

熱相變界面材料發展與應用

楊書榮
工研院電子工業研究所
構裝設計技術組 副研究員

摘要

隨著電子產品尺寸輕薄短小、功能耀眼奪目推陳出新的同時，伴隨著的效應則是系統內更簡潔、合適的封裝技術需求，以及內部溫度的普遍提升，而元件溫度的提升歸因於發熱功率，其發展歷程（特別是CPU）亦如摩爾定律般亦步亦趨的追隨著。傳統元件發熱功率小時，最簡便的解決模式不外乎添加散熱片或風扇，以提高散熱效果，而接觸熱阻、擴散熱阻等阻抗因素注通常為人所忽略。然而隨著功能及功率密度大幅提升的同時，熱管理技術的要求越趨嚴苛，因此在元件發熱向外界環境傳遞的路徑中，除了IC元件本身需具備低熱阻，以及利用高效能之散熱組件外，各元件間接連密度的高低以及接合材料熱傳特性的良窳，逐步成為技術再突破的關鍵，新近界面材料的發展即是一例。

本文將介紹熱相變界面材料之原理、特性及應用，期望能使從事電子散熱的相關人員了解此種界面材料之功用，進而做更完善的散熱設計。

關鍵詞

熱界面材料(Thermal Interface Material; TIM)、熱相變材料(Phase Change Material)、接觸熱阻(Contact Resistance)

前言

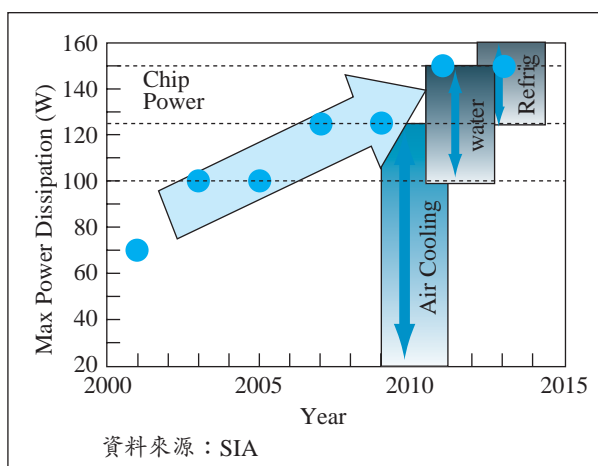
提及電子元件的散熱，常藉助散熱片及風扇的氣冷方式，以提供發熱源與外界空氣間進行熱交換，此法是目前最可靠及成本最低的散熱方式。

在 1985年， $5\text{W}/\text{cm}^2$ 被視為氣冷的極限，然而隨著散熱片、風扇、流場最佳化設計，以及界面材料材料特性的改良與製作，2000年業已達到 $35\text{W}/\text{cm}^2$ ，未來預估到2010年以氣冷模式來冷卻電子元件將可達到 125W ，如

圖一所示。為了達到此一需求，界面材料特性因子的提升就成為一項很關鍵的因素。新近界面材料的技術已朝向相變化材料發展，本文將介紹熱相變界面材料之原理、特性及應用，期望能使從事電子散熱的相關人員了解此種界面材料之功用，進而做更完善的散熱設計。

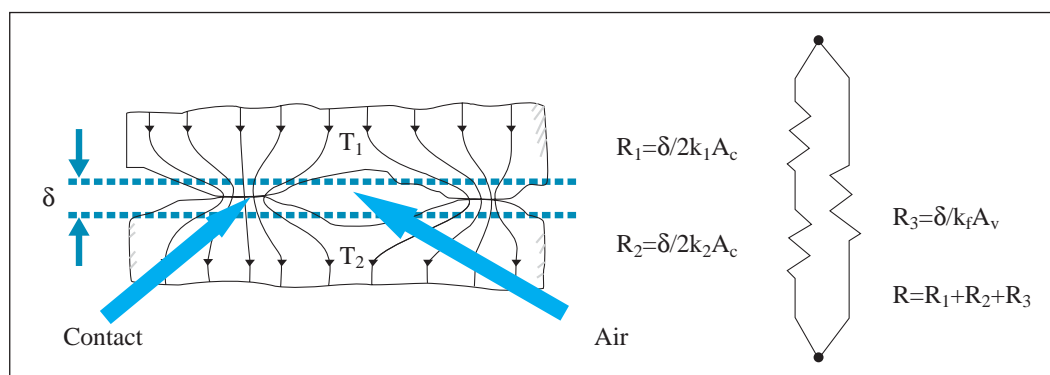
材料特性與原理

熱界面材料(Thermal Interface Material; TIM)顧名思義即是作為兩材



▲圖一 各式冷卻模式散熱限制

料界面間能量傳遞溝通物，此兩相互接合的材料可為同質或異類材料，散熱片透過界面材料附加於電子元件上即是一很好的應用範例。其作用是作為填補兩材料相接合時，由於接合面間並不完全緊密接觸，存在許多微細空隙，空隙中空氣分子基本上為導熱性非常差的傳導介質，因此透過界面材料的附加，期能降低接觸熱阻，圖二與圖三所示分別為兩材料界面間增添TIM前、後之接合狀況及相應之熱阻，其中 R_{c1} 、 R_{c2} 分別為兩接著面與TIM相接著時接著面之接觸熱阻。一般接觸熱阻的成因則發生於當兩物體表面兩相接觸時，熱將通過接觸面，由於表面間接觸並非非常的平整，使得形成一額外的阻抗。界面材料的發展從最初的導熱膏(Thermal Grease)、導熱墊片(Thermal Pad)發展至新近的熱相變導熱片(Phase Change Material Pad)，無非是想提高其傳導特性以減低接觸熱阻的效應。一般常見的界面材料其特性如表一所示。



▲圖二 增添TIM前兩材料界面間之接合狀況及相應之熱阻

一般而言，當熱量通過界面材料時，其熱傳量Q可表示為：

$$Q = kA (T_c - T_{hs}) / L$$

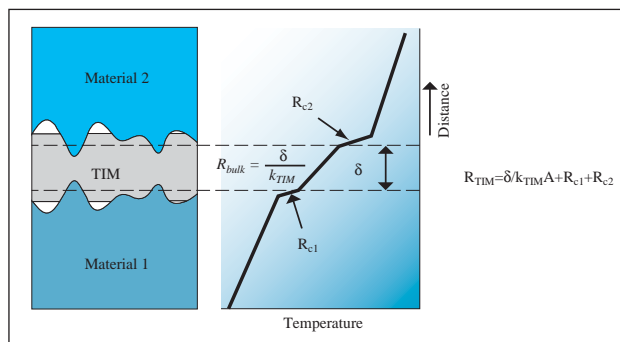
其中 k為界面材料之熱傳導值，A為傳熱面積，L則為厚度， T_c 、 T_{hs} 分別為元件表面及散熱片溫度。其熱阻阻抗則可表示為 R_{c-s} ，

$$R_{c-s} = L / kA$$

$$R_{int} = T_{source} - T_{hs} / Q$$

上述兩公式中可清楚的看出：熱阻值與接合材料厚度成正比，而與熱

傳導值及傳熱面積成反比，所以當厚度越薄及界面間材料熱傳導特性因緊密接合將致使表面積增加，以及因熱傳導值提高致熱阻下降；此外，元件



▲圖三 增添TIM後兩材料界面間之接合狀況及相應之熱阻

表一 各類型界面材料特性

Material	Typical Composition	Advantages	Disadvantages
Thermal Grease	AlN, ZnO, Silicone Oil	<ol style="list-style-type: none"> 1. High Bulk Thermal Conductivity 2. Conform to Surface Irregularity 3. No Cure Needed 4. No Delamination 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Possible Pump out and Phase Separation (Post Reliability Tests) 2. Migration
Adhesives	Ag, Epoxy	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conform to Surface Irregularity before Cure 2. No Pump out 3. No Migration 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cure Process Needed 2. Potential Delamination Post Reliability Tests
Gels	Al, Al ₂ O ₃ , Ag, Silicon olefin	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conform to Surface Irregularity before Cure 2. No Pump out 3. No Migration 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cure Process Needed 2. Lower Thermal Conductivity than Grease 3. Lower Adhesion than Adhesives
Elastomers	BN, Al ₂ O ₃ , Silicone, Urethane Rubber	<ol style="list-style-type: none"> 1. Good Handling Ability 2. High Bulk Conductivity 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Very High Contact Resistance 2. Usually Need High Pressure (>100 psi)
Phase Change Materials	Polyolefin, Epoxy, Low MW Polyester, Acrylic, BN, Al ₂ O ₃	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conform to Surface Irregularity 2. No Cure Needed 3. No Delamination 	Lower Thermal Conductivity than Grease

表面溫度 T_c 與散熱片底座溫度 T_s 愈接近時，界面間的阻抗愈小。一般實際應用的材料表面平坦度與真正平坦間約有 $2\mu\text{m}/\text{mm}$ 的偏差量，這意味著在如CPU等大小的發熱源與散熱片間存在著 $100\mu\text{m}$ 傳熱路徑，越大的散熱片將使其值更為提高。此外，此界面材料若具類似熱相變特性時，其擠壓壓力、熔融時之流變與黏滯性均會影響其傳熱路徑長。

近幾年來材料與封裝技術的發展，使得電子冷卻領域連帶有著長足的進步。在界面材料方面，熱相變材料的引入，為電子散熱注入一股新的活水。所謂的熱相變材料一如其名，即是在常溫時它處於半固態如同 Pad 一般，當溫度提升至相變溫度時（普通約 $40\sim 70^\circ\text{C}$ ），則熔融成液狀態類似 Thermal Grease。其好處在於在室溫組裝時由於特性類似 Pad，所以很容易依據需求尺寸裁切，可直接黏著於散熱片或晶片上方，且因具高黏滯特性而不會像 Grease 般因擠壓而導致外洩、乾化及弄髒組裝者等問題，組裝上極為方便；受熱加溫直至達到特定融化溫度時，材料融化成液態類似 Grease 般，此時將流動填補表面粗糙所形成的空隙，取代間隙間之空氣並降低熱阻，溫度回復常溫時體積量亦能保持穩定。如圖四所示即為常見的熱相變界面材料。

相變材料相態變化的基礎在於材料間相變過程中之吸熱與放熱，一般

為固態與液態間之轉變，此種相變過程相態間轉變，常歸類為潛熱(Latent Heat)能量的轉化，並不需要機械上的控制，此現象可以下式方程式來表示能量的關係式。

$$Q = ma_m\Delta h_m + \int_{T_1}^{T_m} mc_p dT + \int_{T_m}^{T_2} mc_p dT$$

方程式中 Q 表吸收之熱量， a_m 為融化比率， T_1 、 T_2 分別為啓始與最後操作溫度， Δh_m 為潛熱變化。這方程式亦表示出相變材料整體運轉機制間相態轉變的過程，首先第一項為潛熱，而第二項為在融化點溫度以下的顯熱(Sensible Heat)，第三項則為融化點溫度以上的顯熱，表示出從固態吸熱、軟化、熔融擴散的整個過程。

相變材料組成中，一般包括高分子聚合物，如矽(Silicone)、壓克力(Acrylic)、天然橡膠(Natural Rubber)等合適的軟性彈性體材料，以及熔點物質如蠟(Wax)、 C_{12} - C_{16} 醇類、石蠟(Paraffin Wax)等，加以細微顆粒的金屬或陶瓷材料充填物，如 Al_2O_3 、

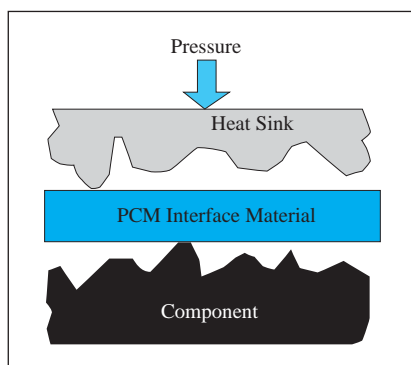


▲圖四 商品化之熱相變界面材料

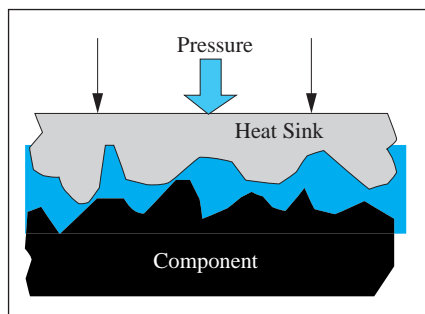
BN、AlN或 ZnO，以強化熱傳性質。現行熱相變材料熱導值普遍落在 0.7~1.5 W/m-K間，一些公司新近研發高導熱的 PCM已接近7~8 W/m-K間。造成熱導率無法提高的原因，主要在於具較佳傳熱特性的金屬或陶瓷材料比率增高時，將使得其黏滯性降低，不利於PCM熔融流動時的控制。最近幾年奈米科技的突飛猛進，促使部分研究正研擬將高導熱的充填材料細微化，以期能控制及強化流變和熱導性，使整體熱導值能提升5~10倍。

運作機制與應用

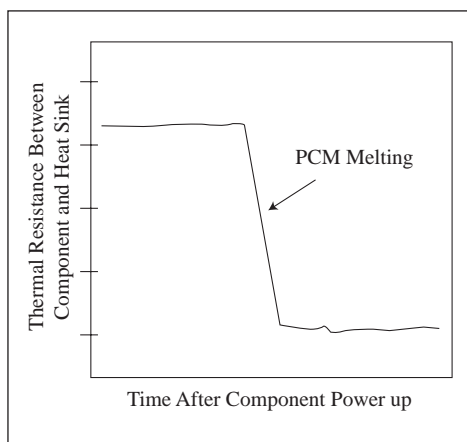
熱相變材料的作動機制及阻值變化分別如圖五~圖七所示。在剛接著未完全施加作用時，由於接觸表面間仍有空氣，材料間能量的傳遞屬點接觸，接觸表面積小，所以其熱阻值仍高。但當其溫度達到其熔融特性點時，此時則融化流動至各空隙間，接觸傳熱面擴大，加上熔融物質適時推擠填補空隙，阻值降低接近Grease特性。當作用於元件之電源關閉時，材料慢慢回復成固態狀，雖然形狀不再回復當初黏貼時狀態，但卻已填補這些空隙位置，若溫度再行增加時，將再度使其融化，整個作動過程體積量不因反覆的熔融、固化而改變。圖八為熱相變材料與導熱膏(Grease)及導熱墊片(Thermal Pad)材料特性間的比較，由圖中可很清楚的看出Grease、Thermal Pad 於短時間即達到熱平衡，



▲圖五 PCM於剛黏著於發熱元件與散熱片間未施力之情形



▲圖六 達到融化點後PCM作用之狀況



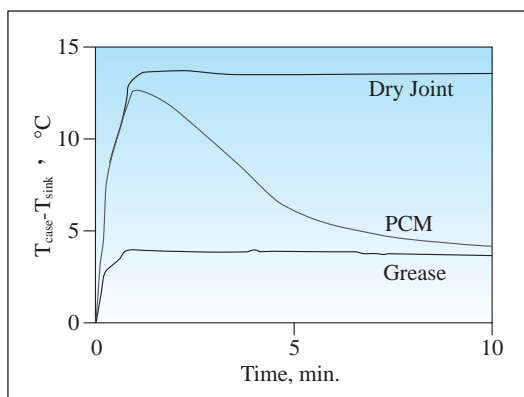
▲圖七 PCM在發熱元件與散熱片間作用前與作用後熱阻變化情形

熱相變材料先經歷一段如Thermal Pad溫度變化的歷程，而後趨近 Grease特性，兩接著面間溫差小、阻抗降低、傳熱性提高。由上述作動機制可看出，熱相變材料化性本質上並沒變化，只是它的黏滯性在改變。

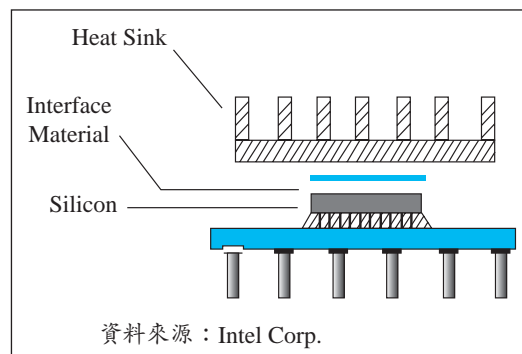
熱相變材料近幾年已廣泛應用於電子冷卻中，目前隨著IC特性趨向高速且多功能之際，也常見應用於CPU等元件。以覆晶封裝如FC-PGA及FC-BGA為例，封裝內部中的晶片與均熱片(Heat Spreader)接合，及封裝外部中的晶片與散熱片接合，分別如圖九、圖十所示，均已導入PCM材料的使用，而構裝應用模式主要是依據發熱功率的大小為設計準則。當IC發熱功率較小時，界面材料可直接應用於覆晶上方，作為承接發熱元件與散熱片的接著物；而當IC發熱功率大時，則需在晶片上方再附加均熱片，此時兩層的界面材料其熱傳特性就顯得非常

重要，相變化材料的採用可增進散熱效能。

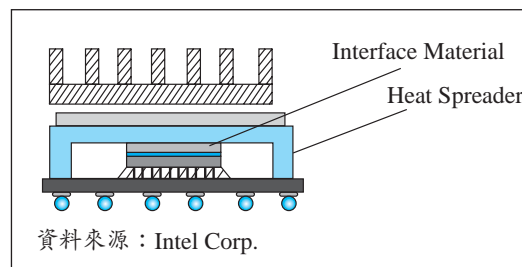
界面材料的開發除了本身的熱傳特性之外，由於其需長期高低溫反覆使用，應用時的環境及溫度熱循環可靠度等條件的測試也極為重要，一些研究已針對其效應進行研究，包含不同應用場合之實驗與模擬。一般而言，由於熱相變材料應用時，需反覆經歷融化、固化、熔融、再固化之過程，因此製作開發時常需進行熱循環測試驗證，以確保其可靠度，表二為一些開發中 PCM所進行性能測試的測試環境與條件。



▲圖八 PCM作動時界面間溫差變化情形



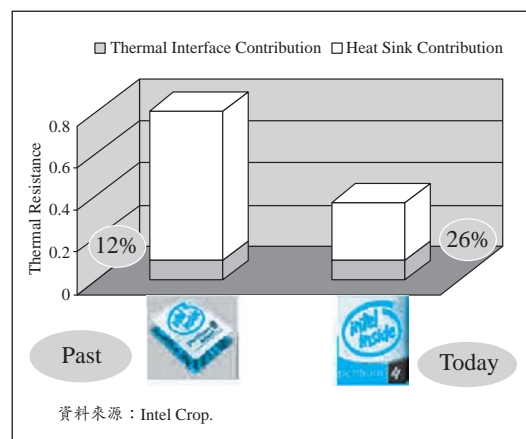
▲圖九 PCM應用於低功率(<30W)發熱元件之情形



▲圖十 PCM應用於高功率(>30W)發熱元件之情形

表二 PCM性能測試環境與條件

Temperature Range	Material Form	Test
Room temperature	any	Observation, viscosity tests
260°C thermal Shock 10 cycles (2 minutes each)	bulk	Color change comparison, visual
150°C in open jars for a month	bulk	Steady rate sweep and frequency sweep test @90°C
120°C for 2 days	sheet (~200µm)	TGA in air flow 5 ml/min
20-90°C test cycles	Al mesh embedded sheet (150µm)	300 test cycles in simulated microprocessor during 65 hours



▲圖十一 熱界面材料(TIM)於改善熱阻角色之變化

展望

元件發熱功率如攀爬樓梯般向上攀升，卻也促使電子散熱技術的開發邁入另一新的領域。以界面材料而言，一些過往應用於其他領域的技術被重新賦予新的生命，熱相變材料即是一很好的範例。熱相變材料的應用一如 Intel在其技術期刊中所提的，在新興封裝技術中熱界面材料(TIM)未來將扮演極其吃重的角色，如圖十一所

示，過去在 Pentium II 整體熱阻中其所佔的比率約12%，現今Pentium IV已提升至26%，未來如 CPU等相關元件熱通量越趨提高之際，其所佔比重也將更形提高。此外，近幾年來界面材料之應用市場年成長率呈40%快速成長，已廣泛應用於各類型電子散熱組裝工業上。在奈米技術發展的引領下，未來幾年，我們可預知界面材料結合奈米技術的發展，將可能帶領其性能特性提升 5~10倍。

參考文獻

1. Miksa de Sorgo, "Thermal interface materials," Electronics Cooling, Vol. 2, No. 3, September 1996.
2. Miksa de Sorgo, "Understanding Phase Change Materials," Electronics Cooling, Vol.8, No.2, May 2002.
3. Paul Gauche and Sarang Shidore, "Thermal performance of a microprocessor using phase change materials in various configurations," IMAPS Boston, 2000.
4. D. Pinjala and Navas Khan, etc., "Thermal Design of Heat Spreader and Analysis of Thermal Interface Materials (TIM) for Multi-Chip Package," 2002 Electronic Components and Technology Conference, pp. 1119-1123, 2002.
5. Ravi Mahajan, Chia-Pin Chiu, and Ravi Prasher, "Thermal Interface Materials: A Brief Review of Design Characteristics and Materials," Electronics Cooling, Vol.10, No.1, May 2004.