

InGaAs 線型短波紅外取像模組

Linear InGaAs SWIR Image Sensing Module

林群富、吳孟修、蔡和霖、黃泰綸、黃哲政、周世傑

Chun-Fu Lin, Meng-Hsiu Wu, Ho-Lin Tsay, Tai-Lun Huang, Che-Cheng Huang, Shyh-Jye Jou

紅外線影像對熱源具有高敏感度等特性，可應用於晶圓缺陷檢測、軟性電路板缺陷檢測等等，因此紅外線取像系統為自動光學檢測 (AOI) 之關鍵零組件。本研究以 InGaAs 線型短波紅外感測器作為基礎，發展線型短波紅外取像模組。電子電路系統以模組之觀念進行設計規劃，經電路設計製作、韌體程式撰寫、軟體程式撰寫、軟硬體整合測試，完成整體模組之製作。本 InGaAs 線型短波紅外取像模組係經由光電參數量測，取得系統之光譜響應，搭配鏡頭及對焦工作，實際進行取像。

The image of infrared rays is provided with high sensitivity to thermo-object. It could be applied to defect detection of flexible printed circuit board and defect detection of wafer. As a result, infrared rays image grabbing system is a key component in the region of automatic optical inspection (AOI). The research is based on the InGaAs short-wave detector to develop linear short-wave infrared rays module. The concept of module is described to coding of firmware and software and the integration testing of software and hardware, the module is finished and presented. The spectral response is obtained by measuring of optic-electrical parameter with the InGaAs short-wave infrared rays module. After completed with lens and focusing, the object image of infrared rays is proceeding.

一、導論

影像感測器之目的是為了將拍攝的影像轉換成電氣訊號，成為電氣訊號後影像可經由傳輸途徑傳送至遠端播放，方便影像之儲存與傳送。早期具有光電轉換特性之元件均由真空管所製作，如光電映像管 (iconoscope)，在真空管中放置雲母板，雲母板上塗抹具有光電轉換效應的鈹，利用在真空中可自由操作電子的性質，當光線通過鏡頭後，即可在雲母板上成像。但是由於映像管有接上電源無法立

即使用，以及工作電壓高、耗電力大、燃燒導致壽命變短等缺點，因此電晶體發明後，由於半導體 Si 具有將接受的光轉換成電氣的光電轉換性質，於是使用半導體 Si 製作光電感測器取代真空管成為科學家與工程師們努力的方向。

1969 年貝爾實驗室 W. S. Boyle 與 G. E. Smith 成功地使用半導體發明出電荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD)。CCD 影像感測器由實驗室產生後，經二、三十年實用化之努力，發展至今日，相較於互補式金屬氧化半導體元件 (complementary

metal oxide semiconductor, CMOS) 感測器，CCD 具有較高靈敏度、較高訊雜比與較好的穩定性，遂成為高解析度影像感測器之主流。

二、InGaAs 短波紅外感測器

一般 CCD 感測器之光電轉換材料由 Si 所製成，對可見光而言，其光電轉換靈敏度雖極高，但在可見光之外的波長範圍內，尤其是在紅外光的範圍內，Si 並不具光電轉換的特性。故本研究使用 InGaAs III-V 族元素所組成之紅外線 CCD 感測器，以取得紅外線影像。

紅外線的頻率範圍一般定義為光譜上可見光之後長波長的部分。可見光波長範圍為 400–700 nm，之後長波長部分即為紅外光之波長範圍。紅外光依波長之長短分成四個不同區段：短波紅外 (SWIR)、中波紅外 (MWIR)、長波紅外 (LWIR) 及遠紅外 (far-infrared)。短波紅外光波長範圍為 0.7–3 μm ，中波紅外光波長範圍為 3–8 μm ，長波紅外光波長範圍為 8–14 μm ，遠紅外光波長範圍為 > 14 μm 。本研究選用之 InGaAs 紅外線 CCD 感測器，其反應光譜分布範圍為波長 900–1700 nm，屬於短波紅外 (SWIR) 之範圍。

與一般可見光影像不同的是，紅外線影像對熱源有高敏感度與高穿透力之特點，故可在多方面應用，如國防安全、天文偵測、工業區污染源的監測、居家保全系統、晶圓缺陷檢測與軟性電路板缺陷檢測等。其中應用於晶圓缺陷檢測與軟性電路板缺陷檢測等應用，紅外線取像系統即扮演自動光學

檢測 (automatic optical inspection, AOI) 機台之關鍵零組件的角色。

本短波紅外取像模組係以 InGaAs 之紅外線 CCD 感測器進行設計及製造。感測器是由 256 × 1 個像素 (pixel) 所組成的晶片，為一條線型感測器。它的像素大小 (pitch) 為 50 × 250 μm ，它的響應值 (responsivity) 在基底電壓為 -5 V、光波長為 1310 nm 時為 0.9 mA/mW，而量子效率 (quantum efficiency) 在 1000–1650 nm 間為 70%，在 25 °C 的暗電流小於 300 pA。

三、系統架構與製作

1. InGaAs 線型短波紅外取像模組電子電路系統架構

InGaAs 線型短波紅外取像模組由電子電路模組與取像鏡頭所組成。本文主要探討電子電路之電路設計、韌體程式撰寫、軟體程式撰寫與軟硬體整合測試方式，同時由於本紅外線感測器為一維線型感測器，故需建立一標準取像平台以取得影像，此取像平台也將於本文中討論。InGaAs 線型短波紅外取像模組電子電路系統如圖 1 所示，分為兩部分：影像資料產生模組與數位訊號傳輸模組。影像資料產生模組接收光訊號，轉換成為電訊號，輸出 12 bits 之數位資料至數位訊號傳輸模組。數位訊號傳輸模組收取 12 bits 數位資料後，將資料轉成 USB 2.0 格式之標準資料，經由 USB 2.0 傳輸介面傳輸至 PC 端。若 PC 端欲下控制指令操作短波紅外取像模組，亦經由此 USB 2.0 傳輸介面傳送控制訊號。數位訊號傳輸模組也包含整個 InGaAs 線型短波紅外取像模組之電源供應部分。

圖 2 所示為影像資料產生模組之方塊圖。使用時脈產生電路產生 InGaAs 線型短波紅外感測器所需之各種驅動時脈，於是短波紅外感測器可以輸出正確之光電轉換訊號；此光電轉換訊號經前端電路放大，再傳送至類比/數位轉換電路 (analog/digital converter)，進行類比電壓訊號轉數位電壓訊號之量化工作，將資料量化成為 12 bits 之數位資料後，輸出至數位訊號傳輸模組。圖 2 中所示之 CCD line clock、CCD serial transfer clock、CCD

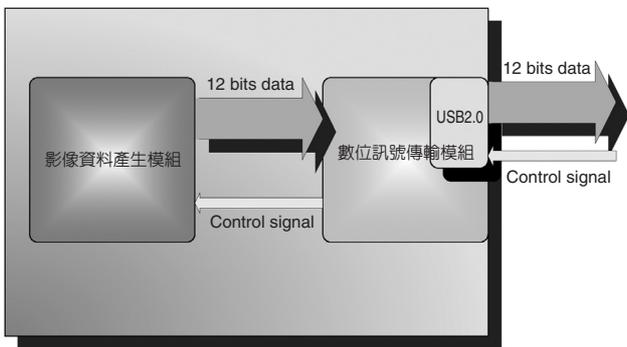


圖 1. InGaAs 線型短波紅外取像模組電子電路系統。

read_out clock、CCD reset clock、Clamp clock 即為短波紅外感測器所需之各種驅動時脈，這些驅動時脈將驅動 CCD 產生光電轉換訊號，此部分電路對驅動時脈的準確度要求較高，準確度將會嚴重影響短波紅外感測器是否能正確輸出光電轉換訊號。感測器輸出之光電訊號經圖 2 中之前端電路 (pre-amplifier and line clamp) 進行訊號放大。由於電路模組工作於高頻時脈下，故前端電路對抗雜訊能力要求較高，雜訊將會嚴重影響短波紅外感測器輸出之光電訊號。

短波紅外感測器輸出之光電訊號經放大後，進入圖 2 中之 ADC 方塊部分進行類比電壓訊號轉數位電壓訊號之量化工作，類比／數位轉換電路所需之特定取樣觸發訊號觸發，經相位調整電路 (phasing adjust) 後送至類比／數位轉換電路。類比／數位轉換電路輸出之 12 bits 資料經數位訊號處理後再傳輸至數位訊號傳輸模組。

本 InGaAs 線型短波紅外取像模組的時脈產生電路部分，使用複雜可程式邏輯元件 (complex programmable logic device, CPLD) 晶片進行電路規劃。CPLD 晶片之使用方法為透過撰寫硬體描述語言 (verilog hardware language)，產生 InGaAs 短波紅外線感測器所需之時脈驅動訊號，再經由 Altera 之發展軟體 Quartus II 模擬與實現燒錄至晶片上。使用 CPLD 晶片進行電路規劃，可用硬體描述語言 (HDL) 透過編譯器 (compiler) 編輯內部之邏輯閘，以實現複雜之電路設計，且可重複使用。單一晶片可用硬體描述語言設計實現複雜電路，故具有簡化電子電路設計布局、加速電子電路設計時程、可重複使用之性質。本 InGaAs 線型短波紅外取像模組的時脈產生電路部分選用 Altera 生產之 EPM7160STC CPLD，該類 CPLD 具有 100 隻腳位，內部之 logic element 為 160 個。本取像模組選用之短波紅外感測器為 Hamamatsu 生產之 G9211-256S，其所需之驅動時脈如圖 3 所示。

圖 3 InGaAs 線型短波紅外感測器驅動時脈圖中，CLK 為感測器週期性像素觸發訊號，RESET 為感測器週期性線觸發訊號，RESET 正脈衝寬度之時間為感測器之曝光時間，TRIGGER 則為類比／數位轉換電路所需之取樣觸發訊號，VIDEO 為

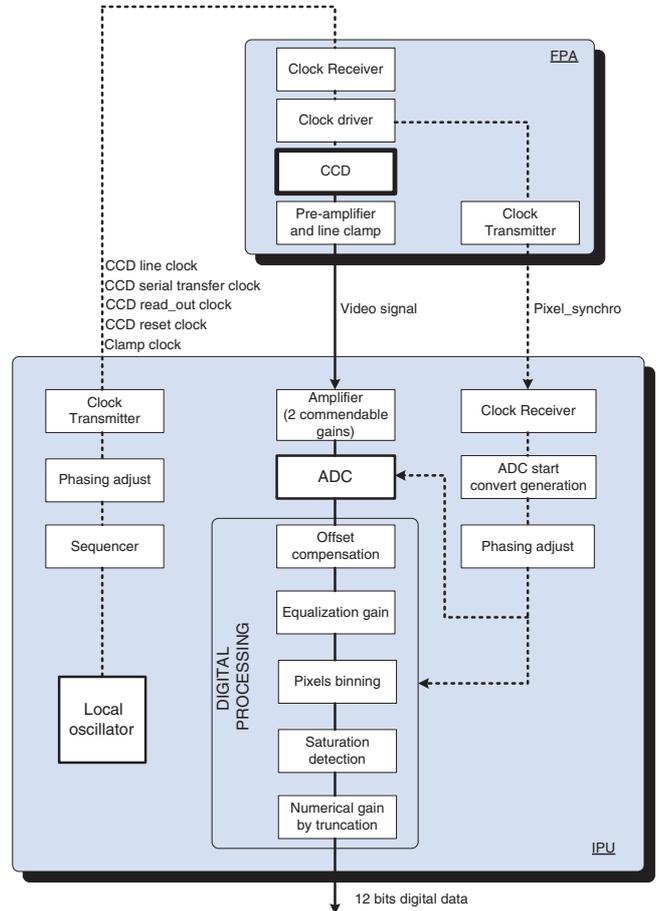


圖2 影像資料產生模組之方塊圖。

InGaAs 線型短波紅外感測器輸出之光電轉換訊號。本 InGaAs 線型短波紅外取像模組選用之類比／數位轉換晶片為 Analog Devices 公司所生產之 AD9220 晶片，具有單電源的特色及 12 bits 的解析度，其最快的轉換頻率為 10 MHz。本 InGaAs 線型短波紅外取像模組使用之類比／數位轉換取樣率為 3 MHz，資料輸出 line rate 為 75 lines/s。

圖 4 所示為數位訊號傳輸模組之方塊圖。數位訊號傳輸模組之功能，主要為提供取像所得之 12 bits 影像資料傳輸介面、PC 端下達之控制訊號傳輸介面，以及整個 InGaAs 線型短波紅外取像模組電子電路系統之電源供應。

2. InGaAs 線型短波紅外取像模組實現與量測

圖 5 所示為 InGaAs 線型短波紅外取像模組之電路實體圖。圖 5 中最上層之長方形物體即為

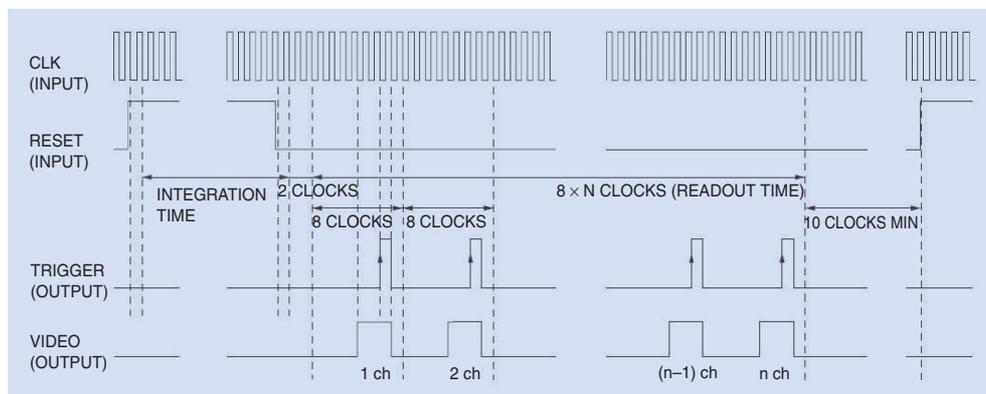


圖 3. InGaAs 線型短波紅外感測器驅動時脈圖。

InGaAs 線型短波紅外感測器，製作電路時為了達成系統最佳緊密化，設計成電路板寬度與感測器之寬度一樣寬。電路分為上下兩層，上層電路板所放置之電路盡量減少，避免雜訊干擾線型短波紅外感測器之訊號，其他部分之電路設計均置於下層電路板中。由於整個電子電路系統溫度最高之部分為電源供應電路中之 DC-DC converter，故將之放置於系統的最下方。本 InGaAs 線型短波紅外取像模組經由光電參數量測，取得系統之光譜響應 (spectral response) 如圖 6 所示。

圖 7 為 InGaAs 線型短波紅外取像模組之實體圖，由圖 7(b) 可知模組共有兩個對外連接埠，一個為下方之電源線接觸孔，送入 24 V 之直流電壓源；另一個則為資料傳輸之 USB 2.0 連接孔位，當 PC 端欲下控制指令操作短波紅外取像模組，亦經由此 USB 2.0 傳輸介面傳送控制訊號。InGaAs 線型短波紅外取像模組機構設計考量整體之散熱目的，使用 12 V 之獨立電源風扇，導出電子電路系統之熱

量，避免電子電路系統於密閉空間工作時間過長，溫度升高而造成大量熱雜訊，影響系統取像品質。

3. 影像擷取與使用者圖控界面軟體

影像擷取部分採用 USB 2.0 傳輸介面達成。USB 2.0 之優點為可熱插拔、隨插即用 (plug-and-play)，最多同時可連接 127 個裝置。此外，USB 2.0 利用傳輸時序的縮短 (微訊框) 以及相關的傳輸技術，將整個傳輸速度從原本的 12 Mbps 拉到 480 Mbps，整整提升了 40 倍。USB 2.0 的裝置可分為 (1) 全速裝置 (full-speed devices)：應用如 CCD，外接硬碟等裝置，這些裝置的傳輸最高速率為 12 Mbps。(2) 低速裝置 (low-speed devices)：如鍵盤與滑鼠等裝置，其傳輸最高速率為 1.5 Mbps。(3) 高速裝置 (high-speed devices)：為 USB 2.0 速率最高的規格，也應用於 CCD 和外接式硬碟等裝置。其最高速率可達 480 Mbps。

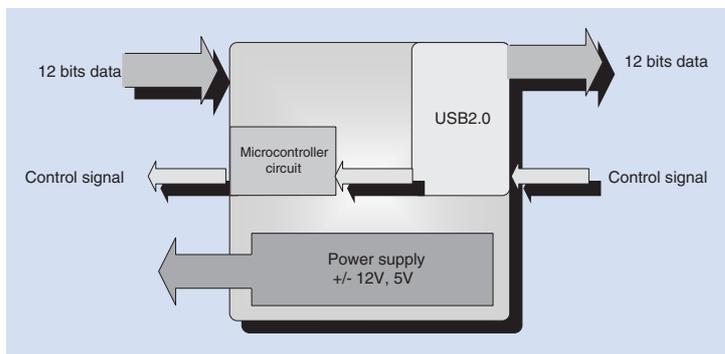


圖 4. 數位訊號傳輸模組之方塊圖。

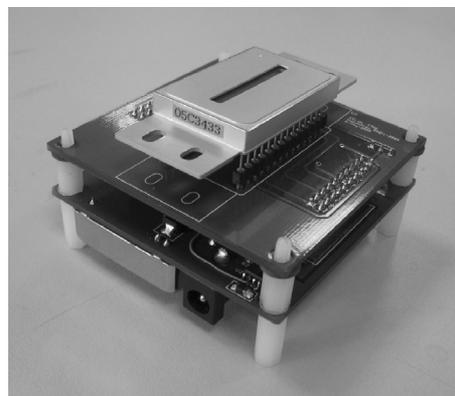


圖 5. InGaAs 線型短波紅外取像模組之電路實體圖。

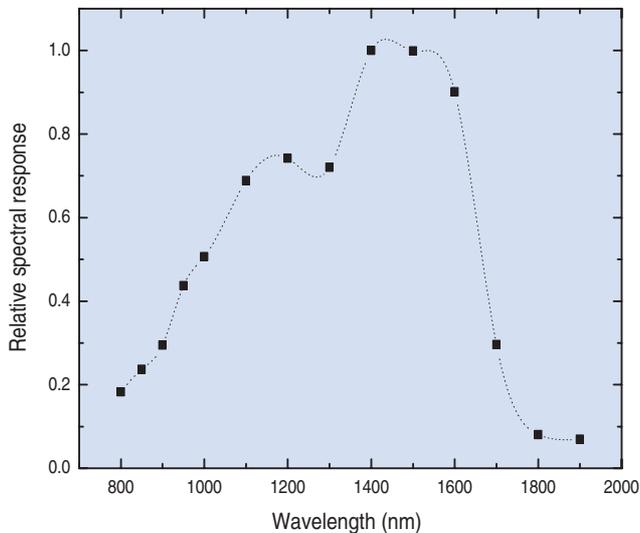


圖 6. InGaAs 線型短波紅外取像模組之光譜響應。

USB 2.0 的傳輸模式由四種方式來進行：

- (1) 控制傳輸：用來提供主機與裝置間的配置、命令或狀態的通訊協定，分為設定階段、資料階段以及狀態階段。除此之外，控制傳輸又可再分為控制型讀取、控制型寫入與無資料控制三種傳輸型態。
- (2) 中斷傳輸：是靠 PC 週期性輪詢的方式，得知是否有裝置資料要傳送給 PC，其最常應用為滑鼠與鍵盤，例如當滑鼠移動或鍵盤按下按鍵後，就可以經由 PC 主機的輪詢將小量的資料傳回給主機，進而瞭解到剛剛滑鼠或是鍵盤的動作行為。
- (3) 巨量傳輸：屬於單向或雙向的傳輸，因為此方法有交握的機制，必須等到資料正確傳輸後才停止，若有某些錯誤而產生傳送失誤，就會再

重新傳送一次，所以無固定的傳輸速率。例如印表機與掃描機這類裝置，需要很精準的傳送巨量資料，卻又不一定需求非常高速的時效，便可使用此項傳輸。

- (4) 等時傳輸：屬於單向或雙向的傳輸，於初始狀態便與主機協定好固定的頻寬，故可維持一定的傳輸速率，同時也確保裝置的傳送頻率不會被扭曲，例如麥克風與 CCD 等裝置。

本研究根據 USB 2.0 模組控制功能的特性，為線型短波紅外取像模組選取了巨量傳輸與等時傳輸來達到資料通訊與命令控制的目的。利用等時模式傳送影像訊號至主機，再將訊號儲存至電腦的硬碟。另外，利用巨量模式傳送已設定的控制命令訊號到相機上面，進而設定相機之各項功能。使用兩種不同的模式操作，主要是考慮 USB 2.0 晶片的整體特性，使用等時模式傳輸可以即時傳輸影像訊號，增加影像資料抓取的速度；而巨量模式具有資料檢驗的功能，故可保證設定命令可以完整的傳達。此軟體的驅動程式組態檔主要列舉了裝置的版本、顯示名稱的字串與時間日期等。使用者圖控界面軟體主要是以 Microsoft Visual Studio 6.0 版設計，另外，鑲嵌入 National Instruments (NI) LabWindows Ver. 7.0 之 ActiveX 元件來完成圖控界面軟體。此軟體主要操控 USB 2.0 模組之功能，使用者圖控界面軟體如圖 8 所示。程式連結 Cypress USB 2.0 晶片的動態函式庫檔案名稱與驅動程式檔案名稱均列於表 1。

圖控介面軟體的基本功能包含五個部分：(1) 相機裝置偵測，(2) 即時影像波形顯示，(3) 座標軸設定，(4) 無段式積分時間設定，(5) 系統參數顯



圖 7.
(a) InGaAs 線型短波紅外取像模組之實體圖，(b) InGaAs 線型短波紅外取像模組之實體圖(背面)。

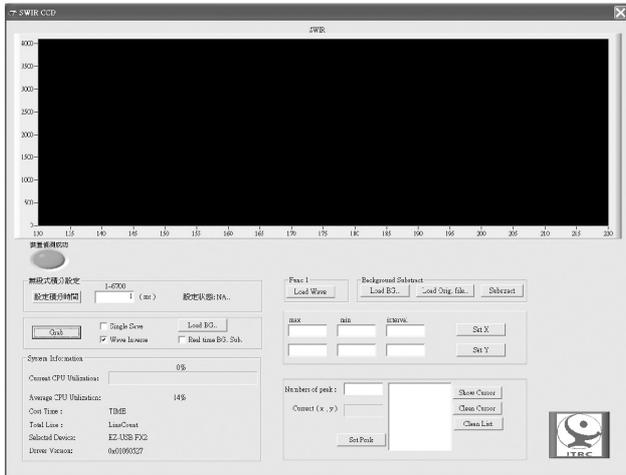


圖 8. 使用者圖控界面軟體。

示。可藉由這些基本功能簡易的操作線型短波紅外取像模組，達到擷取影像以及儲存影像的目的。

4. 移動平台建構

因為此線型短波紅外相機為線型式的感測器，若要呈現完整的一張圖像，須採用推掃式 (push broom) 掃描來構成二維圖像，其概念非常類似掃描機。本研究利用 NEAT 公司製造的 XYMR™ Microscope Stage，其型號為 XYMR-8080，精確度可達 30 μm，重複精度為 1 μm，可符合擷取影像時所需之精度與速度。移動平台連接至控制器，進行驅動與控制行為。

四、實驗測試

完成各部分的次模組、軟體與軟體設計後，欲測試整個模組的特性，我們設計了兩個實驗測試的環境，一是感測器對焦，其目的係為校正對準鏡頭與感測器的相關位置，另一則是室內取像的測試，其目的為觀測影像之品質與短波紅外影像之特性。

1. 感測器對焦

對焦的意義即為將鏡頭放至感測器的焦平面，對焦的工作首先需將感測器固定於光學桌上，利用點光源發射出光線，透過準直儀 (collimator) 產生準直光，再投射至感測器上，同時觀察到所擷取的視訊訊號之輪廓圖，此時由於點光源的尺寸很小，

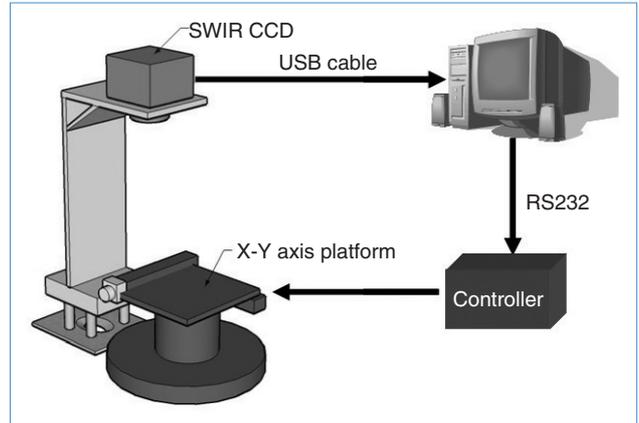


圖 9. 取像系統概念圖。

在感測器的輪廓圖會產生一個尖峰，觀測此尖峰的斜率與半高寬，接著移動鏡頭位置重複調整至半高寬最窄，即為焦距的最佳位置，亦即完成對焦的工作。

2. 室內取像測試

完成對焦的工作後，便可開始著手進行擷取影像的任務。室內取像總共包含了以下 9 種組件：(1) 線型短波紅外相機模組、(2) 取像電腦、(3) X-Y 兩軸移動平台、(4) Z 軸移動平台、(5) 平台驅動控制器、(6) 線型短波紅外相機模組支撐架、(7) 控制器驅動平台纜線、(8) USB 2.0 連接線及 (9) 電腦驅動控制器連接線，其取像系統概念圖如圖 9 所示。取像流程如下：

- (1) 將取像的目標物固定在 X-Y 軸的移動平台上。
- (2) 於擷取控制軟體內設定 X-Y 軸移動平台的移動速度 (V) 與時間 (T) 相關參數。X-Y 軸移動平台移動速度的設定，乃根據短波紅外感測器的像素速率 (pixel rate, pr)、取像目標物的距離 (d)、取像目標物的解析度 (O)、像素大小 (p) 以及焦

表 1. 連結 Cypress USB2.0 晶片之動態函式庫與驅動程式檔案。

連結目標	動態函式庫檔案	驅動程式檔案
Cypress USB 2.0 晶片	CyUSB.h CyUSB.lib CyUSB.dll	CyUSB.sys CyUSB.inf
NI 顯示元件	CWUI.ocx	

距 (f) 所決定而成，其感測器像素與取像目標物相關位置示意圖如圖 10 所示。其中經由相似三角形的公式可求得 $O = p/f \cdot d$ ，再由 $V = O/pr$ 得到所需之移動速度，接著由取像目標物體的總長度除以解析度來獲得所需移動的時間 (T)。

- (3) 調整鏡頭的像距至最佳位置，調整的步驟與上一節對焦的步驟相似。
- (4) 調整鏡頭的光圈至適當光亮度，避免產生漏光 (smearing) 的現象。
- (5) 於擷取控制軟體中啟動連續擷取影像之功能，此功能包含了擷取影像與儲存檔案。

3. 實驗結果

在此實驗中，取像目標物為烙鐵，產生的結果如圖 11、12、13 及 14 所示，其中圖 11 為一般商

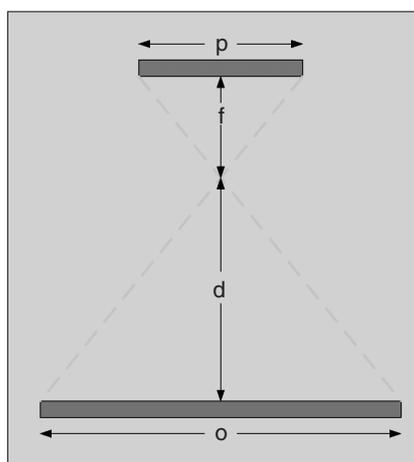


圖 10. 感測器像素與取像目標物相關位置示意圖。



圖 11. 烙鐵於室溫下，使用商業數位相機拍攝。

業規格的數位相機所拍攝而成。同時將實驗產生的影像圖 12 與圖 11 比較，可以明顯地觀察到，在烙鐵未加熱前，烙鐵前端錐頭部分並無差異，亦即兩者都呈現無發光的狀態，直到烙鐵經過加熱後，使用商業數位相機拍攝的影像 (圖 13) 仍然與之前並無不同之處，可是觀察圖 14 可以明顯的發覺，烙鐵前端錐頭已經輻射出光亮，其原因乃為烙鐵經由加熱後會輻射出 $900 - 1700 \text{ nm}$ 波長的短波紅外光線。故經由實驗結果，觀察到本研究研發製作的短波紅外取像模組可拍攝出短波紅外波段之光線。再觀察接近烙鐵前端錐頭的區域也有些許亮光，且由明亮至黑暗漸層的方式慢慢減少光度，其原因乃烙鐵溫度分布是由烙鐵的前端至後端漸漸降低，故可觀察出此現象。



圖 12. 烙鐵於室溫下，使用短波紅外取像模組拍攝。



圖 13. 烙鐵加熱至 300°C 下，使用商業數位相機拍攝。



圖 14. 烙鐵加熱至 300 °C，使用短波紅外取像模組拍攝。

五、結論

經由電路的設計、布線、製造、組裝、整合與除錯，並且配合 USB 2.0 模組韌體的設計與使用者圖控介面軟體的撰寫，本研究於初期完成了整個取像模組，同時量測了光電相關參數，取得了線型短波紅外取像模組的光電特性及初步性能。另外，經由實驗室對焦過程與實際的室內取像流程，可以觀察整個短波紅外取像系統的影像品質，以及可以藉由拍攝烙鐵輻射出的短波紅外光線，來觀察短波紅外光線的現象，成功的驗證了此實驗的可行性與取像模組的可用性。其應用性方面，例如搭配光源、光纖、光柵、濾光片與分光鏡頭等組件，並且執行輻射度校正與光譜定址等細項工作，概念上便可完成光譜儀的製造。另外，線型短波紅外取像模組亦可應用於晶圓缺陷整測方面，其原理乃由於短波紅外線可以穿透晶圓矽晶體，利用此特性便可檢測特定項目的晶圓缺陷。由此可知，線型短波紅外取像模組有十分廣泛的應用性，從農漁牧業、食品加工業、化學產業、半導體產業，一直到生物醫學等，均十分受到重視，未來之發展性極高。

參考文獻

1. 許永和, 微處理機-USB 週邊裝置設計與應用, 長高電腦圖書.
 2. SWIR 光譜儀系統設計開發 (SWIRS-RP-001-ITRC), 國研院儀科中心.
 3. SWIR 光譜儀取樣分析與控制軟體 (SWIRS-RP-002-ITRC), 國研院儀科中心.
 4. L. J. Pinson, *Electro-Optics*, University of Colorado, Colorado.
 5. 米本和也, CCD/CMOS 影像感測器之基礎與應用, 全華科技圖書.
-
- 林群富先生為中原大學電機工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 吳孟修先生為國立成功大學工程科學碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 蔡和霖先生為國立中山大學電機工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
 - 黃泰綸先生為國立中興大學電機工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 黃哲政先生為國立中央大學光電科學碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 周世傑先生為國立雲林科技大學電機工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - Chun-Fu Lin received his M.S. in electrical engineering from Chung Yuan Christian University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Meng-Hsiu Wu received his M.S. in engineering science from National Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Ho-Lin Tsay received his Ph.D. in electrical engineering from National Sun Yat-Sen University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Tai-Lun Huang received the M.S. in electrical engineering from National Chung Hsing University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Che-Cheng Huang received his M.S. in optical science from National Central University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Shyh-Jye Jou received his M.S. in electrical engineering from National Yunlin University of Science and Technology. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.