圖九 針狀鰭片散熱片 (Alpha Inc.)



圖十 輻射狀鰭片散熱片(JMC Inc.)

對於常見的風扇置於散熱片上方的下吹設計，由於須配合風扇特性，因此需做更精確的設計。軸流風扇由於有旋轉效應，同時軸的位置風不易吹到，因此許多散熱片設計成輻射狀，如圖十所示。也有些散熱片的頂端設計成長短不一或是彎曲的形狀用以導風。另外種方式是採用側吹的方式，一般而言，側吹方式的散熱片由於氣流可吹過鰭片，而且流阻較少，因此對於高且密的鰭片而言，配合頂端加蓋設計以防止氣流旁通 (bypass)，側吹式比下吹式可有更好的效果。但是由於佔用了側面空間，因此減少了散熱片鰭片數目。特殊型式的風扇設計時最好配合 CFD 模擬，以確認散熱片形狀所造成的效應，如圖十一所示，同時應配合實驗驗證。另一方面，強制對流散熱片的設計還須注意系統風向及機構配合，利用系統風散熱，注意其他零件造成的流阻以及利用外殼等部份做進一步散熱，以節省空間。



(a)

(b)

(c)

圖十一 散熱片熱傳分析(a) model (b) 鰭片溫度分佈(c)散熱片溫度分佈

六、結論

目前散熱片的設計已漸漸趨向極限，空氣冷卻的方式將無法滿足需求，未來的散熱片設計將結合其他散熱元件及方式如熱管、平板式熱管、迴路型熱管、水冷等，使得散熱的設計更為彈性及多樣化，不論如何，散熱片仍然是最有效益的散熱方式，善用散熱片設計於發熱元件可改善系統發熱狀況。高效能散熱片的設計可配合 CFD 分析軟體做完整分析，以了解氣流及熱傳狀況，不必迷信複雜形狀的散熱片，簡單鋁擠型散熱片做橫切等加工就可能有不錯的效果。不論設計製造或是應用散熱片的工程師都應了解散熱片的設計及特性，才能解決電子產品的熱管理問題。

參考文獻

1. S. Lee, “How to select a heat sink “, electronics cooling, 1995.
2. C.A. Soule, “Future trends in heat sink design”, electronics cooling, 2001.
3. M. Iyengar & A.Bar-Cohen, “Design for Manufacturability of SISEparallel plate Forced convection heat sinks”, Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 2000.
4. H. W. Markstein,“Optiumizing heat sink performance ”, EP & P, 1995.