

# 廣泛應用型半導體致冷控制系統

## General Purpose TE Cooling Control System

陳建宏、廖泰杉、翁茂樵、陳志文

Chien-Hung Chen, Tai-Shan Liao, Mao-Chiao Weng, Chih-Wen Chen

國家實驗研究院儀器科技研究中心 (以下簡稱儀科中心) 開發一套半導體致冷系統，其特點為低成本及易整合於量測儀器上。半導體致冷系統包括熱電阻式溫度量測、脈衝寬度調變式電流控制與溫度資訊顯示。溫度量測解析度可達  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，電流控制輸出最高可達  $2\text{ A}$ ，並設計具有自動溫度回饋調整電流機制。本文詳細介紹相關電路設計與量測情形，以提供國內相關領域之應用。

We report the design of TE cooling control system with a cost effective, general purpose, and easily to integrate with other measurement system. The TE cooling control system consists of thermistor type temperature measurement circuits, current output control circuit based on PWM, and data display. The temperature resolution of our measurement system is  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Maximum output current can reach to  $2\text{ A}$ . The temperature measurement and current output of the automatic feedback control system are achieved by the implementation of an analog and digital background balancing circuit. The article also introduces the system structure, design, and measurement results that it looks forward to providing those information for any applications in related industries.

### 一、前言

在許多工業應用中，量測儀器所使用的感測器在低溫恆溫環境操作可以有效提高其效能與準確度。降低儀器溫度主要有兩項好處，第一為增加系統量測效益，如增加量測的穩定度、提高 SNR 或加大量測範圍等<sup>(1)</sup>；第二為延長儀器中零件的生命週期。另一方面，溫度過高也往往會造成整體系統的當機，因此在量測儀器中溫度的控制相當重要。

降低溫度的方法主要有兩種，第一種為使用液化氣體，如液態氮或液態氦等，這類方法可以將溫度降低至絕對溫度零度 ( $-273.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 左右，主要針對儀器須在非常低溫的環境下運作，如哈伯望遠鏡<sup>(2)</sup>。

此方法最大缺點在於其需要一個龐大的運作系統，並且需要定期添加液化氣體。另一種方法是使用半導體致冷片 (thermoelectric, TE) 來達到維持低溫的效果，其降溫或低溫效果並不會比液化氣體佳，但因整體建置系統的體積小，並使用電流控制致冷溫度，多數量測儀器<sup>(3-5)</sup> 採用半導體致冷片作為溫控使用，特別是在提高影像感測器的效能上<sup>(6-8)</sup>。

近期半導體致冷片的相關研究主要針對改變致冷片的模型，並得到更佳的轉換效率與改善散熱效能<sup>(9-10)</sup>，即使用較少的能量，卻可達到更高的效能，符合現在世界上綠色能源的趨勢。提升半導體致冷片的散熱效果也可以有效的提升整體效益，其原因在於致冷片的兩側溫差為  $\Delta T$  度，將致冷片的

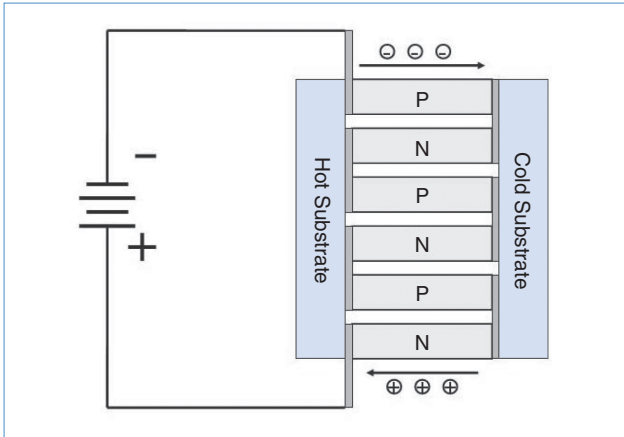


圖 1. 致冷片示意圖。

發熱側保持在低溫的情況下，相對地，致冷側也可達到更低的溫度。另一方面，較少研究討論半導體致冷片的控制系統，好的控制系統可以更加提升整體的工作效能。比較常見控制半導體致冷片的方法為基礎電晶體開關架構<sup>(11-12)</sup>，透過電晶體來開關輸入電流控制致冷片，此種方法必須很小心控制固定電流輸出大小，電流輸出過大可能會導致儀器或致冷片的損壞。

另一種可行的控制方式則是使用脈衝寬度的調變訊號 (pulse-width modulation, PWM)，透過脈衝寬度調變訊號中的高準位訊號來控制電晶體開關時間，改變高準位的寬度也可達到有效控制電流輸出給致冷片的時間。因此本研究提出使用脈衝寬度調變訊號來控制致冷系統，並增加自動溫度量測回饋功能之設計，在達到設定的預期溫度後，系統可依量測的溫度自動調整脈衝寬度調變訊號，以控制電流輸出的大小。本研究中所設計之半導體致冷器控制系統也應用在影像感測器的溫度與暗電流狀態的輸出關係，過去的研究論文曾提出近紅外光感測器之暗電流狀態輸出容易受到溫度的影響<sup>(13-14)</sup>，因此我們也藉由近紅外光感測器之實驗，進而驗證整體半導體致冷器控制系統的效能。

## 二、半導體致冷原理

半導體致冷片是將 P 型半導體與 N 型半導體利用金屬基板將其連接，並形成一個電偶對，如將

許多電偶對排列，並連接成電偶陣列，形成了半導體致冷片的雛型。如圖 1 所示，當電子流從電壓負極流出到電偶對 P 型再到 N 型半導體，依此重複後返回到電壓正極，此時電洞會朝向電子流相反的方向移動，因而集中在圖中致冷片的左半邊。在 P 型半導體中靠近致冷片右半邊的電洞要向左半邊游離時需要能量，因此將此部分的電勢能轉換成能量，右半邊缺少電勢能造成金屬基板被冷卻，當電洞移到左半邊，則會釋放出多餘的勢能，也就造成左半邊金屬基板被加熱；而 N 型半導體中電子會隨著電子流的方向移動，因此在靠近右半邊金屬基板的電子要往左移動需要電勢能，造成右半邊金屬基板被冷卻，左半邊金屬基板則相反。電偶陣列越多，此效果也就越強。

## 三、系統設計

### 1. 硬體設計

如圖 2 所示為致冷系統的方塊圖，包括半導體致冷片、溫度量測區模組、電流控制區模組、微控制器模組與資料顯示模組等。

溫度量測模組由熱敏電阻對溫度轉換器 (圖 3，MAX6682)、微控制器 (圖 3，ATMEGA8535) 與周邊電路所構成。熱敏電阻對溫度轉換器的功能是将負電阻係數的熱敏電阻值轉換成數位訊號，其原理是熱敏電阻對溫度轉換器內部產生固定電流輸出至外部固定電阻 (圖 3，R2)，再到熱敏電阻感測器 (圖 3，THERM\_A 與 THERM\_B 接腳) 進而產生電壓值，此電壓值會依據熱敏電阻不同而改變，而後熱敏電阻對溫度轉換器內部所含的類比至數位轉換

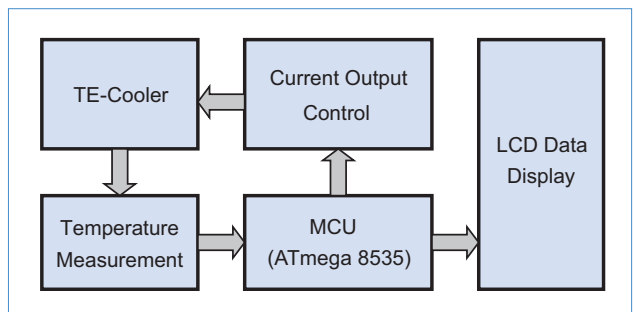


圖 2. 致冷系統方塊圖。



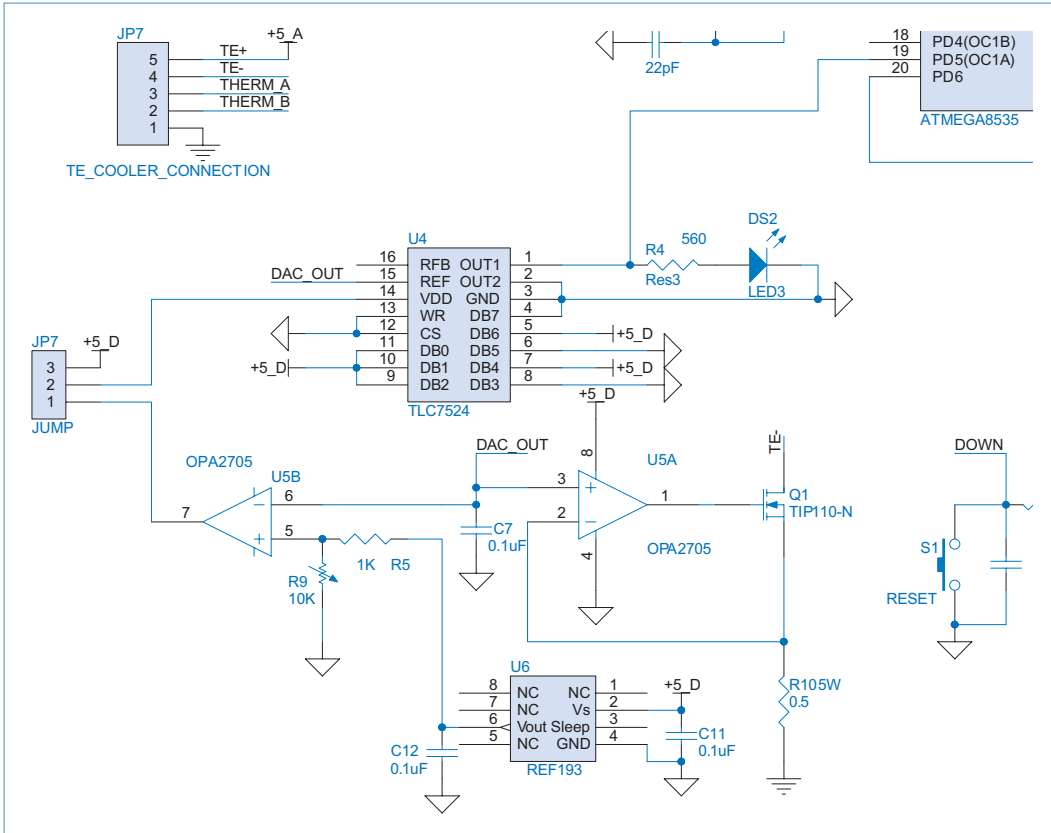


圖 4. 電流控制區塊電路圖。

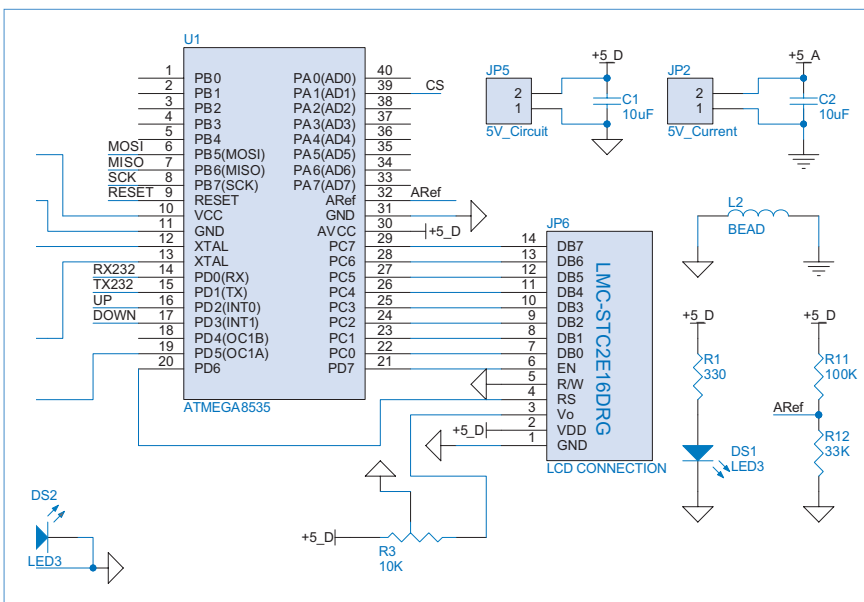


圖 5. 顯示區塊電路圖。

度轉換。如果平均溫度相等於設定溫度時，則保持原設計值。整體程式自動透過微處理器執行，並搭配外部電子電路用於整體自動回饋與控制機制，並將量測平均溫度與致冷溫度即時顯示在 LCD 上。

### 3. 實驗設計

以開發之溫控裝置進行短波紅外影像感測器暗電流狀態輸出實驗，透過實驗來測試整體系統的效率。實驗流程如圖 7 所示，測試一開始先設定相關

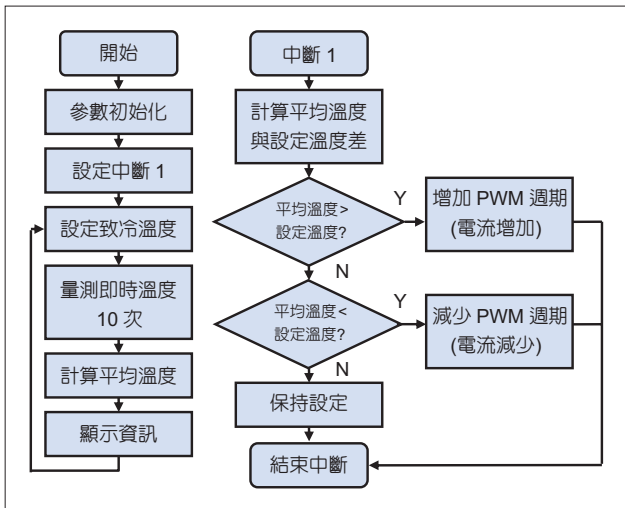


圖 6. 程式流程圖。

實驗參數，包括讓短波紅外影像感測器處於工作狀態、在全暗的環境中量測，預設致冷溫度於 30 °C 與短波紅外影像感測器曝光時間為 10 ms。其中短波紅外影像感測器是使用砷化銦鎵短波紅外影像感測器 (InGaAs short wave infrared, SWIR, G9201-256S, Hamamatsu) 與量測短波紅外感測器的溫度值，此短波紅外影像感測器有內建熱敏電阻溫度感測器，因此系統可以直接讀出在不同溫度下的變化值，且直接將其值轉換成實際溫度，而後同時量測影像感測器在全暗的情形下暗狀態的輸出值，量測 50 次，並取平均值，再將致冷溫度降 5 °C，重複流程實驗，實驗溫度從 30 °C 至 -20 °C。

#### 四、結果與討論

整體半導體致冷控制系統建置在 8 cm × 4.5 cm 的印刷電路板上 (printed circuit board, PCB)，操作電壓為 5 V。首先測試熱敏電阻量測值與溫度的關係，如圖 8 所示，X 軸為量測的電阻值，Y 軸為轉換後的溫度值。其關係曲線式如式 (1) 所示，該系統也利用此關係式作為溫度的換算。此輸入電阻值範圍可以從 1 kΩ 到 35 kΩ，轉換溫度可以從 80 °C 到 -20 °C，其量測解析度為 0.1 °C。

$$y = -25.67 \ln(x) + 68.073 \quad (1)$$

另外，此研究也比較了兩個不同電流的控制方法，分別為一般輸出訊號的控制與使用 PWM 輸出訊號的控制。一般輸出控制方法中，當輸出腳位為高準位，透過數位類比訊號轉換器與其固定的數位控制值轉換出電壓約 1.7 V，再輸入到運算放大器與場效電晶體組成的電流驅動電路，此時場效電晶體的源極與汲極將導通，並讓約 2 A 電流通過致冷片。此方法的結果有一缺點，因輸出腳位為高準位時，電流會一瞬間全部輸出至致冷片，輸出腳位為低準位時，則無電流輸出，這樣劇烈的變化有可能會引起致冷片上的傷害或電路上的毀損。另外，在電源部分，瞬間的大電流輸出也會引發電壓的不穩等效應。實驗中也測試使用 PWM 訊號來做電流控制，如圖 9 所示可以改變 PWM 訊號的高準位寬度來改變電流輸出的大小，高準位寬度寬時可以加大電流

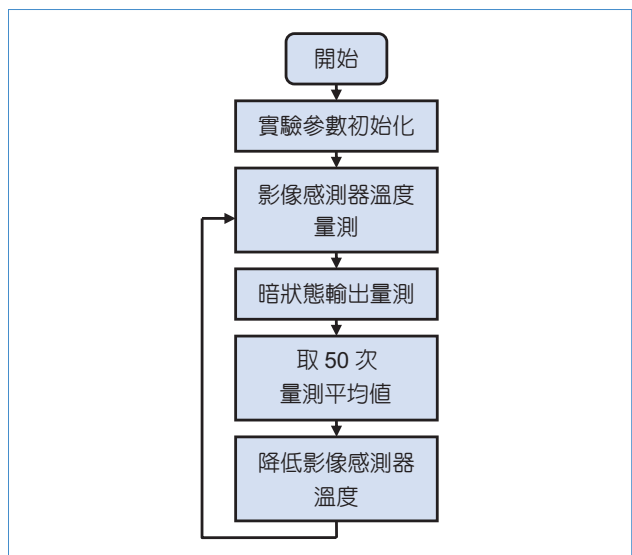


圖 7. 半導體致冷系統測試流程圖。

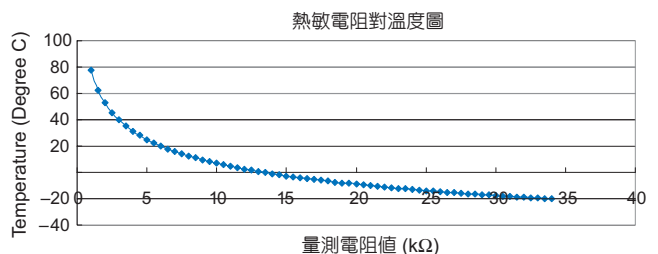


圖 8. 電阻與溫度關係圖。

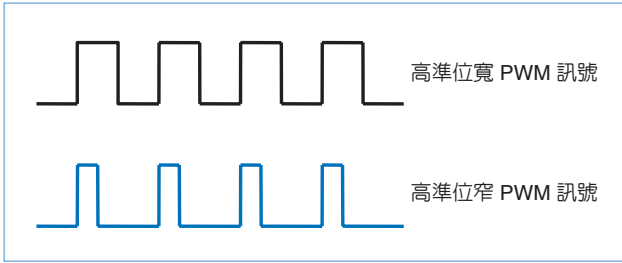


圖 9. PWM 訊號示意圖。

輸出，高準位寬度窄時，可以減少電流輸出。圖 10 為不同 PWM 高準位寬度與輸出電流關係圖，X 軸為不同 PWM 高準位時間，Y 軸為輸出電流值，圖中可以看到其關係式趨近為線性，而場效電晶體工作在線性區，其關係式如式 (2)。由於是線性的變化，因此在控制上也相對的穩定與可靠。

$$y = 0.0117x + 0.0092 \quad (2)$$

此次研究也透過短波紅外影像感測器之暗電流狀態輸出的實驗來驗證系統的整體效能。圖 11 為輸入電流與短波紅外影像感測器的溫度關係圖，圖中 X 軸為輸出電流，Y 軸為透過影像感測器內建的熱敏電阻回傳值轉換溫度值。其關係式也趨近於線性，關係式如式 (3)。其中半導體致冷系統輸出電流到大約 1.5 A 就可將短波紅外影像感測器溫度降至接近 -20 °C，而後也透過此關係圖量測不同溫度下短波紅外影像感測器暗電流狀態的輸出情形。短波紅外影像感測器曝光時間設在 10 ms 下，並在全暗的環境下分別量測 30 °C 到 -20 °C，每次量測溫度間距為 5 °C，其結果如圖 12 所示。其中 X 軸為影像感測器溫度，而 Y 軸為暗狀態輸出情

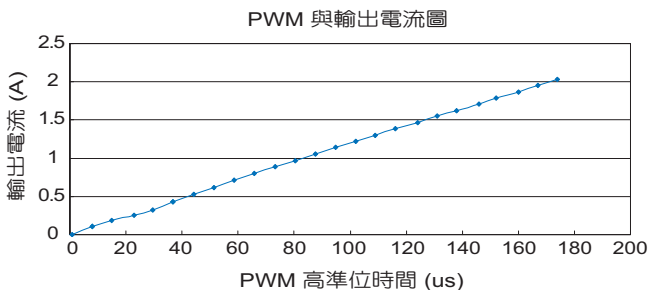


圖 10. PWM 高準位時間與電流輸出圖。

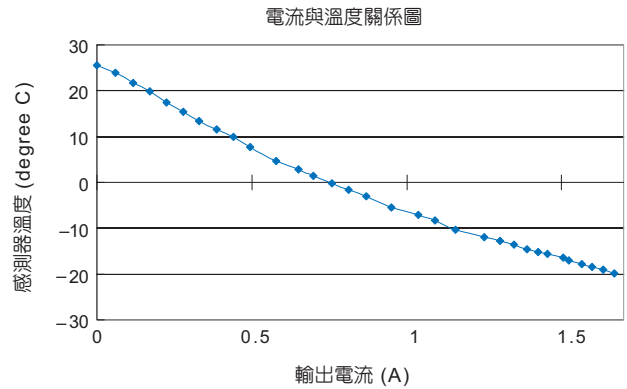


圖 11. 輸出電流與短波紅外影像感測器溫度關係圖。

形，由圖可以發現短波紅外影像感測器溫度下降對暗電流狀態輸出相當明顯，特別是當溫度從 30 °C 降至 20 °C 時，暗電流狀態輸出降低了 50%，但當短波紅外影像感測器溫度小於 5 °C 後，暗狀態輸出降低就不明顯。

$$y = -27.71x + 22.867 \quad (3)$$

## 五、結論

擁有低成本、普遍性與高整合度的系統是現代儀器系統的主要趨勢，本研究中提出的半導體致冷控制系統也包含了這幾項優點。此系統透過產生 PWM 訊號調整電流大小，最大輸出電流可以達到 2 A，此外，又設計溫度量測功能，可以在調整電流輸出的同時，監測溫度下降的情形，也可整合兩項功能成為擁有自動回饋機制的半導體致冷控制系

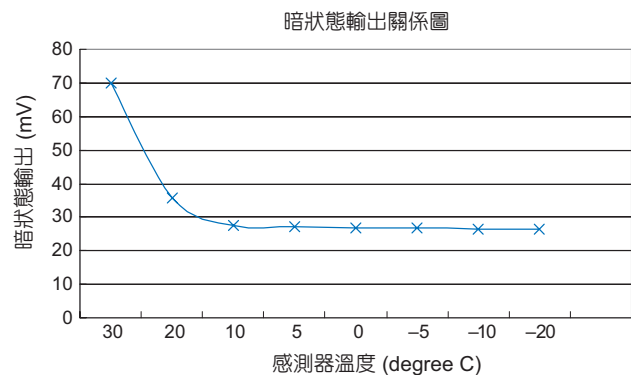


圖 12. 影像感測器暗狀態輸出與溫度關係圖。

統。該系統也透過短波紅外影像感測器暗電流狀態輸出實驗來驗證整體系統的可行性與穩定度，另外也因整合上的便利，而後此系統將整合到儀科中心所開發設計的近紅外光譜儀與短波紅外照像機系統上。藉由本文的介紹旨在提供一套有效的半導體致冷控制系統的參考依據，進而提高國內量測儀器的開發能力，共同促進相關產業之發展。

## 參考文獻

1. J. Rycken, T. Ihn, P. Studerus, A. Herrmann, and K. Ensslin, *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 2765 (1999).
2. M. S. Iye, E. O. Watanabe, T. Y. Okada, and W. Tanaka, *Tokyo Astron. Obs. Rep.*, **21**, 2 (1988).
3. M. Labudovic and J. Li, *IEEE Trans. On Components and Packagin Ackagin Tech.*, **27**, 724 (2004).
4. R. A. Taylor and G. L. Solbrekken, *IEEE Trans. On Components and Packagin Ackagin Tech.*, **31**, 23 (2008).
5. J. B. McManus, J. H. Shorter, D. N. David, and M. S. Zahniser, *IEEE Sensors 2007 Conference*, 1341 (2007).
6. C. Parks and D. Losee, *Proc. SPIE*, **5017**, 167 (2003).
7. I. Peters, A. Kleimann, F. Polderdijk, W. Klaassens, R. Frost, and J. Bosiers, *IEDM Tech. Dig.*, 993 (2004).
8. N. S. Saks, *IEEE Electron Device Lett.*, **1**, 131 (1980).
9. K. Fukutani and A. Shakouri, *IEEE Trans. on Components and Packagin Ackagin Tech.*, **29**, 750 (2006).
10. G. L. Solbrekken, K. Yazawa, and A. Bar-Cohen, *On Components and Packagin Ackagin Tech.*, **31**, 429 (2008).
11. J. Michael, Ramirez, A. Joe, Ortiz, *U.S. Patent No. 5450727*, 19 Sep (1995).
12. M. Thomas, *U.S. Patent No. 5970719*, 26 Oct (1999).
13. 陳建宏, 陳志文, 周世傑, 翁茂樵, 民生電子研討會, 267 (2008).
14. C.-H. Chen, C.-W. Chen, M.-C. Weng, S.-J. Jou, and T.-S. Liao, *International Conference on Optics and Photonics*, Fri-P1-227 (2008).

- 
- 陳建宏先生為國立成功大學醫學工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
  - 廖泰杉先生為中原大學電子工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。
  - 翁茂樵先生為國立交通大學電機與控制工程碩士班學生。
  - 陳志文先生為國立中央大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
  - Chien-Hung Chen received his M.S. in biomedical engineering from National Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
  - Tai-Shan Liao received his Ph.D. in electronic engineering from Chung Yuan Christian University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
  - Mao-Chiao Weng is a student in the Department of Electrical and Control Engineering at National Chiao Tung University.
  - Chih-Wen Chen received his M.S. in mechanical engineering from National Central University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.