

熱電於再生能源之運用

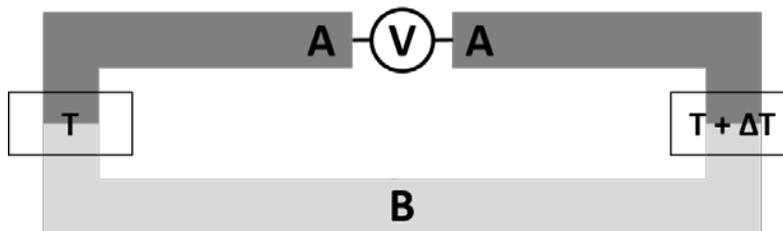
陳洋元 陳正龍

中央研究院物理研究所

熱電材料的研究過去十年來蓬勃發展，這要歸因於能源危機與溫室效應兩世紀大事件，由這些事件人類發現已不能再無止盡的依賴長期使用的石化能源，取而代之的是發展再生能源。在諸多發展再生能源的研究中，因熱電材料具有熱電互相轉換功能，因此有了運用熱電材料將廢熱或再生能源轉換成電力的方案。以下將對熱電材料的發現，物理機制，與再生能源的運用作壹說明。

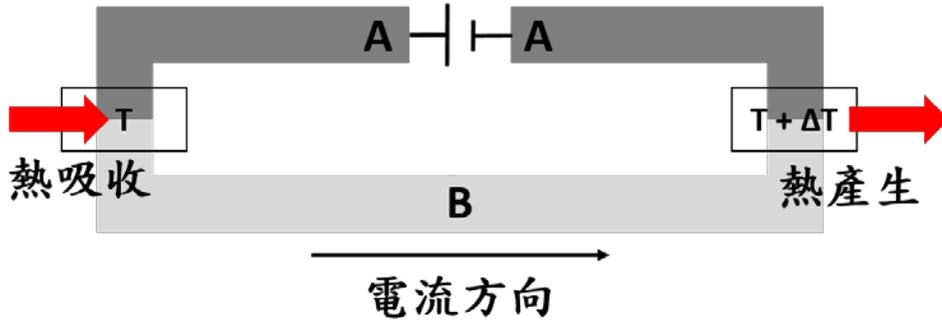
熱電之發現:

西貝克效應(Seebeck effect): 1821 年西貝克(Thomas Seebeck) 發現當兩個不同的材料相連接，且在兩連接處存有溫度差時，會使線圈下的羅盤旋轉，於是發現材料中有電流產生並因安培定律使羅盤轉向(圖一)，此現象稱西貝克效應。西貝克效應產生之電壓可以公式 $S = \Delta V / \Delta T$ 表示之， S 稱為西貝克係數， ΔV 為電壓差， ΔT 為溫度差(單位:K)，換句話說西貝克係數 S 代表一個熱電材料在兩端溫度每差一度產生之電壓，單位為電壓/溫度。可應用西貝克效應將熱轉成電，西貝克係數越大發的電也越大。



圖一、西貝克效應示意圖

皮爾特效應(Peltier effect): 1834 年皮爾特(Jean Charles Peltier)發現，當兩個不同材料相連後並通過電流時，在兩接點處分別會有吸熱及放熱反應(圖二)，此現象稱為皮爾特效應，而此效應可運用在熱電致冷器或冰箱上。



圖二、皮爾特效應示意圖

湯姆森效應(Thomson effect): 1855 年威廉·湯姆森(William Thomson)發現西貝效應與及皮爾效特效應之關聯性，其關係式為： $\Pi_{ab} = T S_{ab}$ ，此效應被稱之為熱電第三效應(third thermoelectric effect)亦稱之為湯姆森效應。

熱電優質係數(thermoelectric figure of merit): 1909-1911 年阿爾騰基希(Edmund Altenkirch)導證出熱電發電機及熱電致冷器的效率公式，稱熱電優質係數，其公式為：

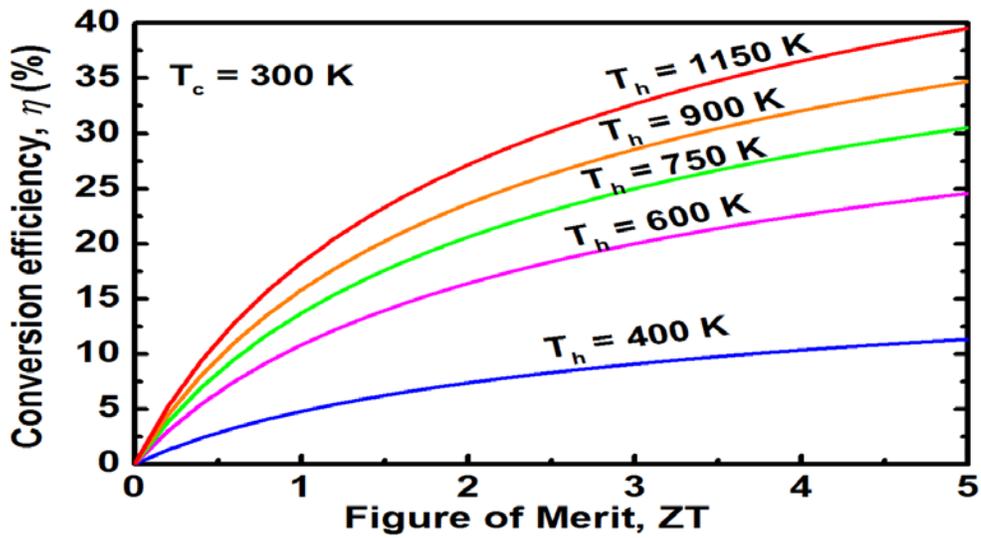
$$ZT \equiv \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T \quad (1)$$

其中 S 為西貝克係數、 σ 為電導率(單位: S/m)、 κ 為熱傳導率(單位: W/m-K)而 T 為絕對溫度。熱電優質係數 ZT 越大的材料其熱電轉換效率越高，此關係式說明一個好的熱電材料需要高的西貝克係數，低的電阻率和熱傳導率。熱傳導率包含載子熱傳導率 κ_e (載子可為電子或電洞)和聲子的熱傳導率 κ_L ，因此熱傳導率可寫成

$$\kappa = \kappa_e + \kappa_L。$$

熱電材料的熱-電轉換效率可由以下公式推出，可看出熱-電轉換效率隨 ZT 值增大而變大(圖三)。 $\frac{T_h - T_c}{T_c}$ 為卡諾熱機的公式，因此即使 $ZT = \infty$ 熱-電轉換效率最大值即是卡諾熱機的上限。

$$\eta_{\max} = \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}} \left(\frac{T_h - T_c}{T_h} \right) = \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}} \eta_{\text{Carnot}} \quad (2)$$



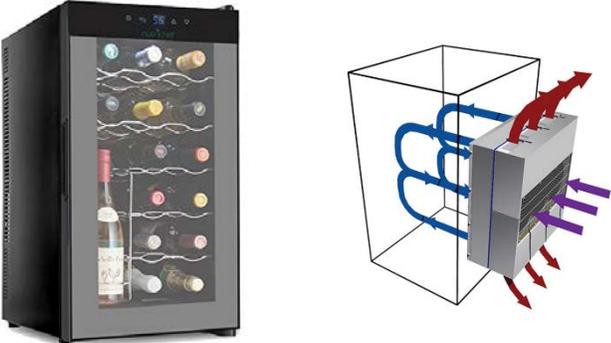
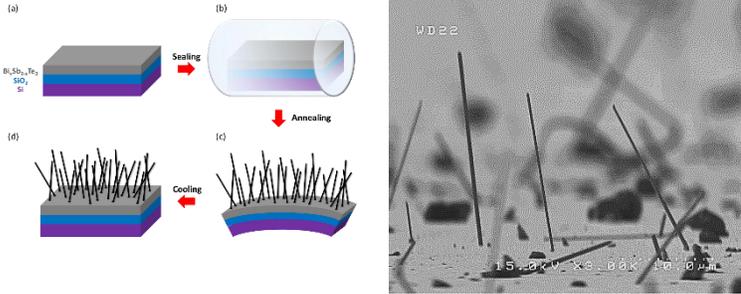
圖三、在不同熱端溫度(T_h)與 ZT 條件下所對應的熱電材料之轉換效率 (η)

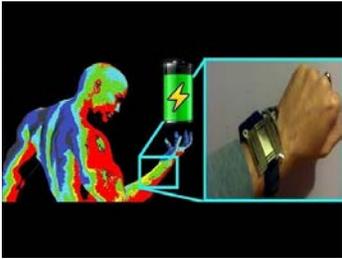
熱電材料:導電的金屬和半導體都有熱電效應，熱電優質係數 ZT 值越高才是好的熱電材料，也就是熱-電轉換效率高。一般金屬雖有很好的導電率但西貝克係數均偏小，惟能同時滿足高西貝克係數，高導電率和低熱傳導率的條件，多為半導體材料，如下表(室溫約略值)。

材料	材料	導電率 (S/m)	西貝克係數 ($\mu\text{V}/\text{K}$)
金屬元素	Au	4.1×10^7	1.7
	Cr	7.9×10^6	18
半導體	Si	1000	400
	Se	8.3×10^6	900
半導體化合物	P-type $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_3$	5×10^4	185
	N-type $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$	1×10^5	-230

熱電材料發展記事:

年代	原創者	事件
1910 年	維爾納·哈肯 (Werner Haken)	並發現碲化銻(Sb_2Te_3)，碲化鉍(Bi_2Te_3)， $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ ，碲化錫(SnTe)及銅鎳合金(Cu-Ni)皆是非常有潛力的熱電材料。
1928 年	阿諾德·歐肯 (Arnold Eucken)	發現當熱電材料中含有點缺陷時可大幅抑制晶格的熱傳導，自此之後降低晶格熱傳導成為提升熱電性質非常重要的策略。
1928 年	俄國物理學家·約費(Abram Ioffe)	為了更貼切形容熱電能源轉換效率，開始發展半導體物理理論，此理論開啟對於熱電材料設計的知識。有較高的熱電優質居多是重摻雜的半導體(heavily doped semiconductors)，並提出在熱電材料中引入點缺陷來降低熱傳導率以提升熱電性質，伴隨著此理論的發展，熱電材料得以引起各界學者的興趣。
1930 年		第一個利用熱電材料提供能源的收音機問世。
1947 年	泰柯斯 (Maria Telkes)	建立第一個效率達 5%的熱電發電機。
1954 年	葛史密斯 (Julian Goldsmid) 及道格拉斯(Douglas)	成功利用碲化鉍熱電致冷器使冷端達到 0°C 。
1959 年	西屋公司 (Westinghouse)	研發了一個以碲化鉍為基材的熱電致冷冰箱，並將其改良為存放酒品的小冰箱後商品普遍存在每個家庭中。

		 <p>熱電冰箱與示意圖</p> <p>https://itsfinetowine.com/best-wine-coolers</p>
1959 年	美國前總統艾森豪威爾 (Dwight D. Eisenhower)	宣佈第一個放射性熱電發電機 (radioactive thermoelectric generator; RTG) 問世，兩年後將此放射性熱電發電機成功應用到太空船上及衛星導航上。
1950-1960 年		因為熱電材料的進步緩慢，因此在這十年間有關熱電材料的發展逐漸趨緩。
1977 年	國家航空暨太空總署 (NASA)	以矽鍺化合物之熱電材料做為航海家一號及二號 (Voyager 1 and 2) 的動力來源。當人類要探索比火星更遠離太陽的行星時，由於太陽能已大幅減弱因此不足以驅動太空船上的太陽能板，因此必須以其他能源替代，此時熱電材料+放射性元素作為熱源製作出來的發電機便是唯一的選擇。
1993 年	美國麻省理工機械系教授希克斯 (Hicks) 及德雷斯爾豪斯 (Dresselhaus)	發表奈米科技將可大幅提升熱電轉換效率，開創熱電材料發展的新頁，如圖為奈米線 (nanowire) 熱電材料。  <p>陳洋元實驗室製備的直徑 150 nm 的 Bi-Te 奈米線</p>

1995 年	斯 萊 克 (Glen Slack)	提出”聲子玻璃電子晶體(phonon glass electron crystals)”的概念，說明聲子行為必須如同玻璃相而材料之電性如同晶體。
1995 年	保時捷(Porsche)公司	首先研究應用在汽車上的鐵矽(iron silicide)熱電材料，隨後約翰·費爾班克(John Fairbanks)開創熱電材料在汽車引擎上的應用。
1998 年	日本精工(Seiko)鐘錶製造商	，利用碲化鉍為基材，製作第一支以體溫為能源的熱電錶，其溫度梯度即為人體體溫及周遭環境溫度。除上述之塊材熱電材料。 
2001 年	美國三角研究所 (Research Triangle Institute; RTI)	研發出第一個含奈米結構的熱電超晶格薄膜，此研究達成了前所未及的高熱電效率($ZT \sim 2.4$)，並開啟了奈米結構熱電材料的研究熱潮。
2004 年	美國能源部(DOE)結合各大公司	開創一個應用在汽車上的熱電材料之計劃，開啟全世界對於熱電材料的研究風潮，同時美國能源部與柏克萊大學合作，創立一致力於奈米結構熱電材料研究的 Alphabet Energy 公司。

From Seiko thermoelectric watch website

2013 年		<p>航海家一號成為史上第一個在太陽系中存在 36 年，並且在這 36 年中皆以熱電材料提供動力，近一步證實熱電材料的可靠度。</p>  <p>https://voyager.jpl.nasa.gov/</p>
2014 年	Alphabet Energy 公司	創造第一個應用在工業上回收廢熱的儀器-E1，其為史上最大電輸出的熱電發電機。

提升熱電材料效率的策略：

1. 調控功率因子 $S^2\sigma$:

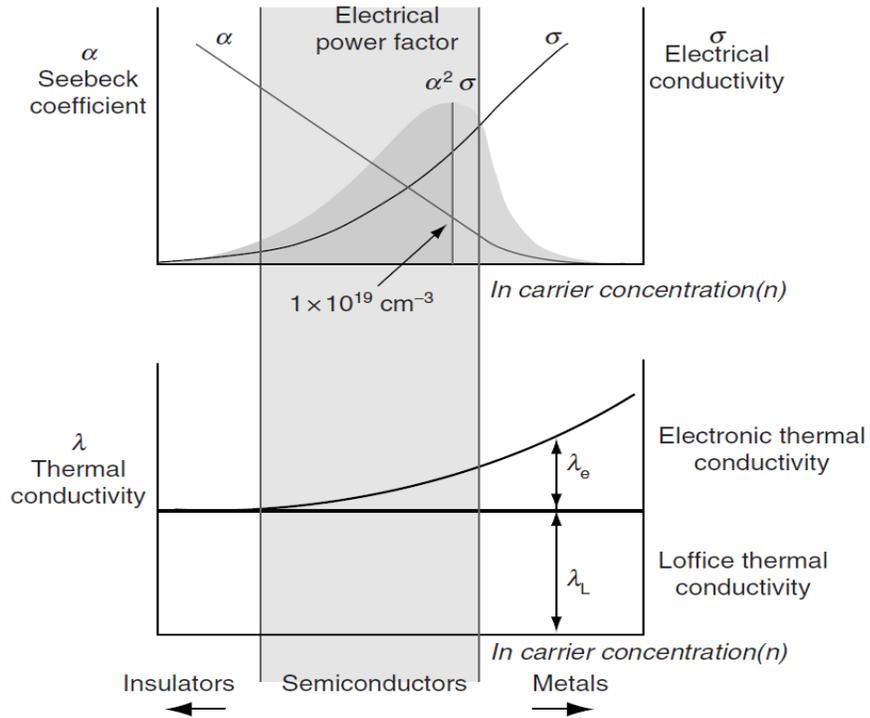
導電率 σ 可由下列公式表示

$$\sigma = ne\mu \quad (3)$$

西貝克係數由下列公式表示，

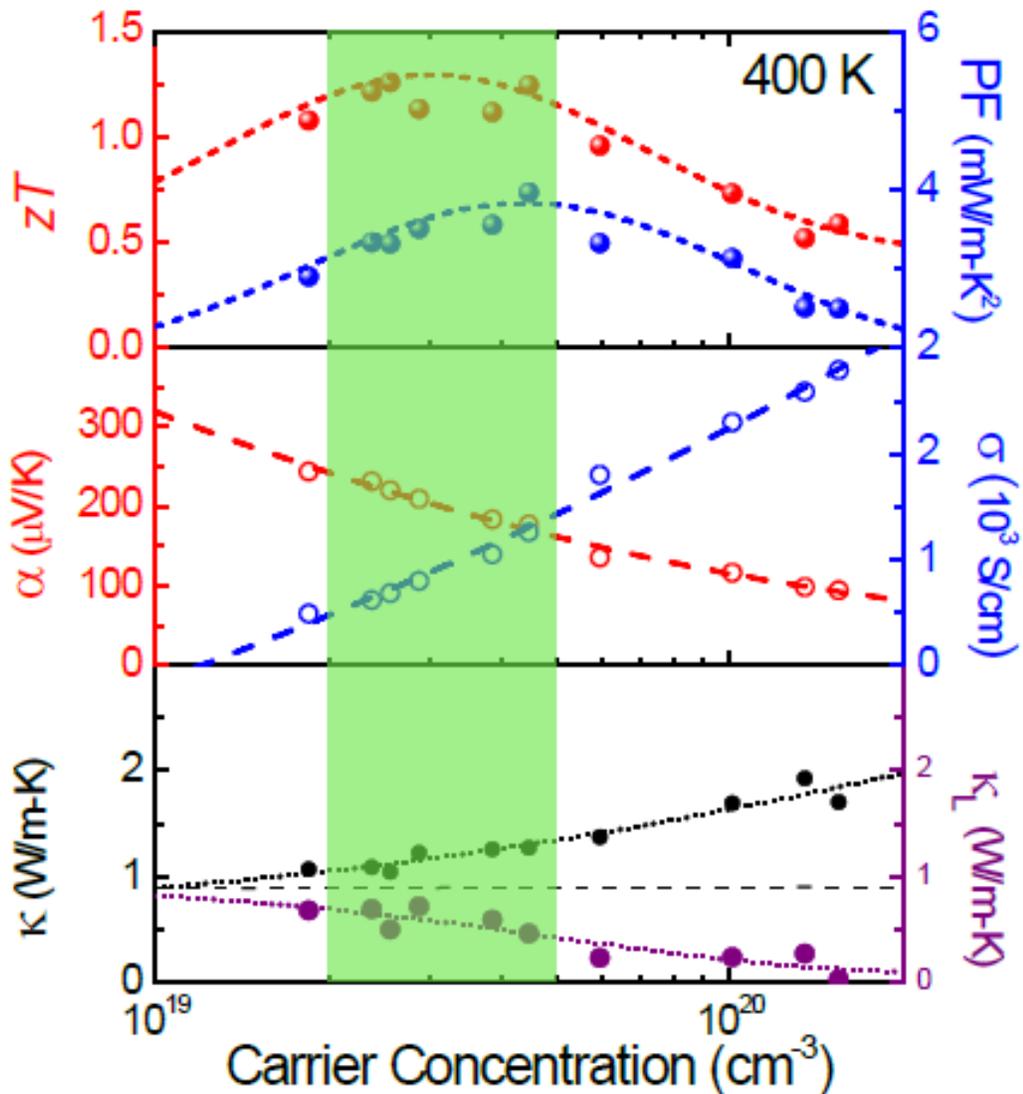
$$S = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left(\frac{1}{\sigma(E)} \frac{\partial \sigma(E)}{\partial E} \right)_{E=E_F} \quad (4)$$

剛好與導電率 σ 成反比關係，因此增加其中一項便降低另一項，有趣的是在優質係數 $ZT = S^2\sigma T / \kappa$ 公式中， ZT 正比於分子 $S^2\sigma$ ，我們稱之為功率因子 (power factor)，其與載子濃度的關係如圖四所示。圖中之西貝克係數以 α 為代表，顯然調整載子濃度(亦即導電率)，可使功率因子 $S^2\sigma$ 達到最大值，有利於提升 ZT 值。



圖四、西貝克係數、導電率、功率因子與熱傳導系數與材料之載子濃度關係圖。
 (取材於 THERMOELECTRICS HANDBOOKS—MACRO TO NANO, edited by D. M. Rowe)

舉一典型的例子， $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ ，其理想的載子濃度約 2×10^{19} ，摻雜 Cu 可增加其載子濃度到 2×10^{19} 使功率因子 $S^2\sigma$ ，達到最大值，如圖五，使 ZT 從 1.1 增加 1.25。

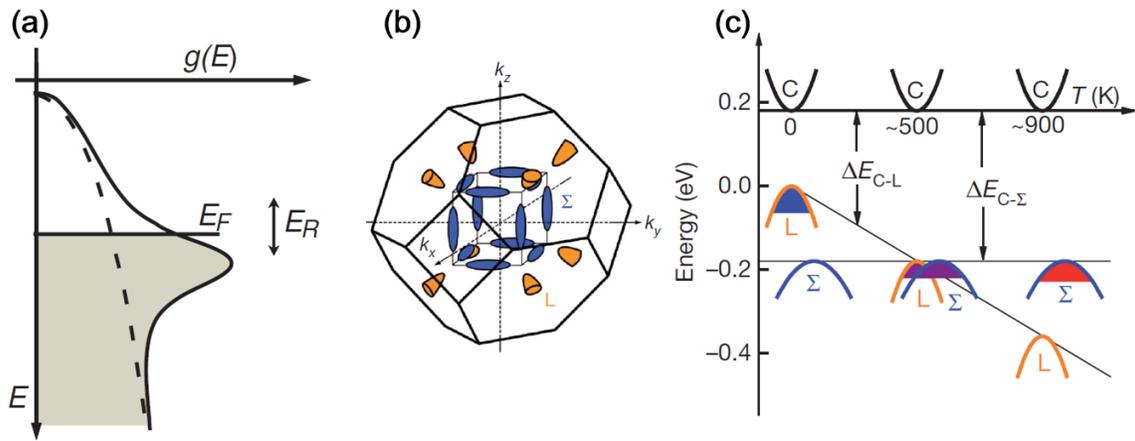


圖五、實驗數據從右到左 Cu 摻雜為 $x=0, 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.08, 0.1$ 。

2. 增加西貝克係數:

一般而言，材料的電傳導與西貝克係數 (Seebeck coefficient) 有著相互影響的關係，其中一個變好，另一個則變差，因此如能增加西貝克係數，而不影響導電率只能在能帶修飾動手腳。尤其西貝克係數對功率因子(power factor)的貢獻是平方的乘積。依近幾年的發展趨勢，摻雜特定幾種化學元素到窄能隙硫族半導體化合物材料系統中時，是有機會在其費米能階附近產生共振態 (resonant states)，並導致該材料中費

米能階附近的能量態密度變形，如圖六所示。理論上，若能階附近的能量態密度對能量的微分有顯著變化的話，材料的西貝克係數便可有效提高，如以上公式(4)所示。此設計概念雖亟具發展潛力，但以目前摻雜到 PbTe 塊材中成功的元素只有「鉍」，如何進一步找到較無毒的新化學元素作能態密度的改質，尚需更多理論計算與實驗的努力。更值得一提的是，「鈉」元素摻雜在 PbTe 中雖然已被證實不會在費米能階附近產生共振態，但是若「鈉」的摻雜濃度極高的話，是可以有效提升 PbTe 的 ZT 值。根據美國施奈德教授(G. Jeffrey Snyder)的實驗結果發現，PbTe 材料中具有輕電洞(light-hole, L)與重電洞 (heavy-hole, Σ) 這兩種價帶的共存。若材料中的載子濃度較低時，載子的傳輸性質主要受到輕電洞能帶的影響；若能控制材料的載子濃度高過特定值時，重電洞能帶在熱電傳輸性質上將扮演重要的角色。另外，研究也發現，能帶結構的位置也和溫度極相關。隨著溫度升高，該材料的輕電洞能帶會逐漸與重電洞能帶收斂(convergence)，並促使載子分佈到這兩種能帶，進而使得材料的電導與西貝克係數同時提升，其在 850 K 的 ZT 值可高達 1.8。這個嶄新的概念，更是目前熱電材料研究的一大主流。



圖六、(a) $(\text{Tl}_x\text{Pb}_{1-x})\text{Te}$ 的費米能階附近產生共振態示意圖，(b) PbTe 的布里淵區，(c) PbTe 能帶結構中的輕、重雙電洞能帶隨溫度升高而收斂的示意圖。(圖a取材於 *Science*, 321, 554 (2008); 圖b,c取材於 *Nature*, 473, 66 (2011))

3. 降低熱傳導率:

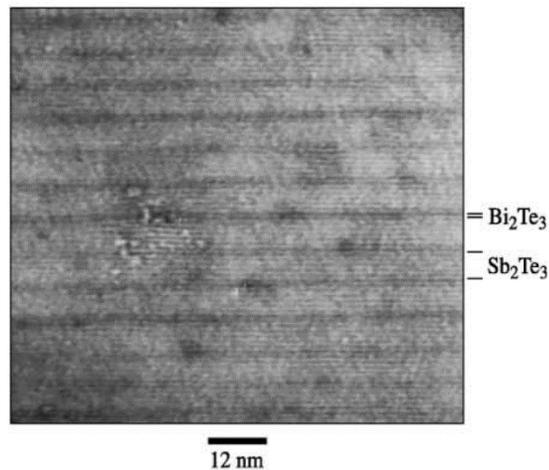
由公式 $ZT \equiv \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T$ 提升了功率因子 $S^2 \sigma$ ，再來就是降低導熱係數 κ ，使 ZT 進一步的提升。因 $\kappa = \kappa_e + \kappa_L$ ，當導電率 σ 固定，因 Wiedemann-Franz Law

$$\frac{\kappa_e}{\sigma} = L_0 T$$

κ_e 值即被固定，因此欲降低導熱係數，就僅能從降低聲子熱傳導率 κ_L 著手。此策略因 1990 年代奈米科技之發展，利用奈米結構、複雜晶體結構的引入能使聲子熱傳導率 κ_L 顯著的降低。以下列出幾個降低聲子熱傳導率 κ_L 的方法。

(1) 超晶格(Superlattice)

超晶格是由不同材料依週期性的交替堆疊所組成的結構，界面處的晶格不匹配、界面的電子電位差以及由此產生的聲子和電子界面的散射與能帶改質都可用來降低聲子的熱傳導，同時維持或增強電子傳輸(圖七)。M. S. Dresselhaus 首先提出利用超晶格通過提高電子電導率和降低聲子熱傳導率來改善熱電優質係數 ZT 的概念，隨後更發表了有關量子尺寸對電子的影響，引起了廣泛關注並激發了有關量子井和超晶格的熱電性質的理論和實驗方面的深入研究。過去幾年來，已有幾個研究團隊報導了數種能有效增強 ZT 的超晶格材料，如 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 超晶格薄膜和 $\text{PbSeTe}/\text{PbTe}$ 量子點超晶格等。因超晶格結構能有效達成聲子阻擋/電子傳輸通過等優良特性，使得材料的晶格熱傳導係數有機會降到非常接近非晶態的最小值，因而造就目前 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 超晶格薄膜的 ZT 值可高達 2.4 [Venkatasubramanian *et al*]，這是使用傳統的物理方法所無法達到的境界。

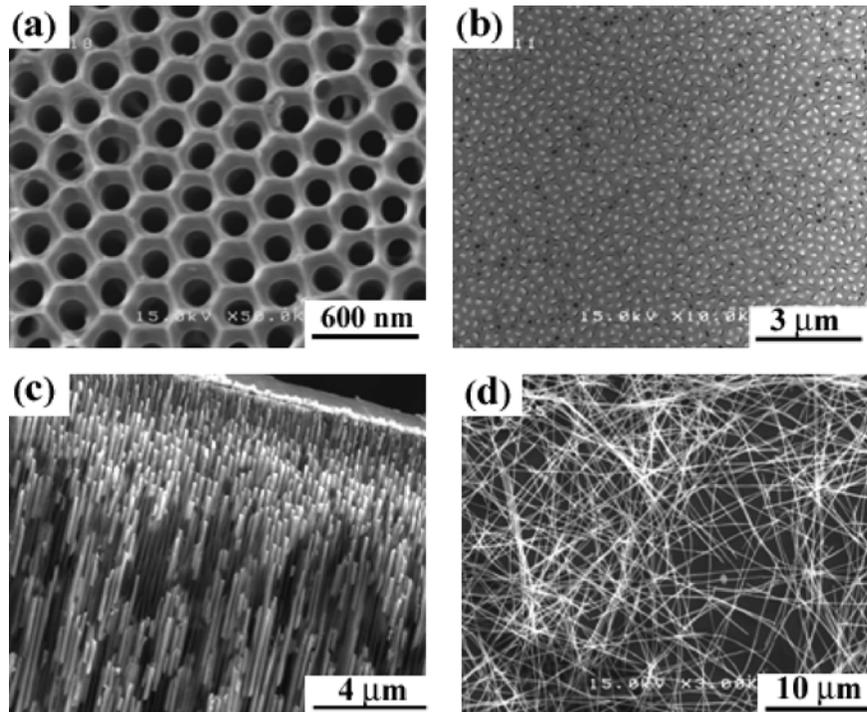


圖七、Bi₂Te₃ / Sb₂Te₃超晶格薄膜的穿透式電子顯微鏡影像。

(圖片取材於: MRS Bulletin, 31, 211 (2006))

(2) 奈米線(Nanowire)

根據 Dresselhaus 的理論預測，認為材料的西貝克系數與費米能位之電子密度關係密切，電子密度大則西貝克系數也大。因此，若能將材料奈米化以提高費米能位上之電子密度，其將有助於熱電效能的提升。2002 年，Heremans 研究團隊已在實驗上觀察到在氧化鋁及二氧化矽多孔隙材料中的9 nm及15 nm 的鈹奈米線，其西貝克系數都有非常顯著的增加。另外，美國柏克萊大學化學系的楊培東教授的研究團隊則藉由改變矽奈米線的尺寸及表面的粗糙度後，大幅降低矽奈米線的熱傳導率，使得 ZT 值在室溫附近可達到~0.6，比矽的塊材足足大了將近 100 倍之多。於此同時，本研究團隊則選定室溫附近最好的塊材熱電材料，碲化鈹(Bi₂Te₃， ZT~1)，做為研究對象(圖八)。研究方法為利用電化學沈積技術將碲化鈹奈米線陣列成長在自製的三氧化二鋁孔洞模板內，經一系列的結構鑑定與成份分析，發現這些奈米線主要沿著[110]方向成長，且具有極佳的結晶性，屬於碲稍微偏多的N型碲化鈹奈米線。量測結果發現，功率因子 ($\sigma S^2 \sim 1000 \mu\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}^2$) 比塊材值小，惟奈米線的熱傳導值(0.75 W/m-K)約為是塊材的1/3，推測聲子在奈米線中的傳遞過程受到更多的散射，因而降低其熱傳導率。綜合這些參數可得到奈米線的最大優質係數 ZT 在室溫大於0.9，若量測的溫度有機會到更高溫的話，高溫的ZT值應該有機會更高。

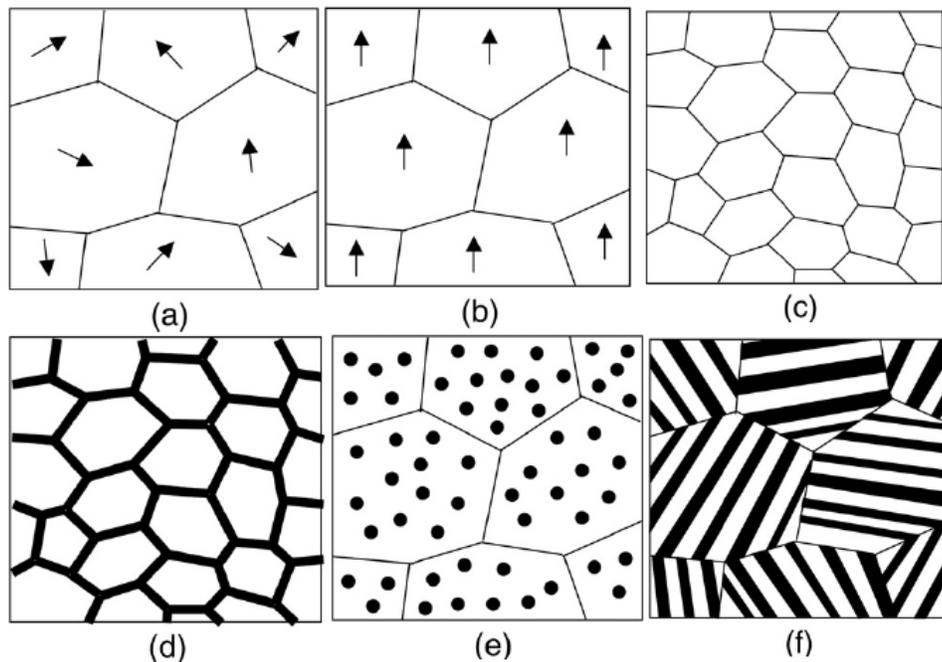


圖八、 Bi_2Te_3 奈米線。(C.L. Chen et al *J. Phys. Chem. C* **114**, 3385 (2010))

(3) 火花電漿燒結技術(Spark plasma sintering)

根據近幾年的研究結果可發現，材料中的奈米結構對熱電傳輸性質有巨大的影響。美國麻省理工學院的陳剛教授研究團隊於 2008 年在 *Science* 期刊首先發表 $ZT \sim 1.4$ 的 BiSbTe 奈米結構塊材，證實奈米結構能有效散射聲子的傳遞且不太影響電性傳輸，使得這類材料的熱電優值係數突破過去幾十年來的記錄。一般而言，材料中的晶粒小到一定尺寸時就會產生新的界面，這些界面上的局部原子排列有別於一般均質晶體的長程有序狀態，因此界面的結構匹配、化學組成及型式對於電子或聲子的散射機制影響是非常重要的。如果材料結構中的界面能有效地對聲子產生散射而不太影響到載子的特性，則此界面將有利於提升 ZT 值。圖九列舉幾種晶界與界面微結構示意圖，分別為 (a) 多晶微結構; (b) 晶粒結構的優選排列方向是適合傳輸的方向; (c) 晶粒縮小並有利於界面聲子的散射; (d) 晶界上有一層薄薄的包覆物或差排產生;

(e)奈米顆粒嵌在晶粒中; (f)形成層狀奈米結構。關於這些微結構的設計與目的，可從底下三個方向做討論。第一，控制晶體織構。許多高性能熱電材料都具有獨特的層狀結構，使得熱傳導及電性都有明顯的異向性。若能控制材料中的結晶織構朝著有利於熱電傳輸的方向排列是很重要的。目前實驗上最簡單的方法就是將材料的粉末在燒結的過程中利用機械式熱壓排列，當這些粉末具有晶體結構異向性時，其各自的晶粒在高壓熱壓下將會沿著特定方向排列並形成很堅固的織構微結構。第二，晶界的聲子散射已被證實對於降低熱傳導有很大的貢獻。材料結構中的晶粒越小，產生的晶界越多，將有利於中低頻聲子的散射。若要達到不影響電性的話，孿晶界或疇壁晶界 (twin or domain boundaries) 的引入是比較機會達成的， $(\text{GeTe})_{85}(\text{AgSbTe}_2)_{15}$ 合金材料便是個例子。第三，晶界面的修飾與晶界內的奈米結構設計。最新研究指出，晶界面上若形成薄薄差排缺陷結構的話，對於中高频聲子的散射非常有幫助。至於晶界內形成的點缺陷結構則有利於高频聲子的散射。目前這些概念主要用在奈米複合材料的製備上，電子與聲子在這些複雜的界面散射機制研究，都還只是在初始階段。



圖九、材料中的各種晶界與界面微結構示意圖。

(該圖取材於: Curr. Opin Colloid Interface Sci. 14, 226 (2009))

一般在製備奈米結構塊材時，使用火花電漿燒結技術(Spark plasma sintering)可將奈米級的顆粒燒結成塊材，並保有對熱電傳輸性質有利的奈米結構。中央研究院物理所是全台最先引入該機器設備的單位，如圖九所示。目前在大部份的高效能熱電材料的製備扮演極關鍵的角色。簡單而言，SPS 燒結過程中，會施加大壓力與高電流予受壓粉體，並依燒結材料的不同而做燒結溫度、燒結時間與壓力的調整。整過熱壓過程可於數分鐘內完成。因此在大量製備奈米結構塊材作為發電模組使用，非常具有商業應用價值。



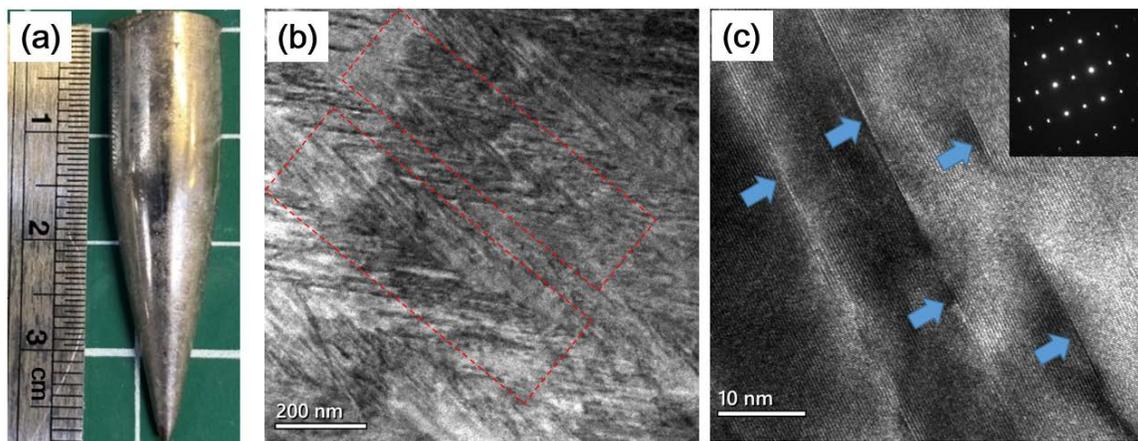
圖九、使用火花電漿燒結技術製備奈米結構塊材的流程。

(5) GeTe 單晶的 Anharmonicity

GeTe 是近幾年極受矚目的中溫區熱電材料，高大的 ZT 值可高達 2.4，未來極具有產業應用潛力。低溫鐵電 GeT 是菱面體結構 (R-GeTe)，其在 ≈ 700 K 時發生結構相轉變成立方相 (C-GeTe)。由於 C-GeTe 展現出極佳的熱電性能，因此降低了相轉變溫度可以在較寬的溫度範圍內增強熱電性能。研究發現，由於銻空位的形成能量低，使得 GeTe 的載子濃度高達 10^{21} cm^{-3} ，屬於高度退化的 P 型半導體材料。因此，若要提升 GeTe 的熱電性能，通常必須藉由摻雜適當原子，如 Sb, Bi, Pb 來抑

制空缺的形成，進而降低載子濃度至最理想範圍。從能帶結構來看，GeTe 與硫族化合物一樣具有多個價帶參與電性傳輸，使得它也能藉由能帶改質工程進一步提高功率因子。此外當 GeTe 相轉變為 C-GeTe 岩鹽結構(Rocksalt-like)時，會產生共振鍵結(Resonant Bonding)，造成此化合物與其他材料相比具有很低的晶格熱傳導係數。綜合上述結構相變、高載子濃度、多個價帶和共振鍵結等特性，對於改善 GeTe 的熱電性能研究提供了多種思考自由度。

回顧所有 GeTe 的文獻可發現，所有的 GeTe 材料都是利用熱壓方式製備而成的多晶材料，雖然 ZT 已有不錯的表現，但究竟還缺乏單晶 GeTe 的相關熱電性質。本研究團隊在中研院物理所架設了一組布理奇曼長晶系統(Bridgman)，利用該長晶法生長了一系列 Sb 摻雜的 GeTe 單晶體樣品，我們更發現 Bridgman 生長的這些晶體的 ZT 值可高達 2.1。圖十(a)為 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Te}$ 晶體。單晶樣品除了比多晶樣品有比較優越的電性外，我們更發現 Sb 摻雜會在材料內部製造一些有趣的奈米結構(圖十 b-c)，例如，魚骨頭狀的晶格區、晶界、平行排列的空缺層與疊層缺陷等奈米級的缺陷結構。這些自然形成的缺陷非常有利於增加聲子散射以降低熱傳導。同時，我們也已著手於這類材料的冷中子散射實驗，更發現聲子軟化的證據，對於解釋 GeTe 熱電性能提升提供了非常有利的證據。



圖十、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Te}$ 單晶材料: (a) 晶體樣貌，(b) 魚骨頭狀的晶格區，(c) 平行排列的空缺層。

結論：熱電材料的研究過去十年來蓬勃發展，無論在基礎科學或應用工程都有長足的發展。由於它利用廢熱發電的特質使它成為一個非常有潛力的再生能源明星。熱電發電模組無壓縮機所需要的機械零件、冷媒，無噪音又環保，體積小精緻耐用壽命長，尤其它輕薄小巧更是適合發展微小溫差發電供隨身電子用品使用。物理所多年前即投入「熱電自充隨身發電」的相關研究，以熱電自充隨身電源做為消費性電子產品的輔助電源，可適時的提供低耗能的 3C 產品如手機及戶外感測器進行電源補充及充電（圖十一）。未來在穿戴式電子產品、生醫產業、AIoT 及 5G 智慧網等產業，皆可仰賴熱電自充隨身電源發揮其從環境或廢熱中擷取熱能轉換成電力的功能，以滿足元件所需持久性電力的來源。此外，「熱電自充隨身發電」亦適合一般人不容易到達的地方，譬如高山、險地及使用天然氣之發電設備的偏遠地區等，使用熱電晶片就能解決電力不易取得等問題。除了發電致冷也是它的另一功能，與傳統笨拙之壓縮機相比它應該是單位體積內致冷密度最高的元件了。據資料顯示，熱電材料在冷凍市場的應用非常成熟，年產值已從 2008 年的 3 億美元增長至 2018 年的 6 億美元，預計 2025 年達 17 億美元。



圖十一、薄膜熱電晶片，為科技部 2019 未來科技獎之一。