

# 紅外線攝影系統的設計原理及應用

## Design Principles and Applications of the Infrared Imaging Camera

管傑雄

Chieh-Hsiung Kuan

本文主要介紹黑體輻射的基本概念及紅外線攝影系統的基本架構，並深入探討所謂的超晶格結構、單及雙超晶格偵測器及其相關陣列的設計原理；其中超晶格結構是作為吸收紅外線來產生光電子的區域，而超晶格偵測器也包括一寬能障以作為過濾光電子之用。超晶格結構及寬能障兩者的組合造就了多彩紅外線偵測器。同時，本文也提出如何應用偵測器陣列建構兼具偵測紅外線及可見光的攝影系統及進行溫度遙測。

This paper reports the fundamental concept of the blackbody radiation and the basic structure of the infrared imaging camera. In particular, the superlattice structure, the single and double superlattice infrared photodetectors are discussed in details. The design principles of the associated detector array are also described. The superlattice structure is responsible for the absorption of the infrared radiation. In the detector, in addition to superlattice, there is a wide barrier acting as an energy filter to select the photoelectrons. The appropriate combination of the superlattices and the wide barrier creates a multicolor infrared photodetector. In particular, we also describe how to apply the detector array on the construction of the infrared imaging camera which is able to detect the infrared and visible radiation simultaneously and how to utilize the detector to remotely sense the object's temperature.

### 一、黑體輻射的基本概念

人是藉由物體反射光線的性質而辨知物體的存在，但是人眼所看見光線的波段範圍是在  $0.35 - 0.75 \mu\text{m}$ ，只佔了全部光譜中的一小部分。事實上，不同溫度的物體均可自行輻射出不同波長的光線。其中，在學理上一理想狀態下的輻射體，即所謂的黑體 (blackbody)，其輻射出光線的頻譜  $L_B(\lambda, T)$ ，即如圖 1 所示。 $L_B(\lambda, T)$  不僅是波長  $\lambda$  的函數，它

也隨黑體溫度  $T$  而改變；而一般溫度為  $T$  的物體，其輻射出的頻譜則為  $\epsilon L_B(\lambda, T)$ ，其中  $\epsilon$  為該物體的光發射率 (emissivity)，其值介於 0 與 1 之間。換言之，黑體的光發射率即為 1。假使考慮  $\epsilon = 1$  的物體，如圖 1 所示，在室溫下的物體主要發出波長約為  $10 \mu\text{m}$  的紅外線，隨著溫度升高，物體所發射出之紅外線的強度也越高，而輻射強度最強的波長也越往短波長偏移。就  $6000 \text{ K}$  太陽表面所輻射出來的光而言，其已進入可見光的範圍內，可為

人類所感受到。然而，在我們的周遭事實上充斥著人眼所無法察覺的「紅外線」。因此紅外線影像的開發可以拓展人類的「視野」，並且發覺各種可能的應用。

## 二、紅外線攝影系統

紅外線攝影系統的基本結構圖如圖 2 所示。物體所輻射出的紅外線，經過大氣並由反射式聚焦鏡而將光線集中在焦平面陣列偵測器 (focal plane array) 上，然後由讀出電路 (read-out circuit) 將陣列中的每一偵測器訊號大小讀出，接著傳送到數位訊號處理電路，將紅外線強度以相對應的可見光顏色表示在顯示器上或直接儲存起來。

圖 3 是人體的熱影像 (thermal image) 典型例子。所謂的熱影像即是因溫度不為 0 K 的物體所放射出的紅外線影像。圖中所標示的數字代表著攝氏溫度標下的溫度 (°C)；然而值得注意的是，這個溫度的準確度可達 0.1 °C，但只限於臉部的溫度分佈。事實上，目前更佳的紅外線偵測器可達 0.01 °C 的準確度。

為何圖 3 溫度分佈的準確度僅限於臉部而已？

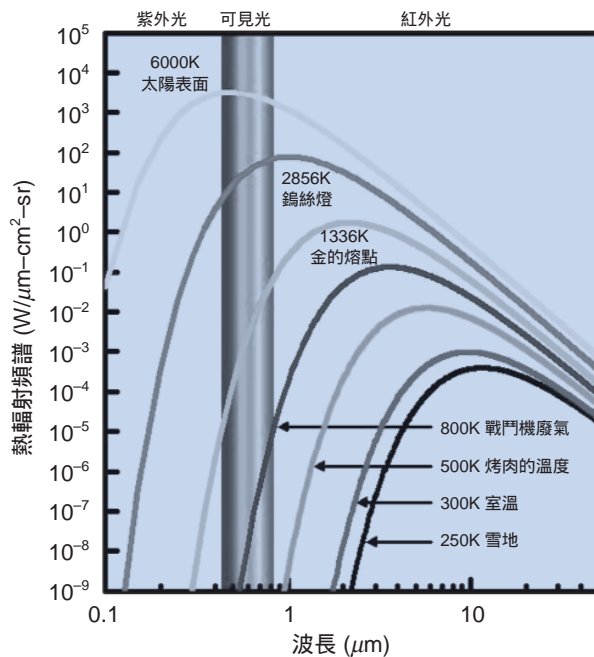


圖 1. 不同溫度的物體所輻射出不同波長的紅外線。從室溫 (300 K) 物體，至太陽表面 (6000 K)，尤其是後者，其所輻射出來的光已進入可見光區，如彩色區域所表示者。此熱輻射頻譜所代表的數值，事實上是標準的黑體輻射值。實際上的物體，其所輻射出來的光會比此數值稍小。

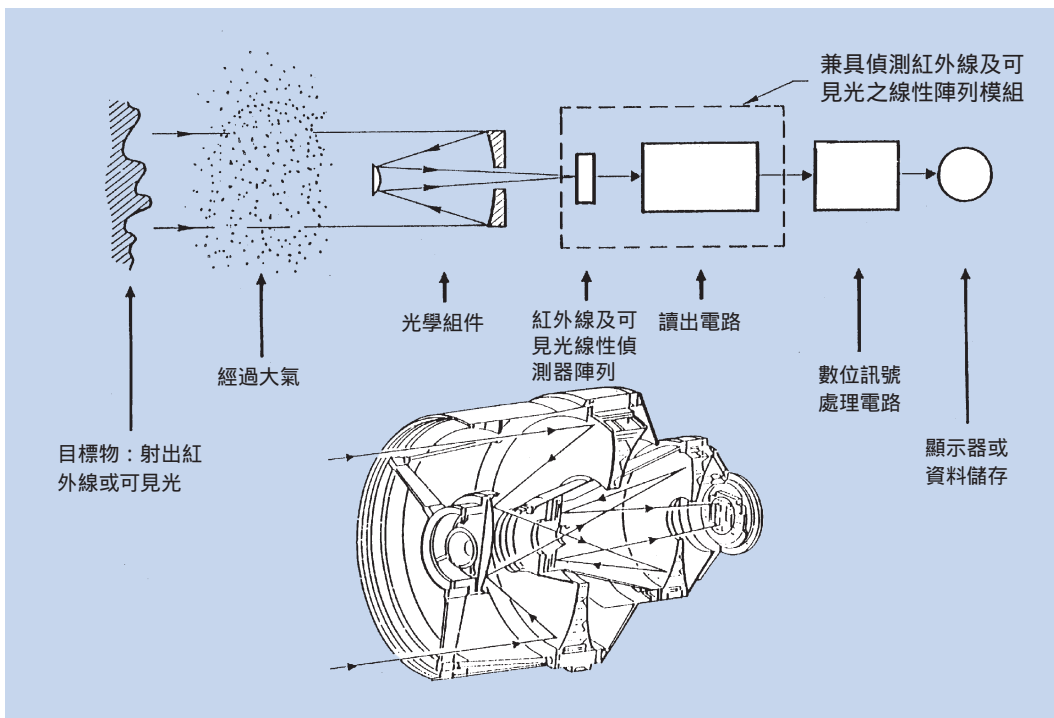


圖 2. 兼具偵測紅外線及可見光攝影系統的示意圖。

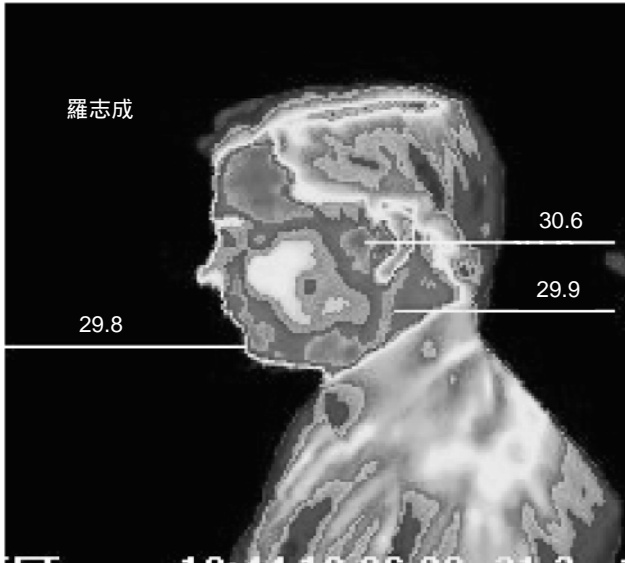


圖 3. 人體的熱影像典例。

這是由於光發射率隨物質種類而有所不同。如圖 4 所示，在偵測物體紅外線時，所偵測的訊號大小，亦即為光電流的值，其實主要為四個因素所操控：物體的溫度  $T$ 、物體的光發射率  $\varepsilon$ 、物體與偵測器間的距離  $r$  及偵測器本身對光的響應度  $R(\lambda)$  (responsivity)。在進行圖 3 的溫度分佈量測時，由於  $R(\lambda)$  是固定的，而  $r$  可以每次控制均相同，所以對同一物質而言 ( $\varepsilon$  相同)，光電流訊號大小即反應出物體溫度  $T$  的高低。所以，圖 3 溫度的標示主要是著重在臉部，即是已知人體皮膚表層的光發射率。

要解決上述遙測物體溫度分佈的問題，可以採用所謂的多彩紅外線偵測器。就如同人眼可分辨紅綠藍等三種色光一樣，多彩紅外線偵測器亦可分辨不同波段的紅外線色光。假如圖 4 中的偵測器同時可有兩種不同光響應度  $R_1(\lambda)$  及  $R_2(\lambda)$ ，則我們可求取相對於該兩響應度的光電流比值  $Pr$  (photocurrent ratio)<sup>(1)</sup>：

$$Pr = \frac{I_{p1}}{I_{p2}} = \frac{\int L_B(\lambda, T) R_1(\lambda) d\lambda}{\int L_B(\lambda, T) R_2(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

其中光電流  $I_{p1}$  及  $I_{p2}$  (1 及 2 分別對應於  $R_1(\lambda)$  及  $R_2(\lambda)$ ) 原是正比於物體所發射出而抵達偵測器的光

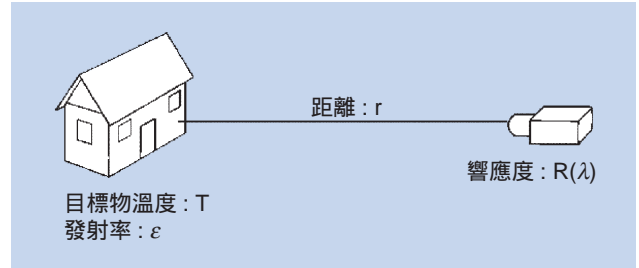


圖 4. 影響光電流訊號的主要因素。

強度  $\varepsilon L_B(\lambda, T)/r^2$ ，但由於求比值的關係， $\varepsilon$  及  $r$  即因分子分母彼此互消而不再出現於 (1) 式中。因此，(1) 式的右邊僅是物體溫度  $T$  的函數，而不再受到  $\varepsilon$  及  $r$  的影響；亦即溫度即可由比值大小對應出來。

從上面的描述不難理解到，紅外線偵測器是整個攝影系統的重要零組件，其功能決定了系統的基本設計。在底下的描述中，我們將以臺大電機系所發展多彩紅外線偵測器的經驗與各位讀者分享。在另一方面，由於國科會矽導計畫的推動，所謂的 SoC (system on a chip) 概念，即是將複雜的電路系統，完整地集中於單一晶片上完成。我們亦打算整合圖 2 中的偵測器陣列及讀出電路 (虛線所圍區域) 而形成一多工能模組 (module)，然後才逐漸將數位訊號處理電路也積體集中於單一晶片上，而實際完成所謂的 SoC 概念。在本文中，我們會初步介紹我們預定完成的多工能模組—兼具偵測多波段紅外線及可見光的偵測器陣列，以及其讀出電路的基本設計概念。

### 三、超晶格多彩紅外線偵測器的設計原理

臺大電機系發展多彩紅外線偵測器已有八年的經驗了，主要是採用超晶格 (superlattice) 結構，所完成的偵測器有兩代：單超晶格偵測器<sup>(2,3)</sup> 及雙超晶格偵測器<sup>(4)</sup>。其中雙超晶格偵測器榮登於某商業性期刊<sup>(5)</sup> 的 Newsbreak，可見其實用的價值性。在此，我們即依超晶格結構、單超晶格偵測器及雙超晶格偵測器的順序介紹給各位讀者。

## 1. 超晶格結構

電子在原子的位能井中，如圖 5(a) 所示，由於其波動的特性，電子所能存在的能階是單一存在的。若將相同的原子依週期性間隔排列起來，只要間隔足夠小的話，彼此間同一位置的能階即會相互作用而形成所謂的能帶。在固態晶體中所謂的導電帶及價電帶，即是因此原理所形成的。仿照原子的位能，如圖 5(b) 所示，由於導電帶電子所看到的電子位能不同，我們可利用兩種材料製作出所謂的量子井結構。例如 GaAs 導電帶電子位能較低，形成所謂的能量井部分；而 AlGaAs 導電帶電子位能較高而形成能障的部分。在量子井中也可形成單一存在的能階。只不過，由於材料的限制，位能井深僅能達到數百 meV，而原子位能可達數十 eV。因此，量子井結構的能階間隔僅在紅外線的範圍內，

故可用於偵測紅外線。類似固態晶體，將量子井週期性地排列起來，只要能障的間隔夠小，在量子井中同一位置的單一能階即可彼此互相作用而形成迷你能帶，此即形成所謂的超晶格結構。值得一提的是，由於電子波長的限制，量子井及能障的寬度必須在數個奈米尺度以下，才能製作成超晶格。事實上，超晶格結構是奈米科技的重要產物之一，其所顯示的成果正是進入「量子元件」的開始。

本文中提到的超晶格結構，均是以 GaAs/AlGaAs 分子束磊晶系統成長而成的，其中量子井的部分，以及左右（即實際結構的底部及頂部）接點的部分，均是  $n$  型摻雜的 GaAs，高能障的部分是  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。控制能障的高低是利用鋁分量，亦即  $x$  參數的大小。量子井及能障的寬度可以在長晶的過程中受到準確地控制。而超晶格迷你能

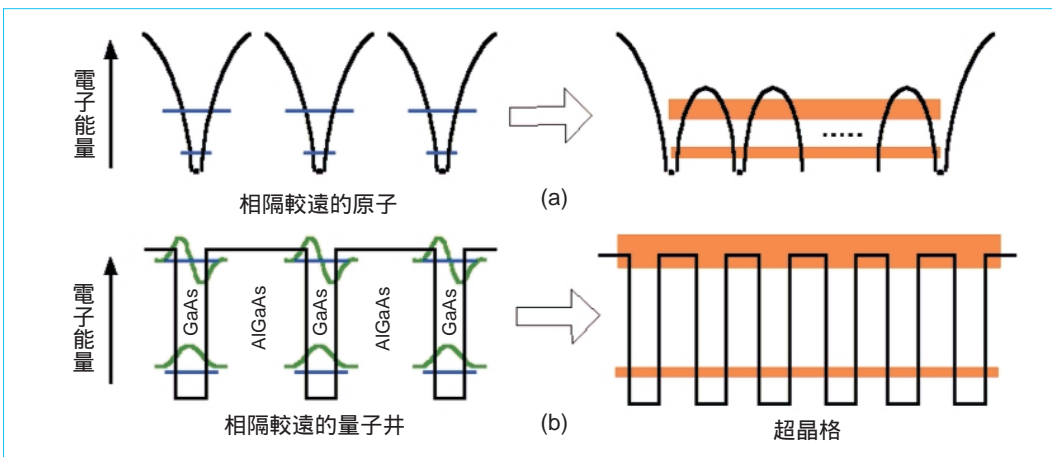


圖 5. (a) 原子位能及其週期性結構；(b) 量子井及超晶格的電位能圖。

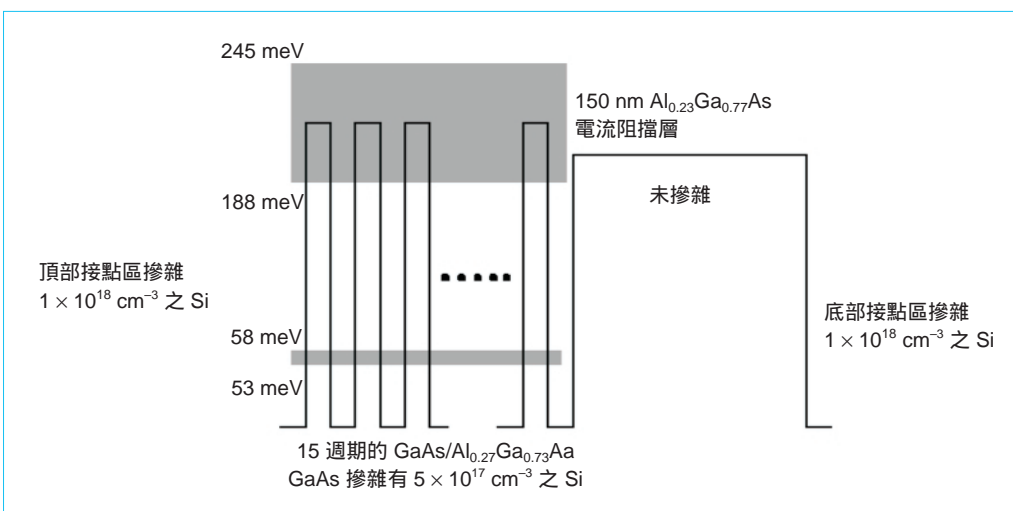


圖 6. 單超晶格偵測器之基本結構。

帶間間距，亦即所偵測紅外線波長的範圍，是可藉由調整能障高度、量子井及能障的寬度而改變的，因此偵測波長的可塑性非常大。

## 2. 單超晶格偵測器

我們第一代的單超晶格偵測器之基本結構如圖 6 所示。除了十五週期的超晶格外，尚有一寬能障，及前後兩接點區 (bottom and top contacts)。在超晶格部分，兩個迷你能帶的能量範圍如圖中所標

示者，其能量的零點即是在量子井的底部。其兩迷你能帶的能量差為 130 - 192 meV，而所相對應的波長範圍為 6.5 - 9.5  $\mu\text{m}$ 。比對圖 1 的波長顯示，這是針對室溫物體所輻射出的紅外線所設計的，亦即可應用於偵測人體熱影像，如圖 3 所示。

在圖 6 中的設計，另一值得注意的是，寬能障的高度比起第二迷你能帶的底部稍高出許多，這是為了過濾光電子之用。當這個偵測器外加偏壓時，頂部接點區接負端而底部接點區接正端，則底部接

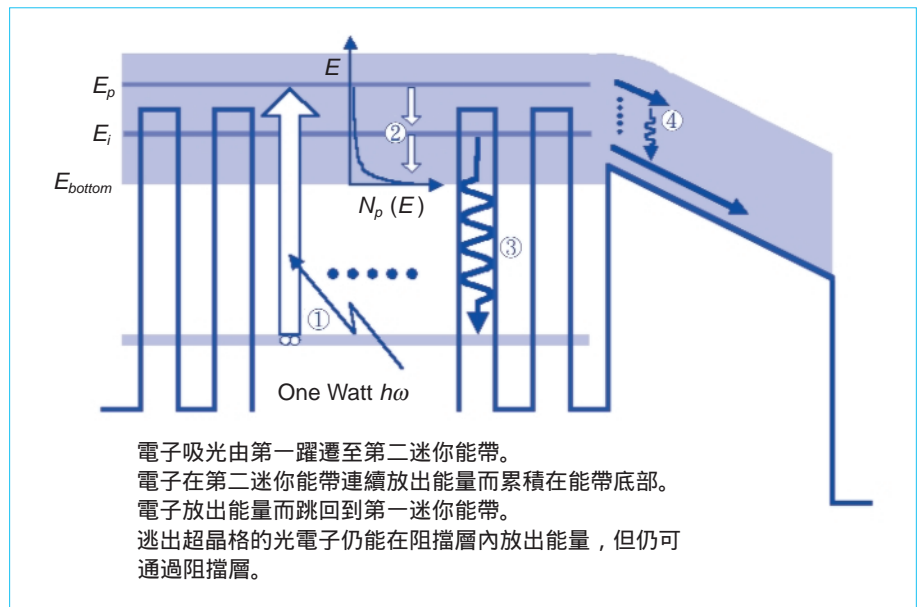


圖 7. 光電子在第二迷你能帶的播遷過程。

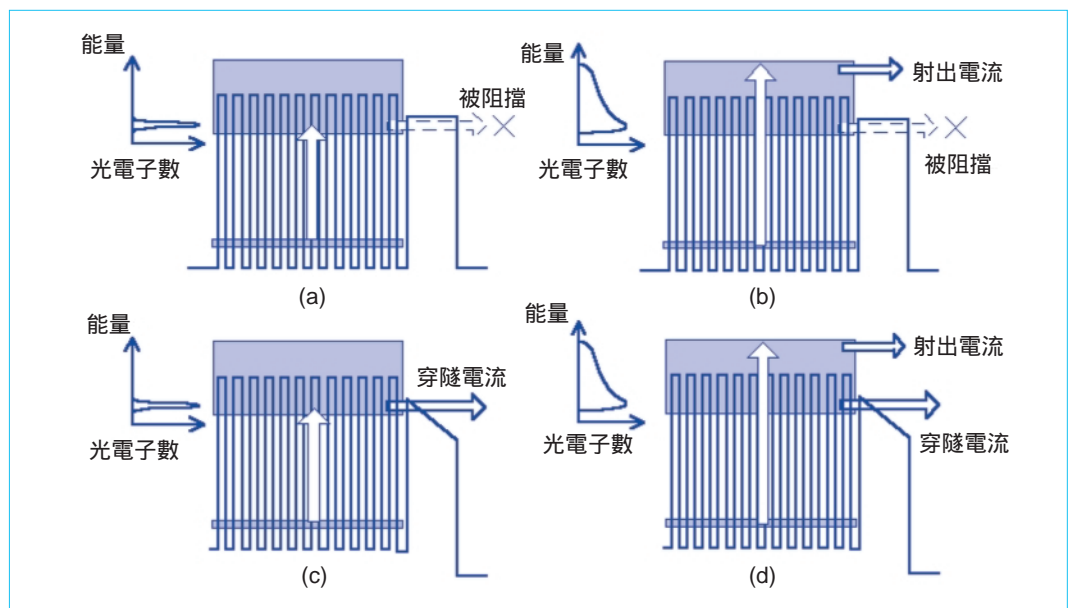


圖 8. 寬能障過濾光電子的工作原理。  
 (a) 入射最長波長，外加低偏壓時；  
 (b) 入射最短波長，外加低偏壓時；  
 (c) 入射最長波長，外加夠高偏壓時；  
 (d) 入射最短波長，外加夠高偏壓時。



點區的電位能下降，如圖 7 所示，這是由於電子帶負電的緣故。而且由於超晶格第一迷你能帶是導通的，其電阻值很低，因此幾乎所有的電壓都跨在寬能障上。當第一迷你能帶上的電子因吸光而躍遷到第二迷你能帶，如圖 7 中所標示為 (1) 者，即形成所謂的光電子。光電子在第二迷你能帶播遷時，其無法長時間維持在高能量狀態，所以有可能放出部分能量而累積在第二迷你能帶的底部，如圖 7 中所標示為 (2) 者。另一方面，光電子也有可能放出部分能量，然後直接跳回第一迷你能帶，如圖 7 中所標示為 (3) 者。當光電子脫離超晶格而抵達寬能障區時，其亦有可能放出能量但仍能躍過寬能障，如圖 7 中所標示為 (4) 者。簡而言之，由於上述光電子放出能量的過程，光電子在第二迷你能帶上的分佈，即如插圖  $N_p(E)$  所標示者，其中  $y$  軸代表能量， $x$  軸代表光電子數，亦即光電子會累積在第二迷你能帶的底部。

圖 8 顯示即為寬能障過濾光電子的工作原理。其中圖 (a) 及 (c) 是代表入射光為最長波長 ( $9.5 \mu\text{m}$ ) 時的情形，所有的光電子事實上均在第二迷你能帶的底部。在外加低偏壓時，即圖 8(a) 所示，由於寬能障的阻礙，所有的光電子均不能通過寬能障，因而沒有光電流形成。當外加夠高偏壓時，即圖 8(c) 所示，由於光電子穿隧 (tunneling) 效應而能通過寬能障。相對應地，圖 8(b) 及 (d) 圖是代表入射光為最短波長 ( $6.5 \mu\text{m}$ ) 時的情形，光電子大部份是累積在第二迷你能帶的底部，但仍有少部份是處在

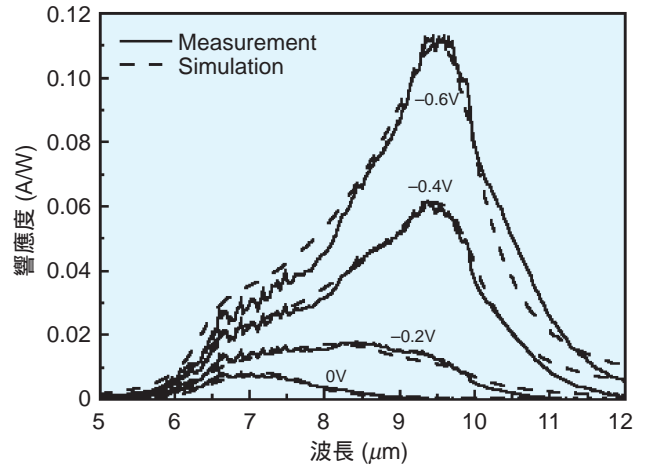


圖 9. 單超晶格偵測器的響應度。

高能狀態。在外加低偏壓時，即圖 8(b) 所示，由於寬能障僅阻礙低能量的光電子，而少量高能量的光電子，仍能射出 (emission) 超晶格而形成光電流。當外加夠高偏壓時，即圖 8(d) 所示，除射出的高能量光電子外，又由於穿隧效應而使低能量光電子也能通過寬能障。

綜合上述的結果，在接近零偏壓時，偵測器可偵測到短波長的訊號；隨著偏壓的增加，長波長的訊號也會跟著出現。圖 9 是單超晶格偵測器的響應度實驗結果。所謂響應度是指每一瓦功率的光所能轉換光電流的安培數。很明顯地，實驗結果符合上述的描述。對此偵測器而言，外加偏壓的大小是可調變響應度的大小及波長範圍。

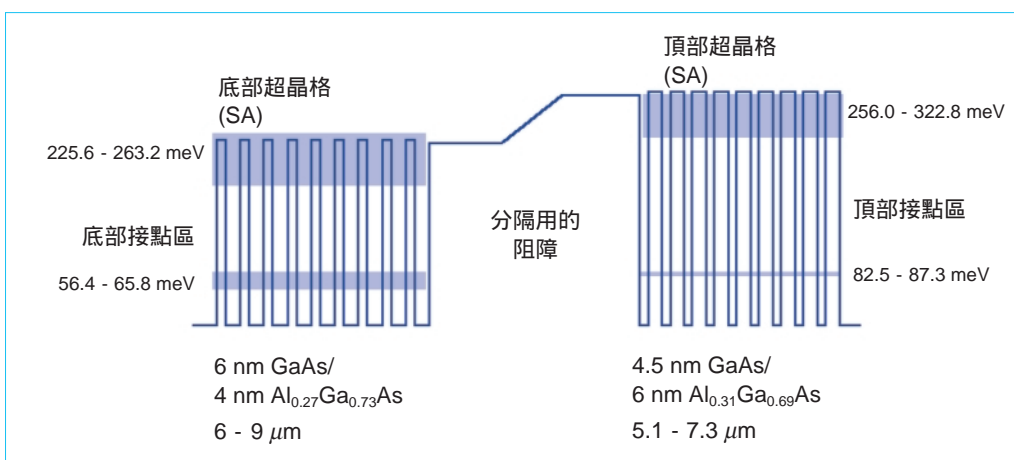


圖 10. 雙超晶格偵測器的基本結構圖。

### 3. 雙超晶格偵測器

我們的第二代偵測器是雙超晶格偵測器，其基本結構如圖 10 所示。在一漸增能障的前後各有一超晶格結構。其中底部超晶格結構是用於偵測 6 - 9  $\mu\text{m}$  波長的光，而頂部超晶格結構是用於偵測 5.1 - 7.3  $\mu\text{m}$  波長的光。在整個結構的頂部及底部，各有一接點區。

當外加偏壓跨在兩接點區時，以頂部接點區為正端，而底部接點區為負端，如圖 11 所示，電位能是底部超晶格高於頂部者。此時底部超晶格的光電子即可穿過寬能障而形成光電流。相對地，頂部超晶格的光電子並無法通過寬能障，而且可由頂部接點區的電子來接續，因此形成內部電流回路而無法形成光電流。換言之，正偏壓使得底部超晶格有作用而頂部者無。反之，負偏壓即會使得頂部超晶格有作用而底部者無。是故電壓的極性可用於交換超晶格的作用。

圖 12 顯示此偵測器對不同波長之紅外線，在不同偏壓下的響應度實驗結果。其中，在零偏壓及 -1.0 伏特之下的光電流響應峰值各出現在 6.4  $\mu\text{m}$  及 7.5  $\mu\text{m}$  之短波長；而且在電壓值逐漸變大的過程中，後者的響應值比前者增強的速率快許多，以致在 -1.0 伏特時，後者具主導性，而為前者的兩倍。在正偏壓時的情形相類似，在 0 及 1.0 伏特之下的光電流響應峰值各出現在 8.3  $\mu\text{m}$  及 10  $\mu\text{m}$  之長波長；而且在電壓值逐漸變大的過程中，後者的響應值比前者增強的速率快許多，以致在 1.0 伏特時，後者具主導性，而為前者的兩倍。此偵測器中 7.5  $\mu\text{m}$  及 10  $\mu\text{m}$  的光電流響應較大，在絕對值 1.0 伏特時各為 160 mA/W 及 120 mA/W，量值在同一

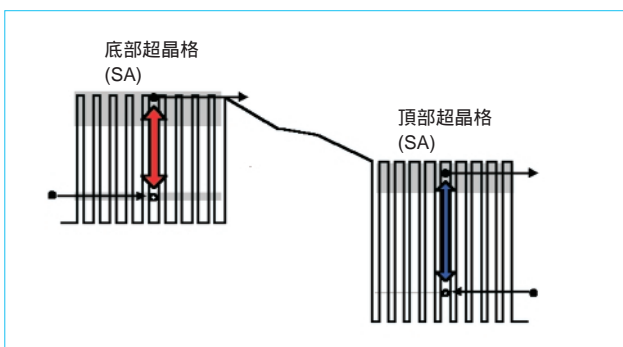


圖 11. 雙超晶格偵測器在正偏壓時的工作原理。

個數量級之內，而且正負偏壓間響應的重疊銜接，設計得極為恰當。同時其頻譜應不隨偵測器溫度的飄移而改變，這些優點使得此偵測器優於其它如以量子井結構所製作的多彩紅外線偵測器。

### 四、兼具偵測紅外線及可見光的陣列模組

這個模組的設計及製作是我們邁向 SoC 紀元的第一步。由於功能整合的複雜性，初步我們決定由一維線性陣列做起。而整個模組是由兩種不同基板 (substrate) 組合而成，一為 GaAs 基板，主要是建構多波段紅外線偵測器一維陣列；另一為 Si 基板，主要是建構 CMOS 可見光偵測器一維陣列及讀出電路。圖 13 顯示該模組的基本結構圖。在圖中虛線所圍的區域是 Si 基板上所集結的電路系統；包括 CMOS 可見光偵測陣列，可重置的訊號積分器 (reset and charge integrator)，對積分器訊號取樣的 CDS 電路，最後是 CMOS 暫存器 (register)，將訊號依序移出。相對地，實線所圍的區域是紅外線偵測器陣列，其相對的讀出電路也是建構在 Si 的基板上，而在兩塊基板間的訊號是靠打金線相連接的 (如圖中兩端圓圈的彎線所代表)。

由於讀出電路的設計過於專業，本文僅介紹至此。對於紅外線偵測器陣列的設計，如圖 14 所示。圖中一排斜線所標示的區域，即為一維紅外線偵測器陣列之所在；而每一方形區即為一個紅外線

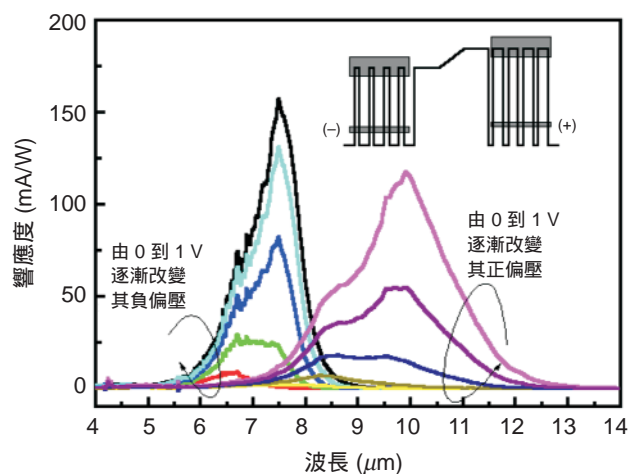


圖 12. 雙超晶格紅外線偵測器的響應度。

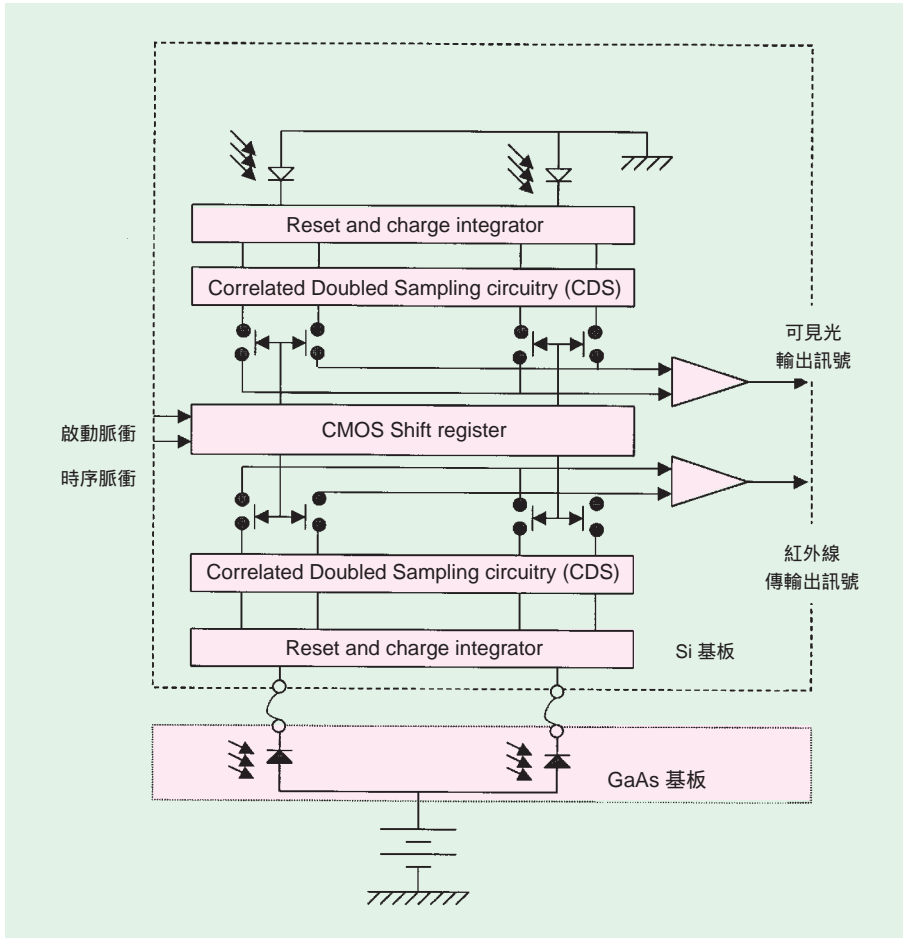


圖 13. 兼具偵測紅外線及可見光的陣列模組。

偵測器，稱為一個像素，其大小約為  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 。像素外圍连接到一金屬板者，是用於接通電流。而金屬板是為了與 Si 基板間打金線之用。而像素中央斜線區是用於通於紅外線，其側面結構圖，如圖 15 所示。在像素的表面，可以利用半導體的製程技術而製作出所謂的 V 型槽<sup>(6)</sup>；其功用在於捕光，其設計原理同於吸音海棉的設計。當光入射於 V 型槽內，即會連續反射直達底部，而折射進入半導體的部分則會經過灰色區的超晶格結構而被吸收。此外，在像素的側面則設計成 MIS (金屬—絕緣體—半導體, metal-insulator-semiconductor) 結構，並加以負偏壓，是為了防止半導體的漏電流，而金屬部分是可以反射紅外線的。如此的設計可增加光的補捉率，又能防止漏電流，可謂是一舉多得。

綜合偵測器及模組的設計簡介，我們認為 SoC 概念的成功與否，首先應建構在元件層次的功能增強，如此可以簡化系統設計的複雜度。事實上，圖

2 攝影系統的整合工作，提供了我們學習如何規化 SoC 的實際經驗。

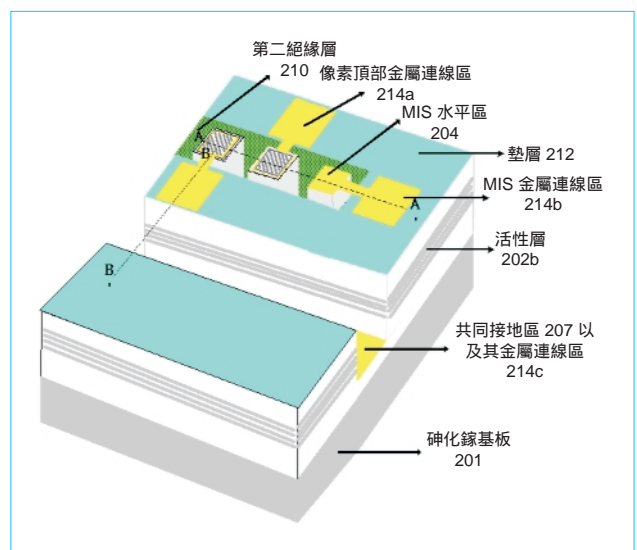


圖 14. 紅外線偵測器一維陣列。



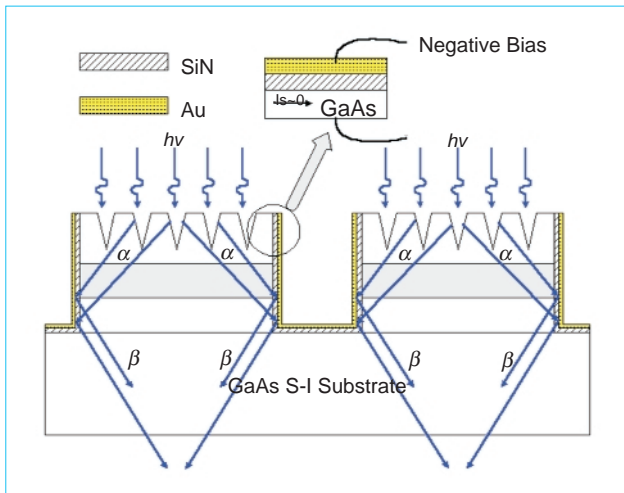


圖 15. 像素的側視圖。

## 五、紅外線偵測技術的應用

紅外線偵測技術自冷戰結束後，已逐漸由軍事用途擴展到民事用途。舉凡醫療、環保及工業檢測等應用上，均可發現紅外線偵測的應用空間正迅速擴大當中。在本文中，我們僅就與文中技術主題相關者介紹三例，以驗證我們發展紅外線攝影系統的想法。

### 1. 環保救難之用

我們之所以要發展兼具偵測紅外線及可見光的一維陣列模組，乃是該攝影系統可安裝於無人駕駛的飛行載具上，並與載具的飛行速度同步配合，如圖 16 所示，由模組負責橫向維度影像的捕捉，而飛行載具負責縱向維度位置的改變，如此即可掃描出二維的影像。其中，可見光的影像可用於定位，而紅外線影像可辨認出環境中較高溫度的物體。這項功能非常有益於山難或海難中尋找受難者之用，而且由於救難者不必親自冒險尋找，將可大量減輕救難風險，非常適合台灣救難隊的需要。

在平常，此飛行載具亦可應用於環保或巡查工作，尤其是針對某些有毒氣體所輻射出的紅外線而設計出的紅外線陣列，即可偵查出有毒氣體的污染源所在。在另一方面，配合可見光與紅外線影像的比對，我們應可學習到紅外線所看到的彩色世界應為何。

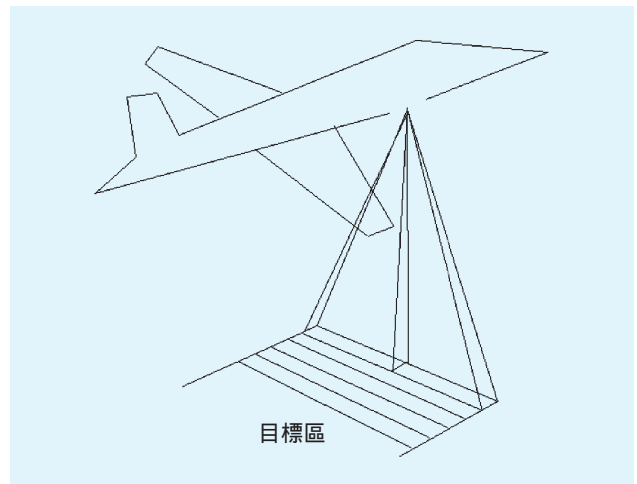


圖 16. 一維偵測器陣列配合無人載具可掃描出二維影像。

### 2. 遙測溫度

在第二節中我們曾介紹利用紅外線偵測器「看」溫度的方式，其基本要求是偵測器必須有兩種不同的光響應度。針對單超晶格偵測器的光響應度圖 9 而言，我們選擇 0 V 者為  $R_1(\lambda)$ ，-0.6 V 者為  $R_2(\lambda)$ ，標準的黑體輻射源為光源，而偵測器距光源約十公分，直接量取兩者所相對應的光電流，圖 17 中的黑點即代表黑體輻射的溫度對光電流比值的變化關係。而實曲線部分是依理論公式 (1) 計算所得的結果。由實驗與理論比對的結果，發現這個方式來看溫度是可行的。更進一步地，我們認

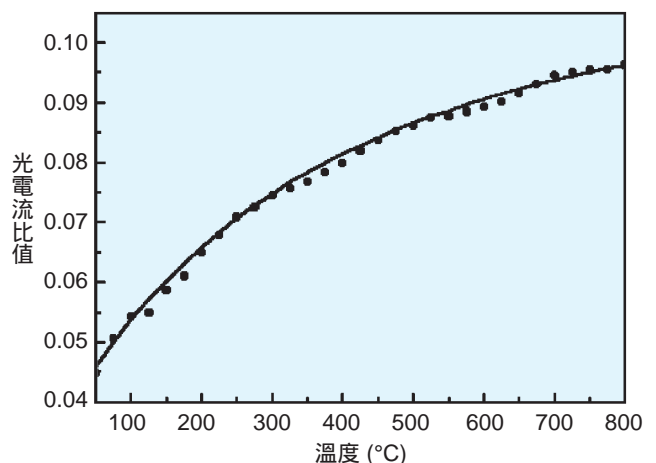


圖 17. 單超晶格偵測器所看到的溫度，其中的黑點是實驗值，曲線是理論值。

為：針對雙超晶格偵測器的光響應度，我們可選擇光響應度相當的兩者來進行本實驗，其準確度將可相對提高，這方面的確認我們正在進行中。

### 3. 積體電路上的應用

複雜的積體電路可藉由電腦輔助來設計。但實際完成的電路，卻常因電路功率消耗不均勻分佈，導致某部分電路因過熱而不能正常工作。是故，偵測電路中是否有溫度太高的部分就成為積體電路設計是否妥當的重要驗證工作之一。圖 18 顯示典型積體電路的熱影像，其中紅色的部分是代表溫度較高的部分，可能造成的原因是電流轉折的曲度太大，而導致有強大的電場分佈於該處。解決之道，就如同其它轉折區域，以漸變的方式來加以克服。

## 六、結論

紅外線攝影系統有極大的發展及應用空間。本文介紹了紅外線攝影系統的基本架構，尤其是針對偵測器本身及其相關陣列的設計原理，深入討論到我們多年來的努力成果—超晶格偵測器。這些結果證實了超晶格結構及寬能障間的組合，可造就出多樣化的紅外線偵測功能。隨著 SoC 概念的推行，我們也開始嚐試將偵測器陣列與讀出電路合組成功能性更完整的模組，使同時偵測紅外線及可見光成為一可能的任務。在文中我們也介紹了多彩紅外線偵測的重要性，也舉出一實例：利用多彩紅外線偵測器“看”溫度。相信屆時當我們完成兼具偵測多波段紅外線及可見光攝影系統之日，利用該攝影系統於救難環保工作上或遙測溫度的分佈，就變成較輕鬆的工作，而且還可發展其它如醫療上的應用。

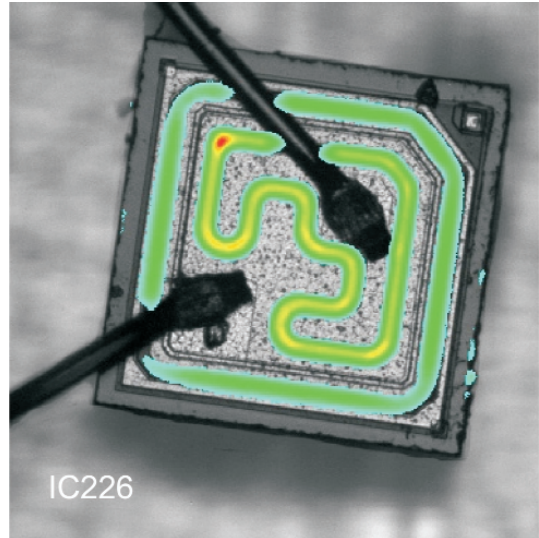


圖 18. 積體電路的熱影像典型例子。

### 參考文獻

1. C. J. Chen, K. K. Choi, M. Z. Tidrow, and D. C. Tsui, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1446 (1996).
2. M. C. Hsu, Y. F. Hsu, S. Y. Lin and C. H. Kuan, *IEEE Transaction on Electron Devices*, **47**, 944 (2000).
3. C. C. Chen, H. C. Chen, M. C. Hsu, and C. H. Kuan, *Journal of Applied Physics*, **91**, 943 (2002).
4. C. C. Chen, H. C. Chen, C.H. Kuan, S. D. Lin, and C. P. Lee, *Applied Physics Letters*, **80**, 2251 (2002).
5. *Laser Focus World*, June (2002).
6. C. C. Huang and C. H. Kuan, *Bulletin of the College of Engineering, N. T. U.*, No. 79, 61 (2000).

---

管傑雄先生為美國普林斯頓大學電機工程博士，現任國立臺灣大學電機工程學系副教授。

Chieh-Hsiung Kuan received his Ph.D. in electrical engineering from Princeton University, USA. He is currently an associate professor in the department of electrical engineering at National Taiwan University.