

遙測酬載陣列式濾光鏡設計與製作

Array Filter Design and Manufacturing of Remote Sensing Instrument

邱柏凱、陳宏彬、蕭健男、陳峰志

Po-Kai Chiu, Hung-Pin Chen, Chien-Nan Hsiao, Fong-Zhi Chen

本文敘述福衛五號衛星遙測酬載 (remote sensing instrument, RSI) 陣列式濾光鏡介紹與設計製造，其中包含了濾光鏡光譜設計與如何結合微影製程製作微米級精度的陣列式濾光鏡。福衛五號濾光鏡採用高精度光學監控之離子源輔助電子槍蒸鍍系統進行光學鍍膜，微影製程部分則採用業界所用之軟板曝光機，藉由重複 5 個循環製程進行製作，每個循環製程包含微影製作圖形與近 90 幾層之光學薄膜製鍍，並藉此研究促進像素濾光鏡發展，提升光電產業附加價值。

This article introduces the manufacturing and design of the of array filters for the remote sensing instrument (RSI) of the satellite Formosat-5. The filter spectral design and the associated lithography process to produce micron-scale array filters are included. The filter films of Formosat-5 are coated by an ion source-assisted electron gun evaporation system with high-precision optical monitoring. The lithography process is performed by a soft-plate exposure machine used in the industry. The array filter is produced by five repeating cycles. Every cycling process consists of a lithographic process and a structure of nearly 90 layers coated optical films. This research promotes the development of pixel filters and increases the value of the photoelectric and optical related industry.

一、前言

什麼是濾光鏡？所有攝影好手應該都知道這片神奇的顏色玻璃，當一些攝影師今天要拍攝藍天白雲下的山景或美麗的紅花，如何能將主題的山景或紅花拍得更突出更明顯，就是利用濾光鏡的功能，舉例來說背景是藍天綠葉，透過紅色的濾光鏡就可以將藍光與綠光一部份濾除，讓紅花所散射出的紅光大部分的通過，如此，紅花就會顯得十分顯眼也就是凸顯了紅花這個主題。

相同的原理，當相機遠在 7 百多公里遠的高空向下拍攝，所有的反射光透過主次鏡的反射收集經

過濾光鏡後聚焦於感應器上，由於照相欲拍的物體跟相機本身相距 7 百多公里，可以收到的光相當的微弱，所以照相的動作原理變更為單色的掃描後再套色成像，就因如此濾光鏡的設計就必須比市面上的濾光鏡困難許多，從剛剛所舉的案例來說，就必須製作 3 個濾光鏡分別是完全濾除綠光與紅光並提升藍光穿透率的藍光濾光鏡、完全濾除藍光與紅光並提升綠光穿透率的綠光濾光鏡與完全濾除藍光與綠光並提升紅光穿透率的紅光濾光鏡，每一個的濾光鏡設計由 20 幾層薄膜堆疊提升至 90 幾層的薄膜堆疊。

二、太空級陣列式濾光鏡製作

本研究團隊自 2002 年起，因應我國防災任務需求，與本中心遙測技術組合作，開始建立光學薄膜之遙測應用技術，旨在發展符合太空規格之光學薄膜設備、製程與檢測技術，以配合我國自主性高解析度遙測衛星之光學設計需求。其內容為建立大口徑光學酬載之銀反射主鏡、次鏡、修正透鏡及不同波段帶通濾光鏡陣列等光學薄膜元件之模擬、製程、設備與太空環境測試研發平台，以提供我國將衛星對地解析度提升所需之重要設計參數。前揭非球面銀反射主鏡將由目前直徑 46 cm (升空之福衛五號衛星) 提升至 1 m 直徑 (經設計加鍍保護層後，反射率達 99% @ 450 nm – 900 nm 以上，附著力為 ASTM 3359B 最高規格 5B)，5 波段帶通濾光鏡陣列通帶間距由目前受限於機械式遮罩製程之釐米等級提升至黃光微影微圖化整合製程之微米等級以利衛星遙測酬載收光量與解析度 (空間及光譜) 之提升。

執行衛星計畫發展之先期計畫為支援我國機載遙測儀「植被及國土變遷觀測儀，VCDi」技術發展，研發出藍、綠、紅、近紅外等波段帶通濾光鏡，每一濾光鏡的膜堆均為近百層高、低折射率材料交疊設計，並在精密監控下製鍍於單面基板上，量測之穿透率皆達 90% 以上，此等元件並通過 ISO 9211、9022 測試。發展此項儀器的重要性在於台灣屢遭受颱風侵襲時，可以立即由飛機承載 VCDi 觀測儀，往赴災區取像，取代受天候影響，而被雲層遮蔽衛星影像，傳回第一手災區影像，協助相關單位正確研判，迅速救災；目前本研究團隊則持續深耕此項技術，支援我國太空任務自主發展高解析衛星之需求，並突破國外對此項技術之封鎖。2012 年已完成光阻遮罩式、多波段帶通濾光鏡陣列 (見圖 1)，此濾光鏡陣列於 2014 年組裝於國家太空中心「福爾摩沙五號衛星」並於 2017 年升空服役 (見圖 1)，接替已屆服務年限之「福爾摩沙二號衛星」，執行太空遙測任務。

1. 濾光鏡設計介紹

在太空級互補式金屬氧化物半導體 (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)

影像感測器 (image sensor) 元件中所使用的濾光鏡，以高/低折射率材料的交互變化，作對稱膜堆設計。並在膜堆與基板間、膜堆與空氣間加入一定的匹配層 (matching layers)，減少穿透帶間干涉波紋，提昇穿透率，設計概念為：

Sub / NmSub / (對稱膜堆) / NmAir / Air

NmSub：膜堆與基板匹配層

NmAir：膜堆與空氣間匹配層

最後，將此光學設計概念輸入於 Macloed 光學薄膜軟體，做進一步分析光學膜堆的濾光範圍，並同時以優化設計，求得最佳的膜堆設計，其膜層為高、低折射率材料堆疊 ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$)，並利用氧離子輔助蒸鍍製帶通濾光鏡。其中 B1、B2、B3、PAN 與 B4 設計光譜圖，如圖 2 所示。

以 B1 帶通濾光片為例，其膜堆設計需要高達 90 層的光學薄膜組合，藉由不同薄膜材質的對光的干涉作用達到所需特定的光波段穿透，為了得到精確的濾光波段，每層薄膜鍍製的厚度與薄膜材料的折射率即需要相當程度的控制和掌握，不精確的厚度控制 (如厚度誤差 2%)，將會對於濾光片其精確的濾光波段造成 2% 的波段漂移，如此將不符合 B1 的光學規格。此外，製鍍過程中，為了提高薄膜的品質，每層薄膜鍍製完成後需要再將真空腔體抽至底壓 ($< 5 \times 10^{-6}$ Torr)，減少不同層薄膜之間的交互污染，因此高達 90 層光學薄膜的 B1 帶通濾光片製作過程將達到 24 小時以上，系統穩定度亦是相當大的挑戰。

2. 光學薄膜製程

針對耐熱性差的微影薄膜基板，利用低溫之離子源輔助電子束蒸鍍進行多層膜之製程，並精確控制各膜層厚度，在離子助鍍過程中藉由高能離子撞擊成長中的光學薄膜，將可使得薄膜原子獲得更高能量，使其具有高動能進而提高離子助鍍後膜堆積密度 (packing density)，薄膜呈現更為緻密且具有連續性的微結構組織，因此薄膜在大氣環境中不易吸收水氣，此時薄膜其光學折射率也將更接近理想狀態，且因薄膜耐候性提高，薄膜元件的光學特性將更穩定且光學規格不會發生漂移現象，因此可以預測在低溫離子輔助蒸鍍製程將可提高膜層製作之

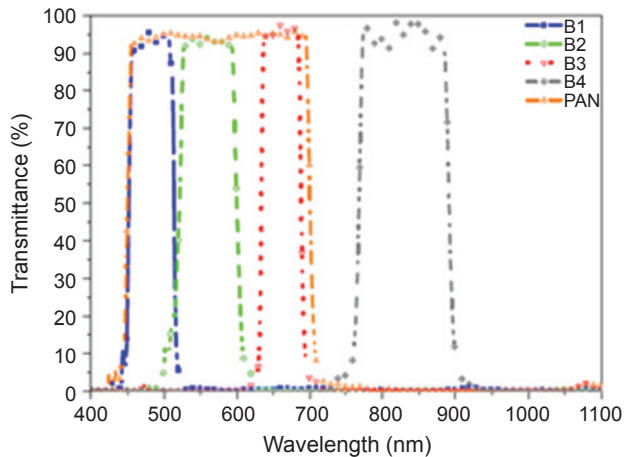


圖 1. B1、B2、B3、PAN 與 B4 五種 Filter 設計光譜圖。

穩定度與薄膜光學品質。

為求順利執行本項任務，團隊與日本鍍膜設備商合作開發符合任務需求的自動光學監控系統，控制光學薄膜製程，藉由光學監控系統中高量測解析度、監控波長穩定度、高訊噪比與高分析精度等特色，以提供符合高光學規格製鍍精密光學薄膜，其中低溫離子輔助蒸鍍製程所成長的多層膜帶通濾光鏡，將可提高帶通濾光鏡穩定性、良品率與降低人工及物料成本。

3. 微影製程

微影薄膜製程技術應用光學薄膜製程是近代光電產業的新趨勢，惟若各帶通濾光鏡之寬度及間距能放大至釐米級，則僅需採用機械遮蔽方式定義濾光鏡於基板上之位置，成功率將大幅提升，為此本研究同步進行金屬光罩遮蔽法 (shadow mask) 以進行定位製作五個頻段的濾光鏡薄膜試做，作為先期研究用以期減少黃光微影製程光阻與蝕刻液對於光學薄膜性質的損傷，以快速且方便調整製程狀況以克服黃光微影製程所面臨等問題。

微圖化製程中黃光微影法與金屬光罩遮蔽法之間各有其優缺點，且其中製程特性將緊密影響所製作的濾光鏡薄膜之光學規格，例如，黃光微影法中雖可以精密定義出薄膜沉積位置與外型尺寸，然而待通濾光鏡薄膜的製作時間長與離子轟擊等問題皆對所選用的光阻材料有一定程度的損傷，此外，一

般使用的光阻厚度約為 6-7 微米，對於本研究中的濾光鏡厚度約為 10 微米的帶通濾光鏡薄膜已經不符使用，因此需要再尋求厚度高與可容忍製程條件高的光阻材料。另外，金屬光罩遮蔽法中其金屬光罩材料可以用不鏽鋼薄板以容忍薄膜成長中製程溫度與離子轟擊等問題，但不鏽鋼薄板並不容易獲得高精度的加工尺寸，且當薄板厚度減小時，光罩在製程容易彎曲變形，使得金屬光罩遮蔽法也有其製程上的限制，故必須一一解決相關問題。

綜合上述兩種方法的優缺點，並考慮衛星計畫的任務需求我們採取結合微影製程的方式進行陣列式濾光鏡製作，雖然製程技術與困難度提高許多卻可以確保陣列式濾光鏡的功能符合計畫需求。微影薄膜製程主要是對於光學薄膜製程的探討，微影薄膜製程圖案形狀、有效面積大小、與可允許誤差寬度等規格。微影薄膜製程製作五個帶通濾光鏡的流程如圖 3 所示，進行微影薄膜製程之前必需先確認幾點事項 (詳見表 1)。

解決上述之微機電製程應用於陣列式光學濾光鏡，再來就是解決每個帶通濾光鏡間的散射光問題，一般而言光學感測元件皆是利用有機塗黑的方式進行濾除雜散光，由於考量時程與太空環境輻射的影響，我們採用抗高能輻射的氧化物膜堆疊出抗反射膜，可避免穿透光的反射造成訊號的干擾，所以在 CMOS 元件上除五個頻段的濾光鏡薄膜以外，皆須製鍍抗反射膜 (anti-reflection, AR) 以降低穿透光之反射，為減少製程之複雜性，本團隊於設計五個頻段的濾光鏡薄膜時，先加入 AR 膜堆進行設計，於輸入鍍膜設備時，再將 AR 膜堆移除，待五個頻段的濾光鏡薄膜製鍍完成之後，在一起製鍍 AR 薄膜，以降低 AR 製鍍微圖化之困難性。研究中亦將 5 波段帶通濾光鏡陣列通帶間距，由目前受限於機械式遮罩製程之 mm 等級，提升至黃光微影微圖化整合製程之微米等級，以利衛星遙測酬載收光量與解析度 (空間及光譜) 之提升，見圖 4(b) 所示。其穿透率光譜圖，如圖 4(c) 所示，B1 通帶平均穿透率達 93%、B2 通帶平均穿透率達 94%、B3 通帶平均穿透率達 92%、PAN 通帶平均穿透率達 95% 與 B4 通帶平均穿透率達 95%，研究團隊在【太空規格光學薄膜技術研究發展】獲得「2013

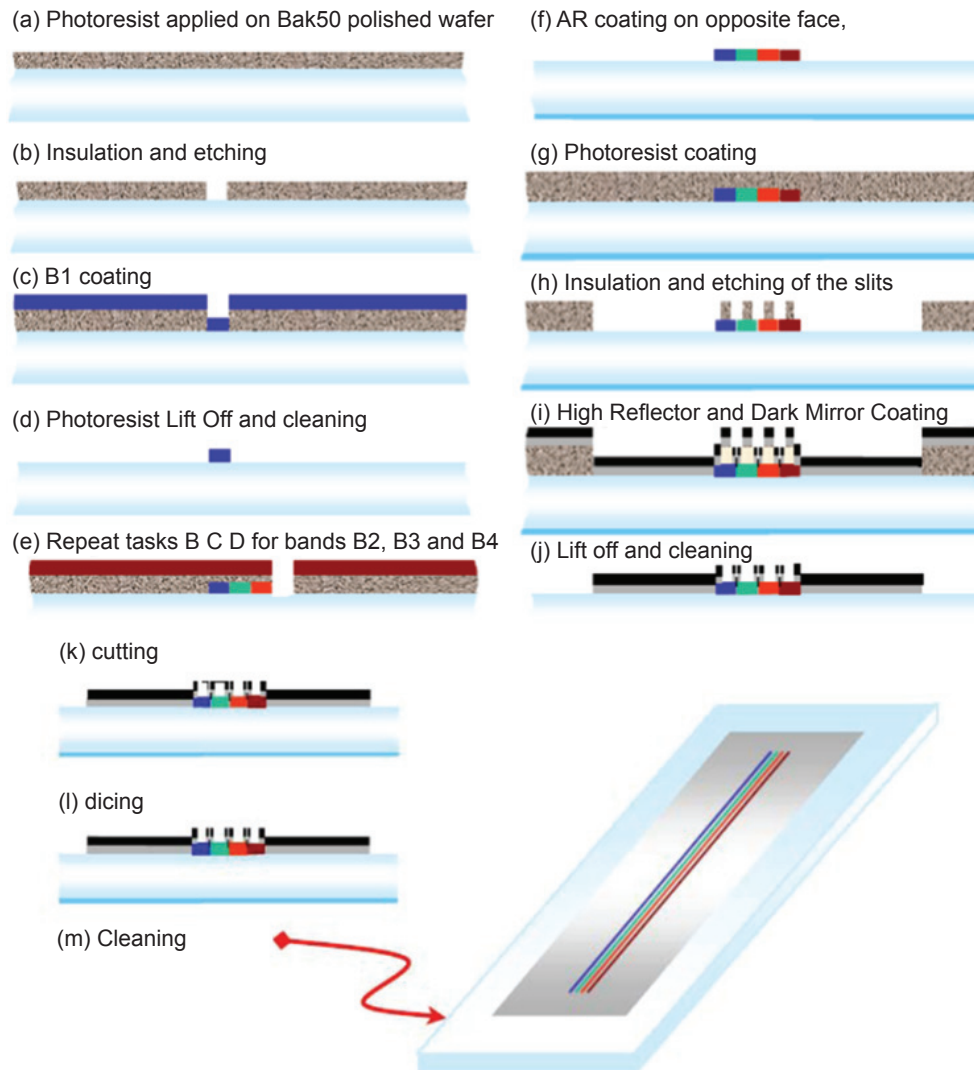


圖 2. MSF 微影薄膜製程示意圖。

表 1. 微影薄膜製程說明與挑戰。

製程	製程說明與挑戰
光學薄膜設計	依五個帶通濾光鏡所需要的濾光波段規格作光學薄膜的設計，計算出多層薄膜的材質和個別厚度，並對於多層膜堆進行優化設計。
微影薄膜製程	選擇適當微影薄膜製程的光阻，其目的在於薄膜鍍製過程中能有效抵抗基板溫度和高能離子轟擊的損傷，並決定使用掀離法 (lift-off process) 中適當正光阻或負光阻，為了獲得微影製程中薄膜精確的圖案轉移，光阻厚度必須以和光學薄膜 1:5 比例旋鍍，因此該製程對於光阻熱穩定性和高厚度條件的圖案定義將是微影薄膜製程重要挑戰工作之一。
圖案轉移	圖案光罩設計與選擇圖案製程方式，例如 a. 乾式蝕刻 (配合儀科中心的奈米製程中感應式藕荷離子蝕刻製程 (ICP etcher)；其困難點在於需要選擇適當蝕刻製程氣體，以對於被保護光阻區域和待蝕刻薄膜區域有高度選擇比)。b. 濕式蝕刻 (困難點在於蝕刻高厚度的光學薄膜蝕刻過程；以 Band 1 為例，預估膜堆厚度為 10 μm ，蝕刻過程過久將對於光阻有蝕刻損傷，同時蝕刻液對光學薄膜也有化學損傷 (Chemical damage) 的可能性，因此製程中光阻圖案定義不易精確掌控)。c. 使用金屬光罩直接與基板壓合的方式，此法即為 Hard mask，但對於高積集度的 MSF 元件，此法並不適用，同時此法對於薄膜在側邊幾何形狀的定義 (side wall) 並不精確，容易對光學元件產生散射等問題。

表 2. 帶通濾光鏡環境測試。

	輻射	熱循環	濕度
帶通濾光鏡	35 kRads	100 cycles 80K to 320K	24 hours 65 °C 95% RH

國研院傑出科技貢獻獎」技術發展類中優等獎肯定。

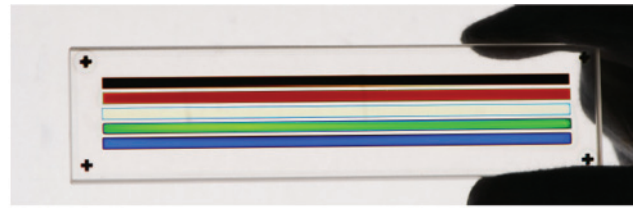
4. 環境測試

本研究之光學薄膜檢測主要依據 ISO-9211 規範可分為，光學薄膜基本測試與環境測試。在基本測試中可細分為穿透率、反射率、折射率等光學性質測試，及附着性測試、表面粗糙度等薄膜機械特性分析。另外，在環境測試中亦針對輻射損傷、溫度、溼度等影響進行測試。其測試項目如表 2 所示。

三、結論

簡單的說遙測衛星就是一部接近無限焦距高解析的相機，將地球表面所有反射的光經過主鏡、次鏡集中起來，再透過一塊長得有點像五線譜的濾光鏡來濾光，這塊濾光鏡從上而下分成五區，各別能讓藍光、綠光、白光 (就是所有波長的光)、紅光、近紅外光穿透，由後方的影像感測器接收，將光訊號轉為電訊號，再回傳到地面接收站，由電腦依據各色光的強度，還原成彩色照片。其中主鏡、次鏡與像五線譜的濾光鏡，就是依賴高端的光學薄膜製程技術，所以光學薄膜為高解析衛星中最重要且困難的關鍵技術之一，亦為提升衛星光學酬載 (太空望遠鏡) 光學成效最直接的方法，然而符合太空規格的這項技術目前在全世界皆為先進輸出國家所管制，因此開發符合太空規格光學薄膜技術的重要性不言而喻。我國自福爾摩沙一號上的海洋水色攝像儀，到福衛二號與福衛五號上的遙測儀器 (RSI) 都是光電類的衛星酬載，且未來我國的太空科技發展，勢必仍會繼續投注很重的比例在光電遙測類的酬載上。透過福衛五號自主發展光電遙測酬載，

(a)



(b)

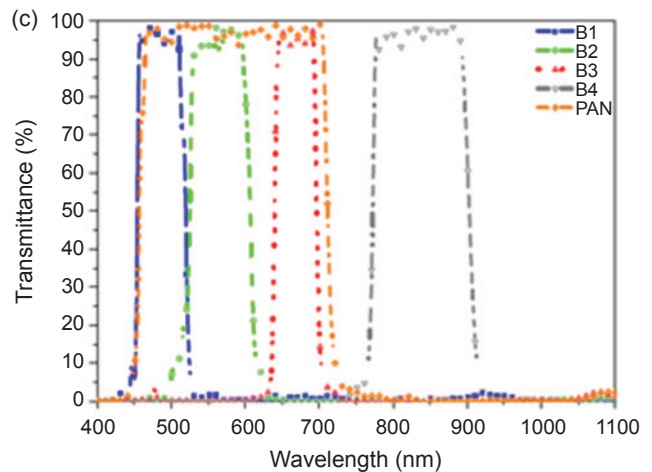
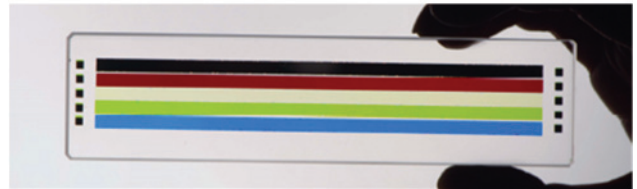
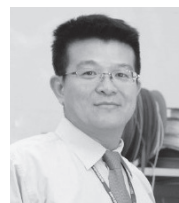


圖 3. (a) 金屬 MASK 製程 (b) 光阻 MASK 製程 (c) 陣列式帶通濾光片元件實際穿透率光譜圖。

在國內自主開發的路上能掌握影像感測器 (image sensor) 與陣列式濾光鏡關鍵元件是我們太空遙測衛星技術上的重要里程碑。



邱柏凱先生為國立台灣大學材料科學與工程學博士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Po-Kai Chiu received his Ph.D. in materials science and engineering at National Taiwan University. He is currently a research fellow at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



陳宏彬先生為元智大學電機工程碩士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Hung-Pin Chen received his M.S. in electrical engineering from Yuan Ze University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



蕭健男先生為台灣大學材料科學與工程學博士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼任真空技術組組長。

Chien-Nan Hsiao received his Ph. D. in materials science and engineering from Taiwan University. He is currently a researcher and division director of vacuum technology at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



陳峰志先生為國立成功大學機械工程博士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼副主任。

Fong-Zhi Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently a researcher and Deputy Director General at Instrument Technology Research Center, NARLabs.