

熱電模組之多重物理耦合現象分析

陳斌豪¹、林育立²、趙文軒³、林政諺⁴、許修豪⁵、莊育賢⁶

^{1,4,5}遠東科技大學 能源應用工程學系

E-mail: binhao17@gmail.com

²工業技術研究院 綠能所

³工業技術研究院 材化所

⁶國立成功大學 機械工程學系

¹ 助理教授、² 經理、³ 研究員、^{4,5} 專題生、⁶ 研究生

摘要

1823 年，席貝克(Seebeck)發現由兩種不同金屬接合成的線路上，若兩接點間有溫差時，即會產生電位差。這個現象即是熱電偶(thermal couples)測量溫度梯度及熱電產生器(thermoelectric generator)之工作原理。12 年後，帕爾帖(Peltier)則發現若於由兩種不同金屬接合成的線路上通電流，其中一接點會放熱而另一接點則會吸熱。而這個現象即是熱電致冷器(thermoelectric cooler)之工作原理。於 1851，物理學家湯姆森(Thomson)建立了熱電現象的理論基礎，即推導出 Seebeck coefficient 及 Peltier coefficient 之間的關係，並預測第三種熱電現象的存在。本文將使用多重物理耦合數值分析軟體內的弱式方程(weak-form)，來對欲求解的 PDE 方程式進行描述，並進一步模擬熱電晶片應用於 CPU 的冷卻行為，並對該物理現象做進一步的探討。

關鍵字詞：多重物理耦合、熱電現象、弱式方程(weak-form)

Multi-Physics Coupling Analysis For Thermoelectric Module

Bin-Hao Chen¹、Yu-Li Lin²、Wen-Hsuan Chao³、Jeng -Yan Lin⁴、Hsiu -Hao Hsu⁵、
Yu -Hsien Chuang⁶

^{1,4,5} Department of Energy Application Engineering, Far East University

^{2,3} Industrial Technology Research Institute

⁶ Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University

Abstract

There are three thermoelectric mechanisms: the Seebeck, Peltier and Thomson effects. The Seebeck effect describes the conversion of temperature differences directly into electricity; an applied temperature gradient causes charged carriers in the material to diffuse from the hot side to the cold side generating a current flow. The Peltier effect describes the production of heat at an electrified junction of two different materials, the forced flow of charged carriers creates a temperature difference, and the Thomson effect describes the heating or cooling of a current carrying conductor in the presence of a temperature gradient. To analyze these phenomena accurately the thermoelectric field equations have to be solved, here the Seebeck- Peltier effect is implemented using the weak form. Otherwise, this study also investigates the temporal evolutions of the temperature profile while the TE modulus coupled to a CPU. Results give a useful phenomena explanation for the cooling application in electronic devices and figure out the interface effect of TE modulus.

Keywords: Thermoelectric modulus, Seebeck effect, weak form PDE.

1. 前言

熱電材料的發展及應用主要分為兩部分，其中一項為應用發電，主要是利用溫差發電的原理，現今不少汽車大廠投入這塊領域去研究，也就是將汽車的廢熱回收應用在熱電材料上，來直接產生電力，盡而達到節省 5% 燃油消耗量。然而除了這方面的應用實例外，也包括高密度溫差發電模組、加熱循環熱電燃燒系統、熱電共生系統等。由以上的發展便可以看出，發電應用是將來必然的趨勢。而另一方面應用為致冷，就致冷而言它的應用就相當的廣泛也被大家廣為使用，包含了車輛、半導體、生醫、民生等應用方面，如一般常見的有座椅控溫器(加熱或冷卻)、冷卻板(Cooling plates)、樣本溫控循環、血液分析器、攜帶型小冰箱、電子晶片的冷卻等等。由於科技的發達許多產品已朝向微型化、精密化，就電子散熱而言也有著其應用的限制，似乎已無法應付高度發展的科技，所衍伸出的高發熱密度元件，若無法將所產生的熱迅速從元件中移除，上升的溫度會使得產品性能降低，增加元件的不穩定性，甚至可能造成資料的遺失或元件損毀。因此，如何在有限的散熱空間中，將熱迅速散去，已成為目前科技發展一大的重點。綜觀現階段各種散熱技術裡，包括熱電致冷器、熱管、散熱片加風扇、水冷系統，甚至壓縮機等，在種種因素的考量之下，熱電致冷器因擁有體積小、環保、可靠度高等優點，因應而出，似乎有著取代傳統散熱裝置的優勢，對於成為下一代散熱裝置極具發展潛力，因而逐漸受到重視。

2. 文獻回顧

2008 年 Cosnier [1] 等人利用實驗及數值方法，將四片熱電致冷模組配合水箱及散熱鰭片，應用在空氣冷卻及空氣加熱的系統上。當電氣強度(Electrical Intensity)介於 4 到 5 安培之間，熱電致冷模組冷熱面溫差 5°C 到 10°C，可達到較佳 COP 值。實驗結果發現，系統 COP 值高於 1.5 時可用來冷卻，COP 趨近 2 時可用來加熱。利用數值方法計算出的結果，與實驗量測的結果比較，熱電致冷模組冷熱面有較佳的溫差，兩結果相比誤差低於 5%。2000 年 Huang [2] 等人以實驗搭配數值方法來設計出最佳的熱電致冷器。使用熱網絡模組(Thermal Network Model)分析結果，較佳的散熱座，有較佳的熱阻值，對於設計熱電致冷器是不可或缺的參數。研究結果指出，當使用較佳的散熱座時，熱電致冷模組

冷端為 5°C，熱阻可從 0.43°C/W 降至 0.2515°C/W，此時 COP 值從 0.47 提升至 0.67，散熱座熱性能從 42% 提升至 43%。2008 年 Goncalves[3] 等人利用蝕刻製程方式，制作微熱致冷模組，其模組內部半導體結構為 64 像素排列(64 Pixels Arranged)，每個像素為 8×8 的矩陣。蝕刻方式採用光刻技術，可產生熱電薄膜，在共蒸鍍條件下，可產生良好的熱電優質。在真空下，以紅外線顯微鏡發現，微熱電致冷模組可產生 4mA 的電流，此時，熱電致冷模組冷熱端溫差 5°C。2009 年 Ghoshal 與 Guha [4] 選用高熱電優質係數(Thermoelectric Figure of Merit)的熱電致冷模組，配合熱敏二極管(Thermal Diodes)及熱容器(Thermal Capacitors)研發一種小型切換式的水冷儲存裝置，熱敏二極管可防止系統過熱，熱容器可增加熱傳導。此儲存裝置不需靠任何機械傳動元件，即可運轉。量測結果顯示，達到穩態時，系統內水溫可降至 5°C，可減少 4.5 倍的能源消耗。2010 年 Maneewan [5] 等人將熱電致冷模組應用在小型氣冷裝置上。實驗時，將熱電致冷模組的電流分別從 1A 到 2A 到 3A 時，熱電致冷模組的冷端溫度從 26.2°C 下降至 21.5°C，熱端溫度最大可提升到 36°C。當熱電致冷模組功率從 28.6W 提升至 62.1W 時，可提升熱電致冷率，當系統功率從 83.3W 提升至 134.6W 時，系統致冷效率從 0.34 增加到 0.48，而系統致冷效率在 0.48 時，電流為 2A。2008 年 Saqr [6] 等人檢驗廢熱型熱電發電系統(Exhaust-Based Thermoelectric Generators System)簡稱(ETEG)，其主要控制系統的熱效率有：系統熱交換器的幾何形狀、系統熱交換器的材料、ETEG 現場的安裝、ETEG 內冷卻系統的設計。而 ETEG 這項技術優於一般交流發電機與車用電池，可應用在車用發電上，提升 3 倍的能源轉換效率。2008 年 Qiu 與 Hayden[7] 將熱電發電機(Thermoelectric Generator)結合鼓風機、風扇、水冷馬達、閥門、控制面板，等各元件組成一個家用式加熱系統。實驗結果發現；熱電致冷模組最大發電量為 553.9 瓦時，系統內熱端溫度為 637°C，系統內冷端溫度為 85°C，系統冷熱端有 552°C 的熱量可供室內加熱，並且還可把剩餘的功率轉化用來充電電池或用於其它電器。家用式加熱系約有 35% 電效率，能有效降低溫室效應的排放。2009 年 Bar-Cohn 與 Wang [8] 改善微熱電致冷模組的熱點溫度，應用在熱電致冷裝置上。此研究採用超晶格結構做為熱電材料，評估矽晶片與熱電材料的微接觸。將 3.5mm×3.55mm×100μm 的熱電材

料碲化 鈹超晶格結構封裝在積體電路元件中。實驗顯示，矽晶片底面會產生 42.7W/cm² 的熱通量，此時，熱點面積為 400μm×400μm，熱點的熱通量為 1250W/cm²。由測試結果顯示，當熱電材料給予 3A 的電流時，可將熱點溫降低 7.3°C 為最佳值。

3. 理論基礎及模型建立

3.1 統御方程式

對於計算 Seebeck 及 Peltier 效應的統御方程式如下：

電流平衡方程式：

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (1)$$

能量平衡方程式：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q \quad (2)$$

$$q = -k \nabla T + \underline{PJ} \quad (3)$$

其中：

σ : electric conductivity [S / m]

V : electric potential [V]

C_p : heat capacity [J / (kg · K)]

T : temperature [K]

q : heat flux [W / m²]

k : thermal conductivity [W / (m · K)]

P : Peltier coefficient [V]

J : current density [A / m²]

$Q = J \cdot (-\nabla V)$: Joule heating [W / m²]

由湯姆森第二關係式(Tomson's second relation)可得：

$$P = -ST \quad (4)$$

另外，為了將能量平衡方程式轉換成弱式方程，所以將能量平衡方程式的左右兩邊乘上 T_{test} ，並且對整個定義域 Ω 作積分：

$$\int_{\Omega} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} d\Omega = \int_{\Omega} Q T_{test} d\Omega \quad (5)$$

使用向量等式(Vector Identity)：

$$\nabla \cdot (T_{test} q) = q \cdot \nabla T_{test} + T_{test} \nabla \cdot q \quad (6)$$

因此方程式(5)變成

$$\int_{\Omega} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} d\Omega + \int_{\Omega} [\nabla \cdot (T_{test} q) - q \cdot \nabla T_{test}] d\Omega = \int_{\Omega} Q T_{test} d\Omega$$

$$\dots\dots\dots (7)$$

使用高斯定律(Gauss Theorem)

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot (T_{test} q) = \int_{\partial\Omega} T_{test} q \cdot n d\Omega \quad (8)$$

$$\int_{\Omega} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} d\Omega + \int_{\partial\Omega} T_{test} q \cdot n d\Omega - \int_{\Omega} q \cdot \nabla T_{test} d\Omega = \int_{\Omega} Q T_{test} d\Omega \quad (9)$$

熱通量為：

$$q = -k \nabla T + PJ \quad (10)$$

因此方程式(9)變為.....(11)

$$0 = \int_{\Omega} \left[-\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} + (-k \nabla T) \cdot \nabla T_{test} + (PJ) \cdot \nabla T_{test} + Q T_{test} \right] d\Omega - \int_{\partial\Omega} (q \cdot n) T_{test} d\Omega \quad (12)$$

而 Peltier 的弱式方程為：

$$\begin{aligned} (PJ) \nabla T_{test} &= PJ_x \frac{\partial T_{test}}{\partial x} + PJ_y \frac{\partial T_{test}}{\partial y} + PJ_z \frac{\partial T_{test}}{\partial z} \\ &= P^* ec.Jx * test(Tx) + P^* ec.Jy * test(Ty) \\ &+ P^* ec.Jz * test(Tz) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

3.2 模型的建立及參數設定

本研究所模擬的熱電材料為碲化鈹，其相關模擬參數如表 1 所示；而模型幾何尺寸如圖 1 所示。

4. 結果與討論

本研究實現了使用 COMSOL Multiphysics 軟體，模擬出熱電晶模組的 Seebeck 及 Peltier 效應。在本研究開始進行前，我們先利用文獻[9]的模型及參數，來對本研究的準確性做驗證；而從圖 2 及圖 3 可以發現本研究的熱電冷端和熱端的溫度分佈與文獻一致，因此可以得知本模擬具有一定的準確性存在。

從圖 4.施加電壓於熱電模組兩端其 2D 溫度分佈圖，以及圖 5. 施加電壓於熱電模組兩端其 3D 溫度分佈圖，可看出於熱電模組上施加電壓時，其熱電模組的上端及下端，分別會產生一冷端及熱端的現象，此即為 Peltier 效應。從圖 6. 施加溫差於熱電模組兩端其 2D 電壓分佈圖，以及圖 7. 施加溫差於熱電模組兩端其 3D 電壓分佈圖，可看出於熱電模組上施加一溫差時，其熱電模組的 P 型及 N 型半導體兩端會有一電壓差產生，此即為 Seebeck 效應。

另外，本研究亦對熱電晶片應用於 CPU 冷卻的熱傳行為進行模擬與分析；首先建利一 4X4 矩陣的熱電晶片，之後分別模擬 CPU 發熱功率為 300W、500W 及 700W 的情形下，其模擬結果如圖 8.當 CPU 功率為 300W 時，利用熱電晶片進行冷

卻之溫度分佈圖、圖 9.當 CPU 功率為 500W 時, 利用熱電晶片進行冷卻之溫度分佈圖以及圖 10. 當 CPU 功率為 700W 時, 利用熱電晶片進行冷卻之溫度分佈圖所示。從模擬的結果中可以發現 CPU 的溫度分佈並不均勻,且此效應隨著 CPU 功率的增加而越明顯,推測其原因應為熱電模組位置分佈並不均勻,導致其冷卻無法平均,致使 CPU 的溫度分佈亦不均勻。

5. 結論

本研究顯示熱電模組的排列位置,將對於熱電晶片應用於 CPU 冷卻的溫度分佈有顯著的影響,爾後將對熱電模組於熱電晶片上的分佈作最佳化設計,將能有效改善此一問題的缺點。

6. 參考文獻

- [1] M. Cosnier, G. Fraisse, L. Luo, An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system, International Journal of Refrigeration (2008) 05-062.
- [2] B.J. Huang, C.J. Chin, C.L. Duang, A design method of thermoelectric cooler, International Journal of Refrigeration 23 (2000) 208-218.
- [3] L.M Goncalves, J.G. Rocha, C. Couto, P. Alpuim, J.H. Correia, On-chip array of thermoelectric Peltier microcoolers, Sensors and Actuators A145-146 (2008) 75-80.
- [4] U. Ghoshal and A. Guha, Efficient Switched Thermoelectric Refrigerators for Cold Storage Applications, Journal of Electronic Materials, Vol. 38, No. 7, 2009.
- [5] S. Maneewan, W. Tipsaenprom,, and C. Lertsatitthanakorn, Thermal Comfort Study of a Compact Thermoelectric Air Conditioner, Journal of Electronic Materials, Vol. 39, No. 9, 2010.
- [6] K. M. Saqr , M. K. Mansour and M. N. Musa, Thermal Design of Automobile Exhaust based Thermoelectric Generators: Objectives And Challenges, International Journal of Automotive Technology, Vol.9 No.2, pp. 155-160 (2008).
- [7] K. Qiu, A.C.S. Hayden, Development of a thermoelectric self-powered residential heating system, Journal of Power Sources 180 (2008) 884-889.

- [8] A. Bar-Cohn , P. Wang, On-chip Hot Spot Remediation with Miniaturized Thermoelectric Coolers, Microgravity Sci. Technol (2009) 21 (Suppl 1):S351-S359.
- [9] S.P. Yushanov, L.T. Gritter, J.S. Crompton and K.C Koppenhoefer AltaSim Technologies, Columbus, OH, Multiphysics Analysis of Thermoelectric Phenomena, Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference in Boston.

	碲化鉍	銅電極
Seeback coefficient (V/K)	P: 200×10^{-6} N: -200×10^{-6}	3.8×10^{-6}
Electrical conductivity (S/m)	1.1×10^{-5}	6×10^7
Thermal conductivity (W/m.K)	1.7	400
Heat capacity (J/kg.K)	554	385
Density (kg/m ³)	7700	8800

表 1. 熱電模擬參數

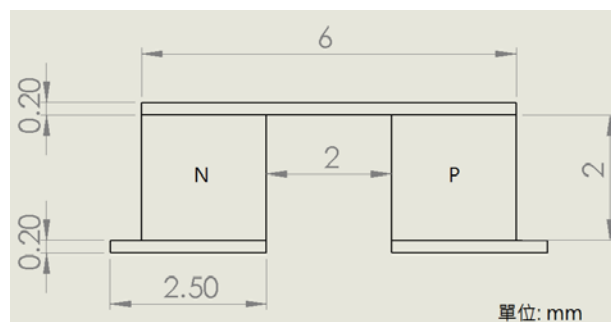


圖 1. 熱電模擬幾何尺寸

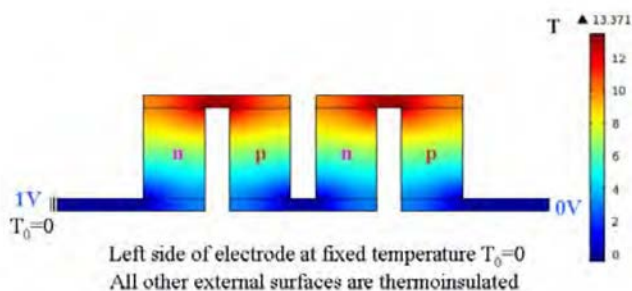


圖 2. 文獻[9]熱電模擬溫度分佈圖

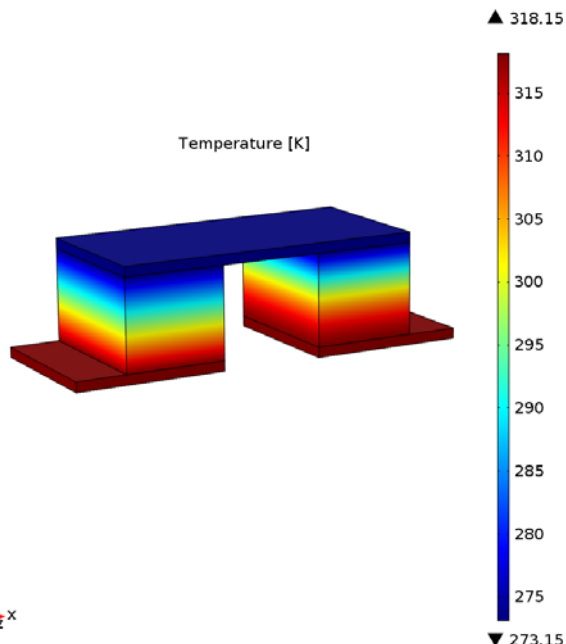


圖 5. 施加電壓於熱電模組兩端其 3D 溫度分佈圖

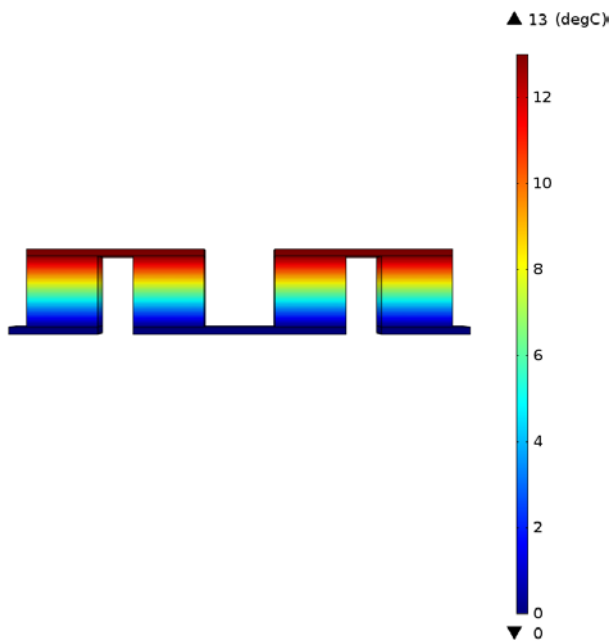


圖 3. 本文熱電模擬溫度分佈圖

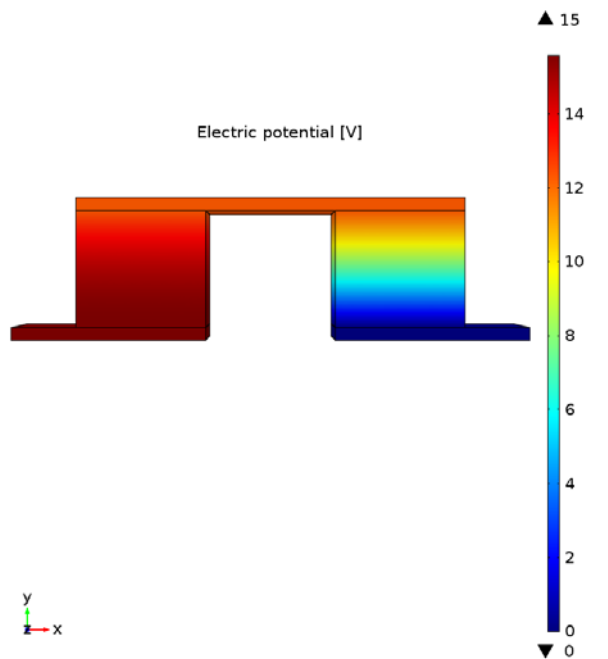


圖 6. 施加溫差於熱電模組兩端其 2D 電壓分佈圖

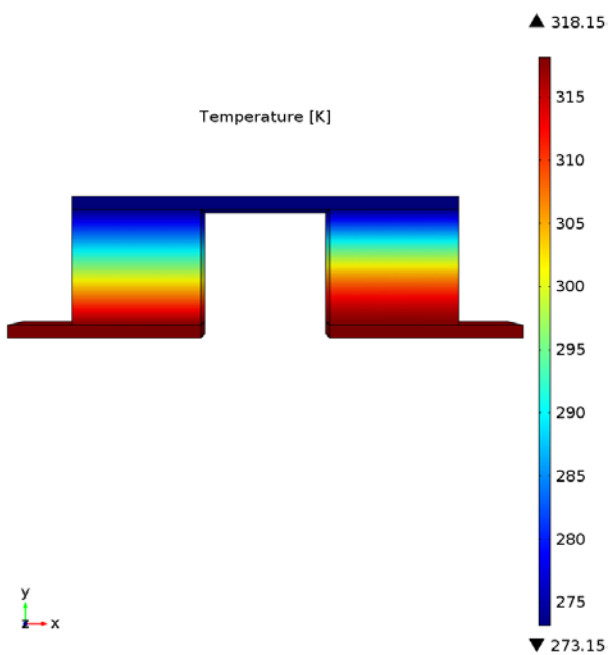


圖 4. 施加電壓於熱電模組兩端其 2D 溫度分佈圖

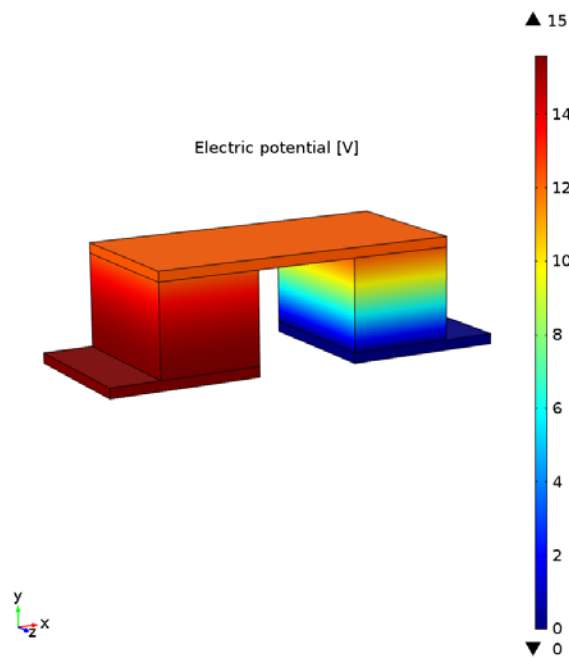


圖 7. 施加溫差於熱電模組兩端其 3D 電壓分佈圖

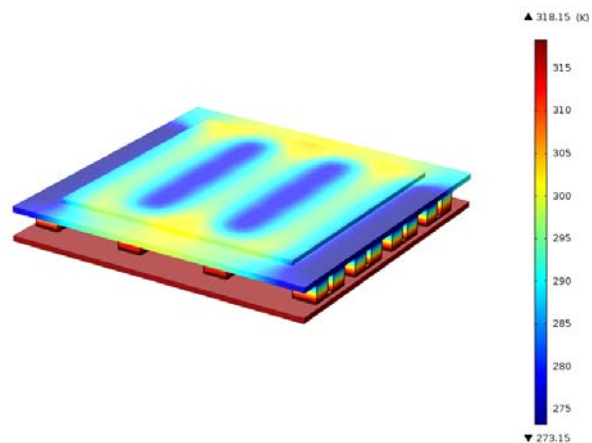


圖 10.當 CPU 功率為 700W 時, 利用熱電晶片進行冷卻之溫度分佈圖

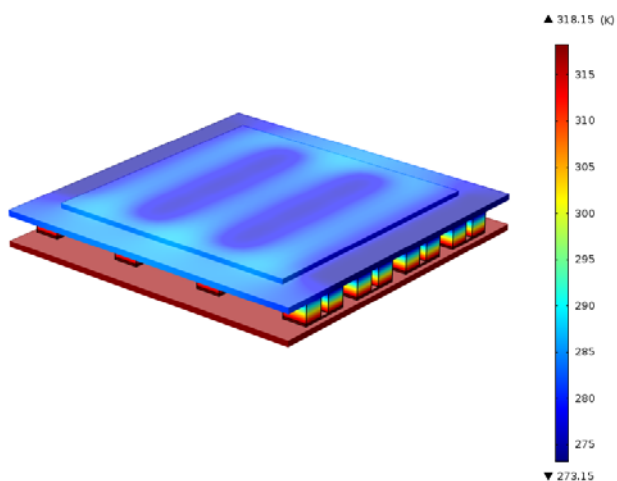


圖 8.當 CPU 功率為 300W 時, 利用熱電晶片進行冷卻之溫度分佈圖

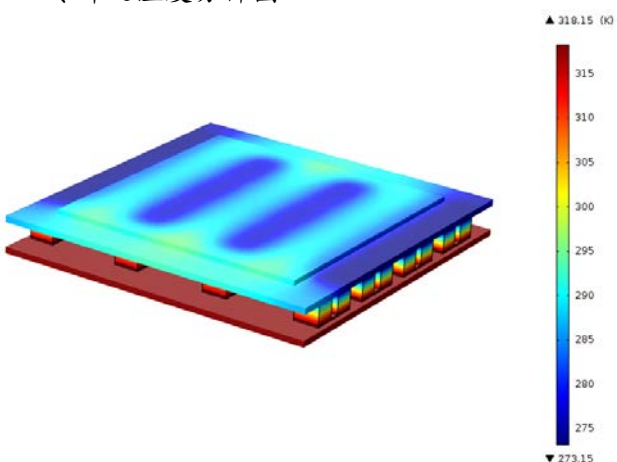


圖 9.當 CPU 功率為 500W 時, 利用熱電晶片進行冷卻之溫度分佈圖