

# 光度計及影像儀系統研製及其應用

## Development of Photometer and Imager System

李龍正、張勝聰、黃鼎名

Long-Jeng Lee, Shenq-Tsong Chang, Ting-Ming Huang

光度計及影像儀系統研製計畫起源於參與華衛二號科學酬載研究，為國科會精密儀器發展中心研製類似科學酬載拍攝高空向上閃電之地面模組，儀器系統包括三波段光度計 (777 nm、428 nm、650–900 nm) 和低照度影像儀。除驗證科學酬載光學實驗的功能外，未來將應用於地面閃電精靈觀測實驗。本文也將說明光度計和影像儀的其他應用，包括半導體製程真空測漏。

The development of photometer and imager system was derived from joining the study of science payload of ROCSAT II. The aim was to develop three bands (777 nm, 428 nm, 650–900 nm) of photometers and the imager for low level of light, and to verify the function of optical experiment of science payload. It can be applied to observation of red sprites on the ground. The development of photometer and imager system will be introduced, and other future application as well.

### 一、前言

中華衛星二號科學酬載 (ISUAL) 「高空大氣閃電影像儀」<sup>(1,2)</sup> 的研發團隊包括國立成功大學<sup>(2)</sup>、美國加州大學柏克萊分校 (UC Berkley, UCB)<sup>(3)</sup>、日本東北大學 (Tohoku University)<sup>(4)</sup>、太空計畫室及國科會精密儀器發展中心 (以下簡稱精儀中心)，由國家太空計畫室和 UCB 負責統籌，國立成功大學擔任科學團隊負責單位。本科學酬載主要任務是建立太空科學觀測平台，於軌道中觀測高空閃電時所發生的奇異現象，特別是在閃電上方產生紅色精靈 (sprites) 和相關現象，其次也會在軌道的南北極觀測極光。科學酬載系統含有偵測光譜輻射量的光度計和擷取給定波段的影像儀，以上兩者在 UCB 研製，而另外一項陣列式光度計由日本東北大學製

作，其電控系統仍由 UCB 統籌研製。

閃電過後一瞬間，在地面上帶來驚雷和耀眼的閃電，而在雲層上方，則有著令人驚奇的自然現象，有如精靈般紅色閃光在高空跳躍，由於其發生時間極為短暫，肉眼難以觀看。在 1990 年首次由 Franz<sup>(5)</sup> 等人提出低光度攝影機記錄紅色精靈的報告，並說明它可能的大自然反應機制，於此紅色精靈成為天文科學熱門研究主題，而在美國太空總署協助下，於 1995 年 7 月 4 日，由阿拉斯加大學 D. Sentman<sup>(6)</sup> 團隊取得首張紅色精靈影像，如圖 1 所示。

紅色精靈為高空向上放電產生之現象，除紅色精靈外，也有稱為藍色噴流 (blue jets) 及淘氣精靈 (elves) 者，這些精靈分布如圖 2 所示，一般相信為高空游離層氣體分子或離子受激發產生的現象，但

目前科學家仍無法解釋產生此現象的原因。依據目前觀測結果，紅色精靈亦發生於 30—90 公里高空，發生時間長度為 3—30 ms，整體多重精靈發生約在 100 ms 內，光度計量為 10 k Rayleigh，相當於二等星光量。Rayleigh 為大氣輻射單位，定義為  $10^6/4\pi \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1}$ ，故此單位能量與光子波長有關。藍色噴流發生於雲層上方至 45 公里高空，發生時間長度約為 350 ms。在我國地面觀測記錄上，上述二者皆有發現，且均由成功大學科學團隊提出<sup>(7)</sup>，但藍色噴流觀測記錄數量遠較紅色精靈少。

應國立成功大學邀請，精儀中心投入中華衛星二號科學酬載技術開發工作，參與「向上閃電觀測

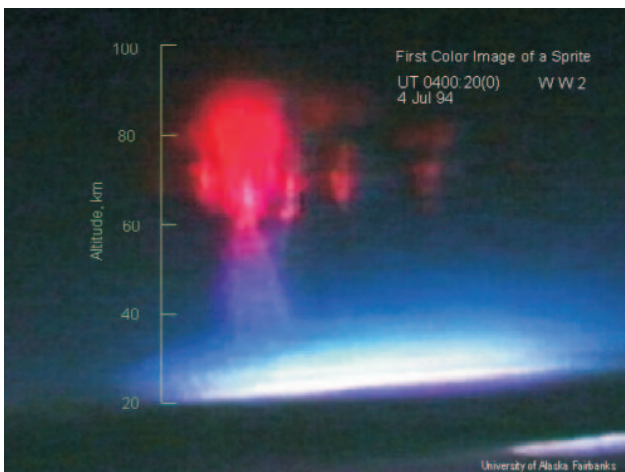


圖 1. 首張彩色紅色精靈（噴射飛機拍攝）<sup>(6)</sup>。

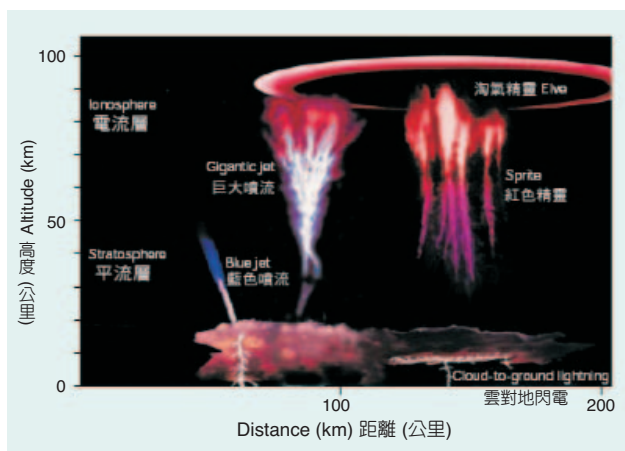


圖 2. 閃電引發向上噴射的各式精靈<sup>(2,8)</sup>。

影像儀」計畫。並且精儀中心為開發核心關鍵技術並驗證參與衛星計畫成效，在國內自行研製光度計及其影像儀地面模組。主要是以仿照華衛二號科學酬載飛行體，研製三波段光度計及低照度影像儀；首先，由光度計取得光譜信號觸發源，提供受信觸發機制，適時驅動影像儀擷取影像，並擷取後續各波段光譜信號。本計畫除了驗證科學酬載光學功能外，未來將應用於地面高空向上閃電現象觀測，以取得各現象光化學動力學和光譜影像，提供科學家分析之用。

## 二、系統研製

華衛二號科學酬載有三個子系統，其中陣列式光度計為日本東北大學所研製，另外在美國加州大學柏克萊分校所研製的二個子系統為光度計及影像儀<sup>(2)</sup>。精儀中心亦仿照華衛二號科學酬載設計<sup>(9)</sup>，於國內同步進行科學酬載地面模組的開發工作，做為地面觀測紅色精靈的工具。精儀中心所發展之觀測系統包括光度計及影像儀，藉此了解整個科學酬載性能和特點。

此外，精儀中心並對此觀測系統進行光學優化，影像儀望遠鏡頭為 F/1.6，CCD 為 Basler A301F (影像速率 80 frame/s，IEEE1394 介面) 及一般商用彩色監視器 (影像速率 30 frame/s，NTSC 輸出)，光量放大管為 DEP 的 XD4 (二代改良管)，影像卡為 NI PCI-1407。光度計的光電倍增管有為 Hamamatsu R1924、R1104 及 R5070 三種型號，均使用高壓 -1000 V，本系統示意圖如圖 3。光度計研究波段為 777 nm (O(I) 觸發信號)、650—900 nm (紅色精靈信號) 及 428 nm ( $N^{2+}$ )。當閃電發生時，PMT R1925 (內含 777 nm 濾光鏡片) 會收到閃電訊息，除了驅動各個光度計開始取樣信號 (20—50  $\mu\text{s}$  解析度)，並通知影像卡開始擷取影像。

此系統之影像儀所用望遠鏡頭是依據 UCB 的合約廠商 Coastal Optical System 之光學設計，為雙高斯 (double Gauss) 設計模式。由於科學酬載影像儀所使用之太空級毛胚鏡片價格昂貴且訂貨日期頗久，故更改為商用普遍的毛胚鏡片，經自行光學重新優化，並強化 600—800 nm 間影像品質，整體適

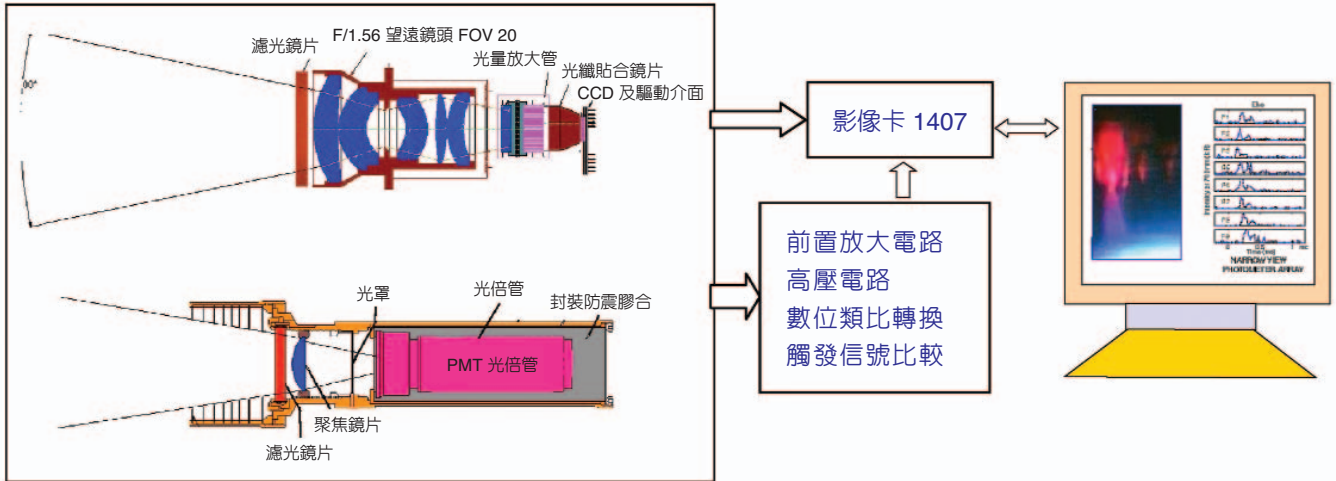


圖 3. 光度計及影像儀儀控示意圖。

用波長為 400—900 nm，其設計如圖 4 所示。

鏡頭機構設計考慮鏡邊和鏡片的散射，鏡框染黑可以將反射在鏡框的餘光吸收去除，因此常使用噴砂再染黑以增強除光效益，但是噴砂易使結構變形，而造成組裝上的困擾。於此我們嘗試應用兩次染黑，將染黑完後的結構體，再蝕洗結構體後，重新平光染黑一次，如此增加表面平整性，所得結構體將較一次染黑為佳，如圖 5 所示，一次染黑的鏡

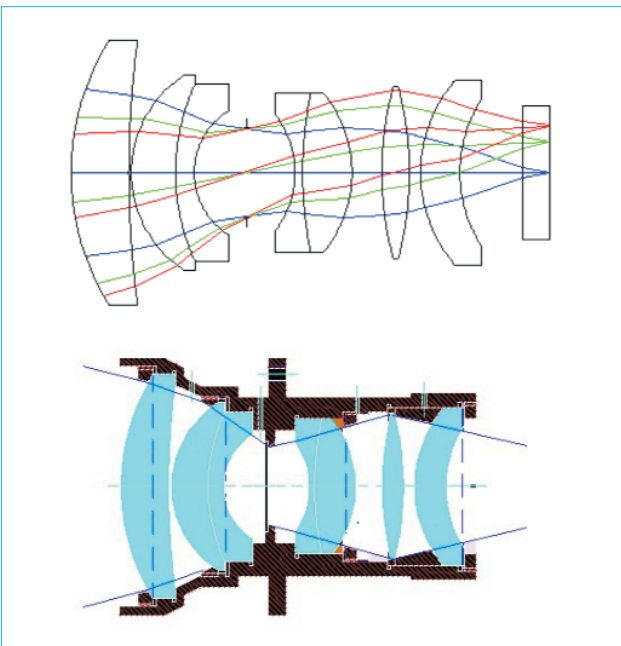


圖 4. 影像儀所用望遠鏡頭光學設計及機構設計。

頭有較高反射光澤，而二次染黑結構體的反射光澤較少也較均勻。以 Lambda 9000 光譜儀量測此二種染黑結構體的反射光譜，如圖 6 所示，可以看到於 400—850 nm 光譜範圍，一次染黑紅線部分在可見光 400—700 nm 有較高光反射，而二次染黑的反射光譜就有明顯改善，足見以兩次染黑，可降低光澤反射，相似於微細噴砂效果，這種方法可使鏡框變形量降到最低。

由於一般 CCD 對微弱信號難以檢測，需加裝光量放大管 (intensifier, 簡稱光放管), 光放管增益可達 10000 倍，適用檢測極微弱影像，如夜間時遠方星光拍攝，所以光放管又名星光夜視鏡。紅色精靈發生時間極短 (50 ms 以內)，但其亮度較二等星為亮。CCD 和光放管間採用鏡片耦合，將光放管的影像透過延遲鏡頭 (relay lens) 直接耦合入

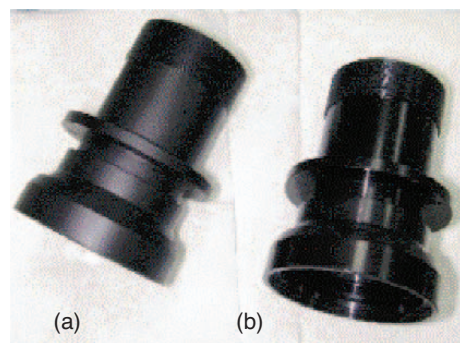


圖 5. (a) 二次染黑，(b) 一次染黑。

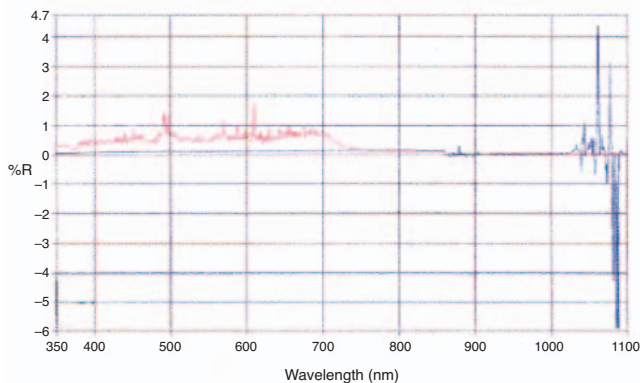


圖 6. 紅線為陽極染黑平光一次 (400–700 nm) 有雜光反射，藍線為陽極染黑平光二次 (400–850 nm) 雜光反射較少。

CCD，由於所購得光放管成像為曲面 ( $R = 14.15$  mm)，光學設計需將曲面像調整成平面，由 CCD 接收，圖 7(a) 為其鏡片耦合光學設計圖。將望遠鏡、光量放大管及耦合鏡組結合，其機構設計圖如圖 7(b)，圖 7(c) 為其成品圖，由於採用模組化機構設計，因此可搭配不同型號 CCD 觀測。使用監視器用彩色 CCD (auto-gain) 時，取得影像如圖 8 所

示，為一般低照夜視影像，而使用 Basler A301f CCD (manual gain) 時，拍攝星光如圖 9，在增益 (gain) 為 2 時 (增益值最大 300)，已可觀看到三等星，驗證這套系統確實可以看到紅色精靈 (其光亮星等為二)。

而在光度計研製方面，光學系統僅用於放光，不用於成像，複雜度低，採用 25 mm F/1 的鏡片。由於若採用 BK7 玻璃，鏡片曲率會太凸，幾近半球，很難加工，因此最後採用 SF6 材料，設計為平凸透鏡，凸面曲率為 19.6 mm，直徑為 28 mm，厚度 7.5 mm。光電倍增管分別採用 Hamamatus R1924、R1104 及 R5070 三種型號，R1924 光譜適用範圍為 300–650 nm，因而用於匹配加裝 428 nm 帶通濾光片鏡頭，觀測  $N^{2+}$  光譜變化情形；而 R1104 光譜適用範圍為 180–850 nm，匹配使用 650 nm 長通濾光片鏡頭，觀測紅色精靈訊號；R5070 管適用於 300–900 nm，因其在 777 nm 的效益值均較前二型號管高，所以匹配 777 nm 帶通濾光片鏡頭，以取閃電的觸發信號。圖 10 為此系統的光學機構設計圖和成品圖，前端為光度計的 baffle。

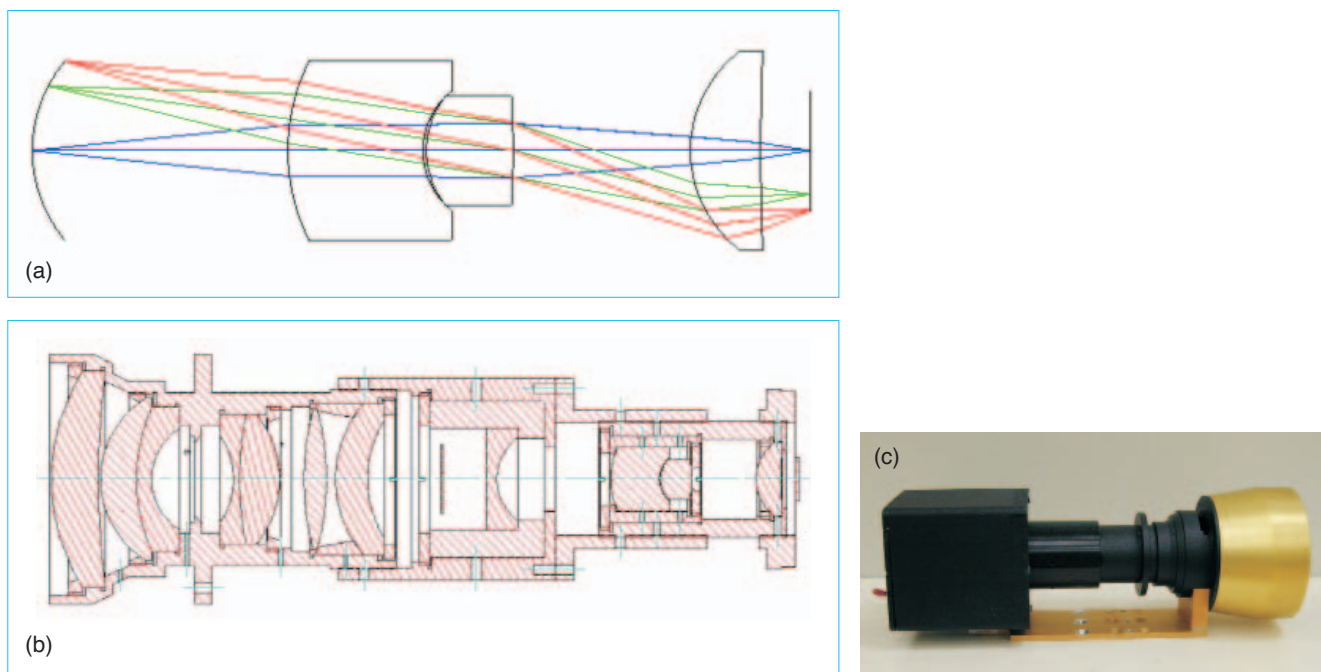


圖 7. (a) 光量放大管和 CCD 間鏡片耦合光學設計圖，(b) 低照度影像儀機構設計圖，(c) 低照度影像儀成品圖。

表 1. 光度計光量校對結果。

型號 \ 輸入電位 $V_{dc}$	-550 V	-660 V	-770 V	-880 V	-990 V	-1050 V
光度計 #1 (428 nm) 輸出電流 188 $\mu$ W	164 $\mu$ A	208 $\mu$ A	256 $\mu$ A	302 $\mu$ A	348 $\mu$ A	368 $\mu$ A
光度計 #2 (777 nm) 輸出電流 11.8 $\mu$ W	188 $\mu$ A	246 $\mu$ A	303 $\mu$ A	356 $\mu$ A	407 $\mu$ A	426 $\mu$ A
光度計 #3 (650–900 nm) 輸出電流 58.5 $\mu$ W	110 $\mu$ A	145 $\mu$ A	175 $\mu$ A	207 $\mu$ A	230 $\mu$ A	250 $\mu$ A



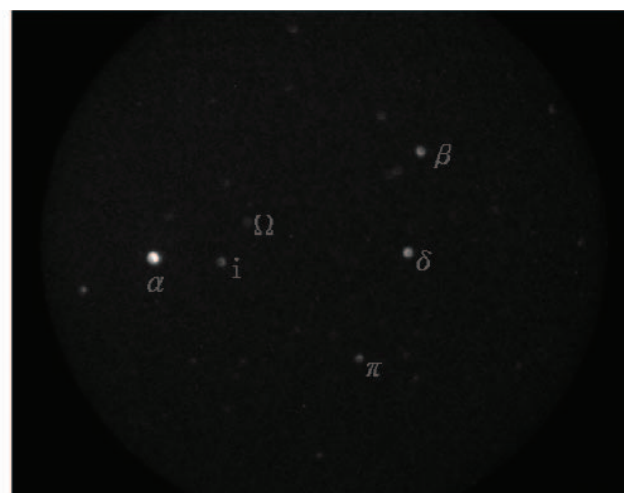
圖 8. 國立交通大學竹湖低照度影像儀夜視影像 (2002.8.8 10:00 pm)。

由於閃電精靈的信號強弱和觀察地點有關，因此需針對三波段光度計進行光度標準量測校對，校對結果如表 1 所列，以作為往後觀測時高壓電位選取考量，避免信號過度飽和。

將三波段光度計、影像儀及其控制系統硬體結合如圖 11(a) 所示，圖 11(b) 為系統測控制架構示意圖。由於紅色精靈出現時間僅小於 30 ms，且出現時間不易掌控，所以在實驗室中重建發生現象藉以驗證功效。以投影機播放先前紅色精靈影像，再由光度計和影像儀遠距離擷取投影板的影像，所得影像畫面如圖 12 所示，各個影像時間間格為 30 ms。未來拍攝精靈用的 IEEE 1394 CCD 的時間間格可達 16 ms。



(a)



(b)

圖 9. 低照度影像儀星等測試。地點：雲林海邊 (2003.6.28 10:53 pm)，天空狀態：低污染 (未見銀河)，CCD gain #2。檢驗星等： $\Omega$  (5–6)， $\alpha$  (1)， $\beta$  (2.6)， $\delta$  (2.3)， $i$  (3)。

上述儀器性能皆可對應於衛星二號科學團隊所用科學酬載之功能<sup>(7)</sup>，除了可印證科學酬載相關光學功能外，並展示其拍攝靈敏度。未來在衛星昇空後，可在台灣各處建立相關觀測站，從不同的觀測方位，使得在紅色精靈立體方位觀測上更具有前瞻性，以提升國人在太空科學研究地位。

### 三、應用

「尋跡探源」本是科學家對一切真相起源探索執著的精神，因此，科學儀器開發也是朝此方向前進。早期科學研究從點出發，漸近於面，以取得完整訊息，然而對於無法預定確實時間的不定期事件之探究，如閃電、火山爆發，甚至於地震等，均令科學家難於掌握。特別像紅色精靈，並非每次閃電皆有紅色精靈等現象出現，閃電無法預期，高空向上閃電精靈更是詭譎莫測。

光度計量測可得到快速且時間連續的訊息，因此光度計在本系統中是扮演尋跡角色，因其靈敏度高，可快速明確告訴影像儀進行探源工作，取得事件影像；其中光度計在尋跡後，也同時進行其他波段光度計信號量測，獲得之資訊可供光譜動力學研究之用，搭配所取得的影像，也可瞭解大氣中各個成分的空間分布，以窺探整個事件的反應全貌。

影像儀內含光量放大管，可以將微弱的光訊號放大，因而可應用於量測微弱光譜信號及其影像，在科學研究領域中除紅色精靈取像外，如拉曼散射光及生技螢光之取像，也有很大助益。

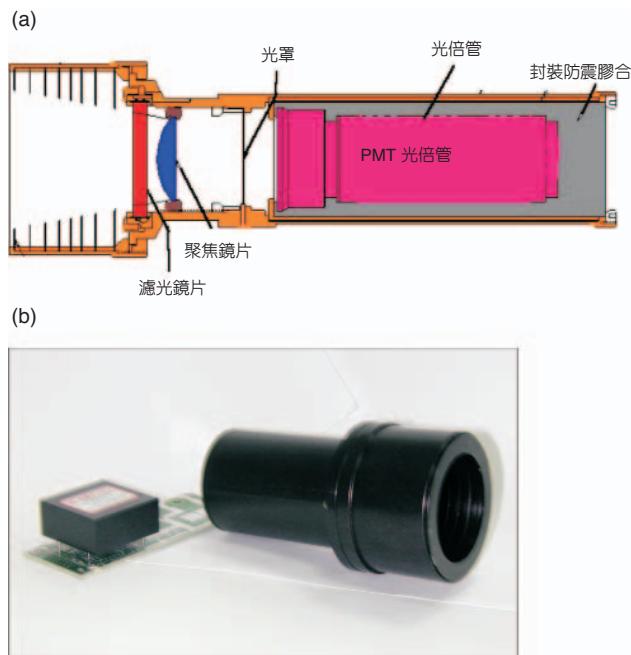


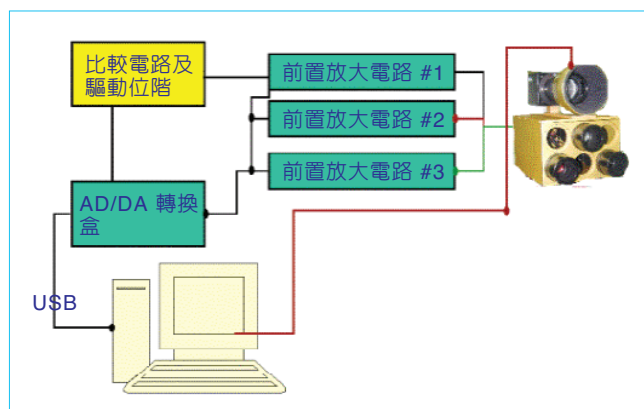
圖 10. (a) 光學及機構設計圖，(b) 為其成品圖。

光度計的應用常見於各成分光度檢測，由天虹科技委託精儀中心所研製的光譜式真空計<sup>(10)</sup>，即是此例應用。其利用冷陰極管放電所產生的輝光，氧氣的信號在 777 nm、氮氣信號在 428 nm 及氬氣的信號在 500 nm 等，藉由量測其信號變化，可得知氣體含量變化。

在低真空中 ( $> 10^{-3}$  Torr)，質譜儀可能會受損，所以並不適用於此狀態之真空測漏。再者一般 CVD 的反應系統均在  $1 - 10^{-3}$  Torr 之間，且在製程中無法即時監測其真空狀況，測漏工作均在歲休或



(a)



(b)

圖 11. (a) 光度計、影像儀及其控制系統，(b) 系統整合測試架構。

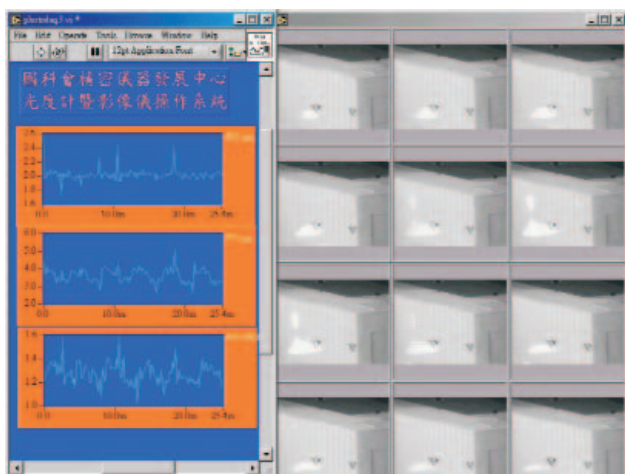


圖 12. 系統模擬測試。

系統停工檢查才能進行。因此，在製程中監控測漏，確實是所有半導體廠家夢寐以求的技術。

精儀中心所研製的光譜式真空計可在高真空 ( $10^{-3} - 10^{-7}$  Torr) 中，定量量測氧氣和氮氣的含量，進行高真空之微漏檢測；而在低真空 ( $> 10^{-3}$  Torr) 時，適當調整其冷陰極管的電壓值，亦可定性量得氧氣和氮氣信號<sup>(10)</sup>。此光譜式真空計已可應用在製程測漏監控，藉由所量得氧氣和氮氣信號發出警訊。由於氮氣信號會被水氣抑止，如發現氮氣信號異常偏低，可推得系統內部可能有水氣的進入。除此之外，亦可更換濾光片量取氟含量，可監控反應腔中氟含量，提高製程良率。

#### 四、結論

本文介紹精儀中心所發展之光度計和影像儀系統研製過程及其未來應用，除了可提供大自然現象觀測外，其中低照度 CCD 模組及相關光譜式光度計皆可單獨變成科學研究的重要關鍵性模組，相信未來會有更多儀器系統需要這些模組。

#### 參考文獻

1. 國家太空實驗室, <http://www.nspo.org.tw/>
2. 成功大學物理系華衛二號科學團隊, <http://sprite.phys.ncku.edu.tw/>
3. 加州大學博克萊分校太空科學實驗室, <http://www.ssl.berkeley.edu/>
4. 日本東北大學星球大氣物組, <http://pat.geophys.tohoku.ac.jp/~www/>
5. R. C. Franz; R. J. Nemzek; and J. R. Winckler, *Science*, **249**, 48 (1990).
6. D. D. Sentma, E. M. Wescott, D. L. Osborne, D. L. Hampton, and M. J. Heavner, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1205 (1995).
7. H. T. Su, R. R. Hsu, A. B. Chen, Y. C. Wang, W. S. Hslao, W. C. Lai, L. C. Lee, M. Sato, and H. Fukushima, *Nature*, **423**, 974 (2003).
8. V. P. Pasko, *Nature*, **423**, 927 (2003).
9. <http://sprg.ssl.berkeley.edu/sprite/ago96/isual/ROCSAT.html>
10. 李龍正, 廖泰杉, 黃基哲, 光譜測漏儀工程難型系統研製 (委託研究計畫), 民國 92 年 9 月, 精密儀器發展中心研製報告。

- 李龍正先生為國立清華大學化學博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。
- 張勝聰先生為美國天主教大學物理碩士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。
- 黃鼎名先生為國立成功大學航太博士，現任國科會精密儀器發展中心研究員。
- Long-Jeng Lee received his Ph.D. in chemistry from National Tsing Hua University. He is currently an associated researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Shenq-Tsong Chang received his M.S. in Physics from The Catholic University of America. He is currently an associated researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Ting-Ming Huang received his Ph.D. in aeronautics and astronautics from National Cheng Kung University. He is currently a researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.