

光的指揮家－探索光學薄膜的奧秘

Conductor of the Light - Explore the Secrets of Optical Thin Film

陳柏荔、莊子右、陳宏彬

Po-Li Chen, Tzu-Yu Chuang, Hung-Pin Chen

當問到專業的攝影師如何拍出一張好照片，除了要有好相機、好鏡頭之外，更需要懂得如何掌握好「光線」，而攝影時所使用的濾光鏡，可以幫助攝影師控制光的性質和色彩效果，遙測衛星上的光學鏡頭也不例外，需要加裝濾光鏡來獲得最佳的遙測成像品質，然而這類遙測衛星的元件卻是國際管制輸出的項目，是你有錢也買不到的，而買不到怎麼辦呢？只能靠自己開發！國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心（以下簡稱國研院儀科中心）光學鍍膜團隊從設計、製作到測試完成，用了接近 10 年的時間，才打造出臺灣第一個自主研發用於衛星遙測系統影像感測器的「陣列式濾光鏡 (five-band filter)」。本文將探索成就陣列式濾光鏡的關鍵奧秘－光學薄膜，一起來好好認識臺灣的技術與驕傲吧！

光是什麼？

陽光、空氣、水，是人類存活的三大要素，生活在這個被光 (light) 包圍的世界，你如何能不認識它呢？神奇的光，曾經困擾科學家數百年的時間，因為它的表現時而像粒子、時而像波動，在 17 世紀時，牛頓提出光的粒子說 (例如針孔成像實驗)，認為光是由極輕的微小粒子所構成，由此可以解釋光線直進、反射、折射等現象，但卻無法解釋光在物質表面有部份反射、部份折射及干涉、繞射等現象，這些現象則必須用波動理論才能加以說明 (例如 19 世紀初 Thomas Young 的雙狹縫實驗)。

直到 20 世紀，普朗克和愛因斯坦分別因光量子理論和光電效應獲頒諾貝爾物理獎，科學家們認為光就是一種電磁波 (electromagnetic wave)，同時具備波動與粒子性質 (wave-particle duality, 波粒二象性)，一般來說，當觀察的尺度比較巨觀的時候，粒子性會比較明顯，但是當觀察尺度接近光波長的時候，波動性的繞射與干涉就會相對顯著。看得見的光，我們稱為可見光，還有眼睛看不到的紫外光、紅外光、X 光等等 (如圖 1)。光在經過物質時，會發生折射、反射，甚至產生干涉或繞射等現象，聰明的科學家發現利用光的特性，可以巧妙的應用於實際生活中，其中「光學薄膜 (optical thin film)」就是最佳的範例！

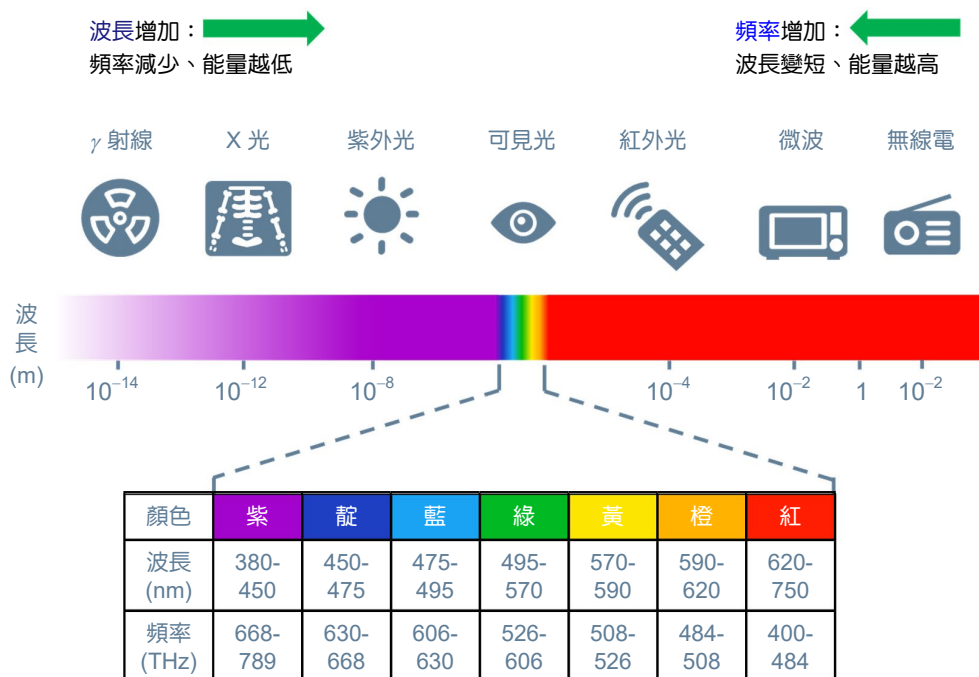


圖 1. 光譜頻譜。

光學薄膜是什麼？

五彩繽紛的肥皂泡泡 (如圖 2)、下雨天積水表面上油膜的斑斕色彩、黃蜂或蒼蠅翅膀薄膜上的彩色光芒，以及貼上手機保護貼後出現的彩虹紋路 (又稱為牛頓環)，屬於日常生活中最常看到的光學薄膜。



圖 2. 五彩繽紛的肥皂泡。

不同於陽光入射水滴經過反射與折射所形成的彩虹原理，這些光學薄膜上會產生繽紛的色彩，是因為光線進入薄膜產生我們熟知的「反射」、「折射」之外，還包含了「干涉」的結果。如圖 3 所示，光線從一個物質 (例如：空氣) 進到另一個物質 (例如：泡泡)，會發現

一部分的光線 (A 光線) 穿過交界面產生折射現象，到達薄膜內側後被反射回來，並再次穿過交界面，其餘的光 (B 光線) 則會直接從薄膜外側反射回來。這時候 A 與 B 光線會在薄膜外側組合成 C 光線，若 A 與 B 光線是以一致的步調 (A 與 B 光線的光程差是波長的整數倍) 離開薄膜外側時，振幅就會增加，稱為「建設性干涉」，若 A 與 B 光線的步調不一致，振幅會減少，稱為「破壞性干涉」 (A 與 B 光線的光程差是半波長的奇數倍)，以上這樣的物理現象則被稱為「薄膜干涉」。也就是說，當 C 光線是紅色時，代表在這個位置薄膜厚度的兩倍，恰好是紅光在介質中的波長的整數倍，A 與 B 中的紅色光線會完美的疊加形成建設性干涉，而其他顏色的光線並沒有很好地疊在一起，相互減弱造成破壞性干涉 (代表在這個位置薄膜厚度的兩倍，恰好是其他顏色的光線在介質中的半波長的奇數倍)，以至於讓該位置薄膜表面看起來是紅色的。這也是為什麼肥皂泡泡上的顏色隨時在變化，因為泡泡膜的厚度不完全均勻，而且水分持續在蒸發，只要每個位置的泡泡膜厚產生微量的轉變，光的顏色就會跟著改變呢！

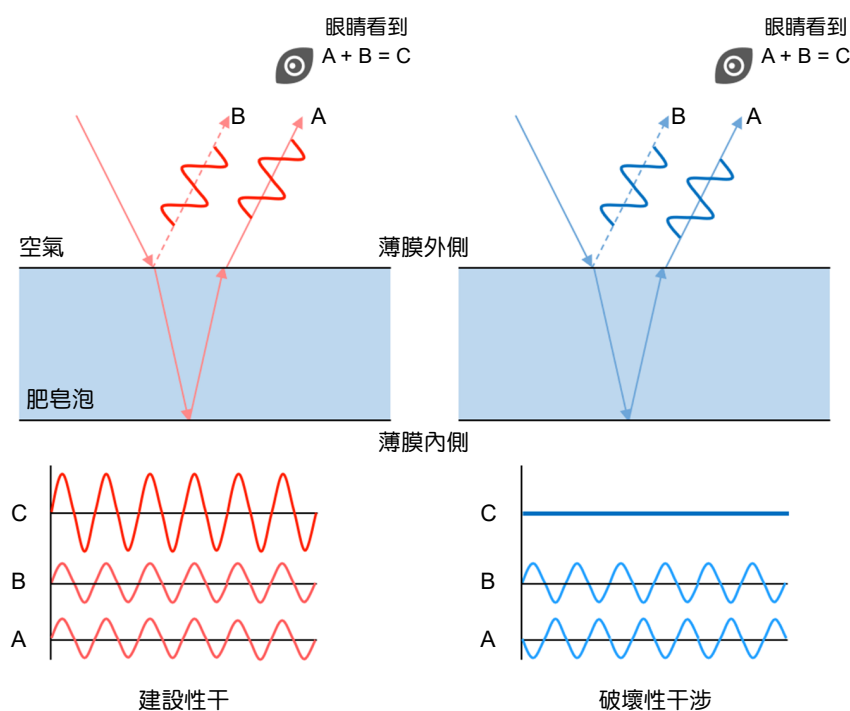


圖 3. 薄膜干涉現象。

聰明的科學家從這些自然的現象發現，薄膜厚度是很關鍵的因素，因為不同厚度會加強對應波長的顏色，而薄膜厚度必須為光進到介質內的波長的特定倍數。一般的光學薄膜其厚度需要在可見光波長的等級內 (約小於 500 nm)，此厚度範圍的薄膜因為光的干涉，以及薄膜、空間及物質間的折射率差異，可以有顯著的折射特性。科學家利用「薄膜干涉」的原理來控制光學材料折射及傳輸光的特性，例如在玻璃面鍍上單層或多層的薄膜來限制反射光或者穿透光線的顏色，也就是讓特定波長的光線產生建設性干涉，其他波長的光產生破壞性干涉。生活上常見的應用像是眼鏡、相機或工業用高精度的濾光片、家用或車用的低輻射玻璃、玻璃上的增透膜，以及汽車車頭燈的反光擋板等，都有光學薄膜來增加光的穿透或反射效果喔。

藏在光學薄膜的專業細節

為了能精確掌控光的「薄膜干涉」效果，依據反射、穿透、濾光、偏振等不同功能需求，通常會在光學元件或基板表面上鍍上單層或多層的氧化物或金屬薄膜，其性能會受薄膜各層厚度與膜層介面折射率差影響，原理為在光學系統中建立出干涉效應，讓光波傳導如反射、透射、散射和吸收等特性產生變化。而光學薄膜的製造過程就是我們常聽到的「鍍膜」，為精密光學中關鍵的一個環節。

光學薄膜的構成常以多層的薄膜為主，利用「真空鍍膜」技術，可以準確掌握各層薄膜的厚度，主要原因是在真空狀態下，薄膜材料氣化後的原子或分子可避免與環境中的粒子碰撞，除了能直線附著在基片上形成較穩定的膜層，也能準確鍍製出想要的薄膜厚度。真空鍍膜大致可分為物理沉積法 (physical vapor deposition, PVD) 與化學沉積法 (chemical vapor deposition, CVD)，一般常聽到的蒸鍍 (evaporator) 與濺鍍 (sputtering) 就是屬於物理沉積法。



圖 4. 儀科中心的 (a) PVD 系統。(b) 蒸鍍系統。(c) 濺鍍系統。(d) CVD 系統，可提供各式光學薄膜的服務。

鍍膜方法的選擇取決於光學薄膜的設計，考量的因素包括了鏡片本身的材料，一般有塑膠、玻璃、金屬等，還有應用的目的與環境，例如太空中或衛星上的遙測望遠鏡，大型天文望遠鏡，或是半導體製程用的曝光機鏡頭與濾光片⁽¹⁾，或者一般的光學顯微鏡，或可用於研究腦科學的層光顯微鏡，以及應用於影像感測器前的濾光片等，不同的使用波長以及環境要求所要製鍍的光學薄膜可是大不相同的，且影響鍍膜品質的因素相當多，需要經驗豐富的專門人員才能掌控製造流程與成品功能，是一門非常注重細節的專業技術。

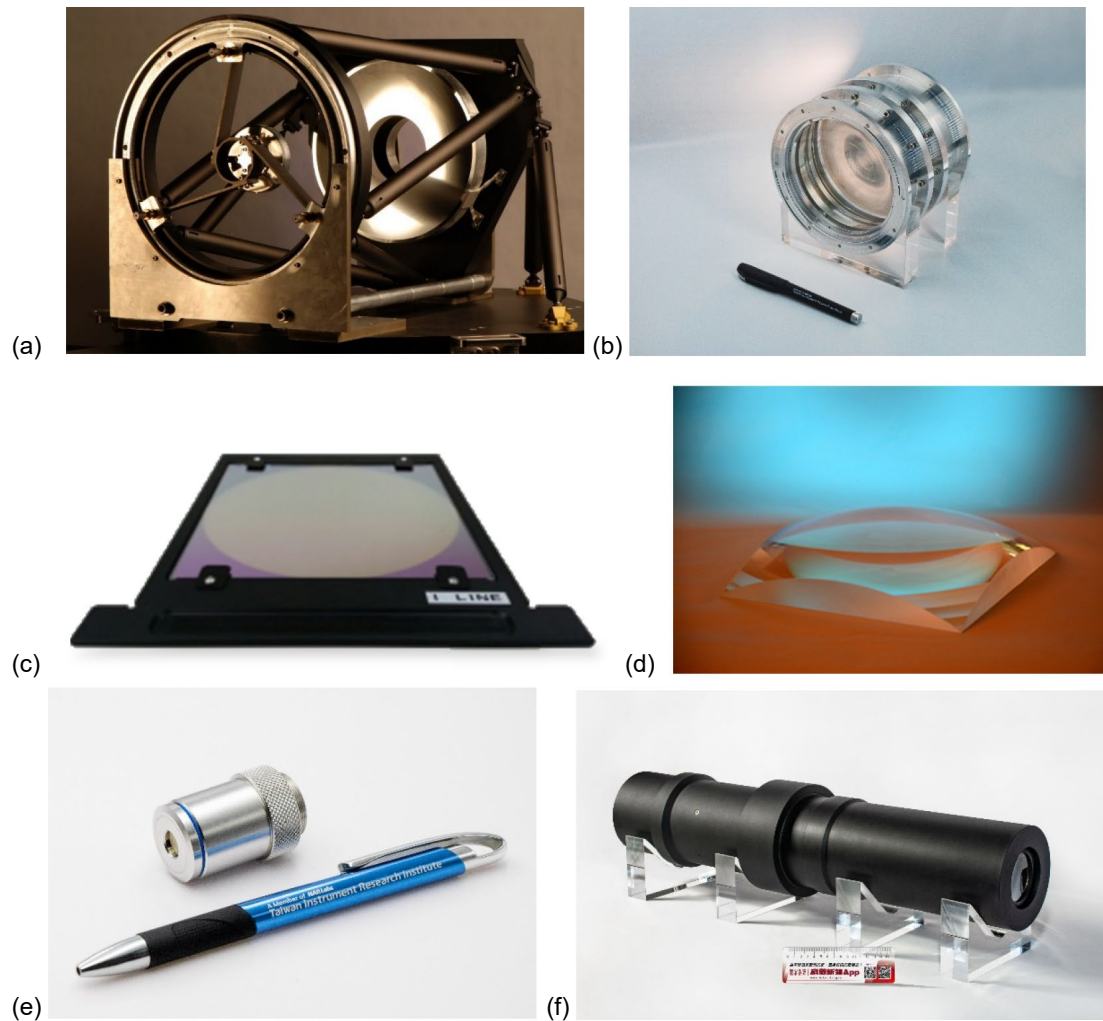


圖 5. 儀科中心研製之 (a) 福衛五號遙測系統實驗體。(b) 曝光機用 REMA 鏡頭。(c) 曝光機用濾光片。(d) 曝光機用抗反射鏡。(e) 藍光顯微物鏡。(f) 大口徑顯微鏡頭。

光學薄膜使用的材料也相當多元，通常會利用低折射率 (如氧化矽或氟化鎂) 及高折射率 (如氧化鈦系或氧化鋁) 材料搭配製造而成。高折射率材料除了擁有高折射率的優勢，化學特性也比較穩定，且不溶於水、疏水性佳、附著力強、電傳導力低，經常用在半導體元件、潑油性薄膜等領域中；而低折射率材料則具備良好的附著性、耐刮性和耐酸鹼性，同時結構也非常穩定，不太會跟其他材料產生反應和變質。光學鍍膜技術透過選擇不同材料和製程，才能夠製造出各種具有特殊光學性質的薄膜，進一步廣泛應用於各種光學元件的表面，如鏡片、手機及相機鏡頭、濾光片、光學儀器、晶圓，還有光通訊的相關元件或設備等。

光學薄膜應用

在了解光學薄膜可以改變光的反射、穿透、吸收及散射等程度的原理後，透過巧妙的光學設計、薄膜材料的挑選，以及精密的真空鍍膜儀器設備等技術，就能製造出各種應用在生活、科學及工業上的單層或多層光學薄膜。濾光片的顏色、波長與頻率可由圖 1 得知，如圖 6 所示，對應光譜波長的位置，即可看到鏡片所呈現出該波長位置的顏色 (可見光)。



圖 6. 鏡片所呈現出該波長位置的顏色 (可見光)。

目前常見的光學薄膜類型及其功能整理如表 1。

表 1. 常見的光學薄膜類型及其功能。

類型	功能	應用
反射膜 (Reflection coating)	• 增加反射率	照明設備、檢測儀器、望遠鏡、顯微鏡、雷射系統、曝光機
抗反射膜 (Anti reflection filter, AR)	• 低反射 • 提高單一波長或某波段的穿透率	顯示器、太陽能電池、LED、相機、投影機、光學儀器
短波通濾光片 (Short pass filter)	• 可讓較短波長的光通過，並將不需要的波段吸收或反射	視訊鏡頭、監視鏡頭、冷光燈、顯示器、內視鏡、微創手術鏡頭、顯微鏡、檢測儀器
長波通濾光片 (Long pass filter)	• 可讓較長波長的光通過，並將不需要的波段吸收或反射	檢測儀器、5G 通訊、生醫儀器、量子電腦
帶通濾光片 (Band pass filter)	• 可選擇讓特定波長或某波段範圍的光通過，其他的光則會被吸收或反射	相機、投影機、顯示器、顯微鏡、檢測儀器
分光鏡 (Beam splitter)	• 可以將一束光線分成兩束	干涉儀、雷射、照明、光纖、醫療、半導體等儀器

此外，光學薄膜也可以應用在人文藝術方面，方法是在玻璃基板表面鍍上設計好的光學薄膜，完成鍍膜後，於上方加上一塊玻璃，進行燒結熔融，光學薄膜的材料，會因高溫退火而產生顏色飄移，物理學上稱為「藍移現象」¹，利用膜堆設計與調整退火溫度就可製作成色彩繽紛的裝飾膜 (如圖 7)。這便是利用科學技術來提升生活中的文化素養，為世界增添多元色彩。

1. 藍移 (blueshift) 是指電磁波由於某種原因導致波長變短、頻率升高的現象，在可見光波段，表現為光譜的譜線朝藍端移動了一段距離。



圖 7. 儀科中心鍍製的裝飾膜元件。

臺灣第一「陣列式濾光鏡」

福衛五號衛星遙測酬載 (remote sensing instrument, RSI) 是臺灣第一枚自主研製的高解析光學遙測衛星，軌道高度 720 公里，對地解析度 2 公尺，相當於拿著望遠鏡在 101 大樓上可以看到地面的螞蟻。想像一下，你扛著福五相機要拍 7 百多公里以外的物體，相機光學架構如圖 8 所示，物體上的反射光經過長距離的傳送，透過主次鏡與修正透鏡的反射與折射，並經過濾光鏡後收集聚焦於感測器上，再將光的訊號轉為電子訊號，回傳到地面接收站，最後由電腦依據各波段光的強度，還原成彩色照片。可想而知，要成就出高解析的影像品質，考驗著福衛五號的光學系統團隊對於鏡片、濾光片與感測器等各個環節設計、製作與組裝驗證的能力。

福衛五號遙測系統的 CMOS 影像感測器 (Complementary Metal-Oxide Semiconductor，互補性氧化金屬半導體) 在一個基板上整合了五條線型 CMOS 影像感測陣列，並且封裝成一個大型的影像感測器，具有成本低、省電、訊號傳輸快速等優勢。如圖 9 所示，在 CMOS 影像感測器前方的是一片像五線譜的陣列式濾光鏡或稱為多光譜帶通濾光片，從上而下分成五區，能將通過望遠鏡的光線分成五道不同顏色的光穿透，包括藍光、綠光、白光 (就是所有波長的可見光)、紅光、近紅外光，同時吸收或反射不需使用的其他波長，再分別讓五條 CMOS 線型感測器接收。

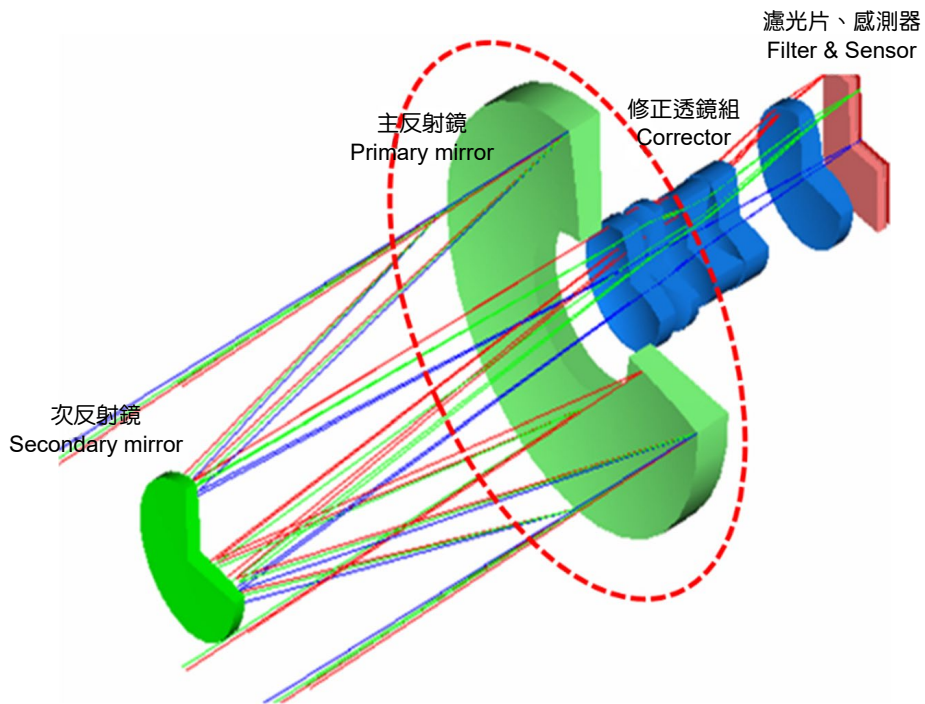


圖 8. 福衛五號遙測系統的光學架構。

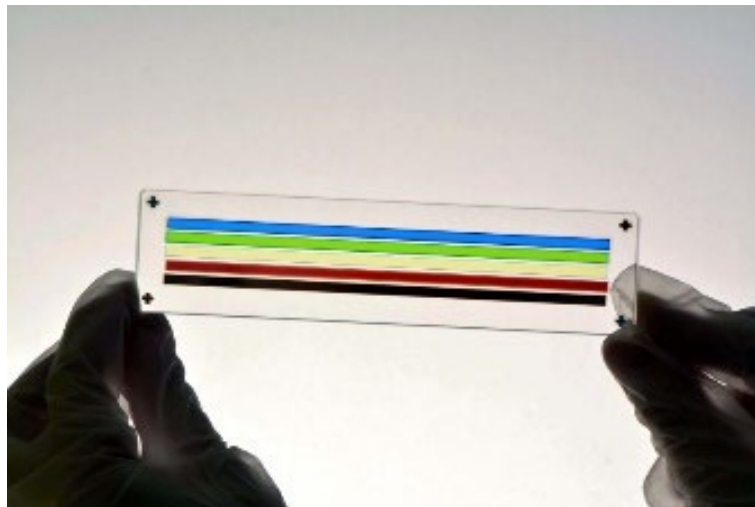


圖 9. 福衛五號遙測系統的陣列式濾光片。

陣列式濾光鏡這項關鍵元件的設計與製造比市面上的濾光鏡困難許多，包含了濾光鏡的光譜設計，以及如何結合微影製程製作微米級精度的陣列式濾光鏡，為完成本項任務，國研院儀科中心依賴深耕多年的光學薄膜製程技術與經驗，以及克服三大挑戰，從設計、製作到測試完成，用了接近 10 年的時間，才打造出臺灣第一個自主研發用於衛星遙測系統影像感測器的「陣列式濾光鏡 (five-band filter)」，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。

挑戰一：光學薄膜設計與製造

國研院儀科中心依 CMOS 影像感測器所需要的五個濾光波段規格進行光學薄膜的設計，且穿透率需要高於 90% 才算合格，如圖 10 所示，以藍光波段的濾光片為例，為了得到精確的濾光波段，透過有經驗的鍍膜團隊進行設計，計算出多層薄膜應使用的材質和每層厚度，並進行多層膜堆的優化，由一般濾光片的常用的 20 幾層薄膜堆疊提升至近 100 層的薄膜堆疊。

常見的薄膜設計方法中包括由 H. A. Macleod 所開發出來的導納軌跡圖示法 (admittance diagram)，這是一種可以精準計算膜厚的方法，由導納軌跡可以看出膜層成長的走向，因此可以清楚地判斷如何設計出最佳的膜系，特別對於同一膜系在不同波長的光學成效 (optical performance) 的分析非常方便。由於導納軌跡表示了膜的成長走勢，因此可以利用導納軌跡圖來做為鍍膜時的光學厚度監控，且在鍍膜過程中常會發生鍍膜厚度與原設計有所出入的現象，可以藉由導納軌跡圖來進行計算修正，及時修改膜層設計而得到補償的效果，有興趣的讀者可參考相關文獻⁽²⁾。

每層薄膜製鍍的厚度與薄膜材料的折射率都需要精準的掌控，若厚度誤差 2%，就會造成 2% 的波段漂移，因此，團隊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，且每層薄膜鍍製後都需要將真空系統的腔體再抽至底壓 ($< 5 \times 10^{-6}$ Torr)，以降低薄膜層與層之間的交互污染，提高薄膜的穩定性與品質，由此可知，僅一種波段將近 100 層光學薄膜的鍍製時間就可能高達 24 小時以上！

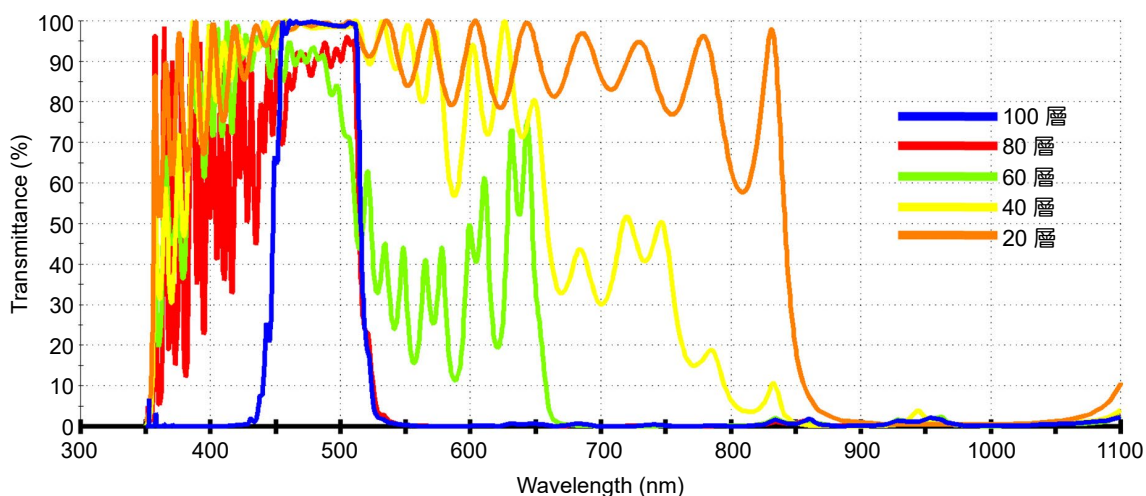


圖 10. 藍光波段濾光片不同薄膜層數的反射率。

挑戰二：微影薄膜製程及圖案轉移

如圖 9 所示，陣列式濾光鏡從上而下有五條不同波段的濾光區域，各個區域之位置、寬度及間距需被精確定義後，才能開始進行薄膜層的製鍍，且在製作其中一個區域時，需要將其他區域有效地遮蔽，在比較乾式蝕刻、濕式蝕刻與金屬光罩等不同設計與圖案轉移的製程方法之優缺點後，團隊最終利用半導體製程中的黃光微影製程應用於精準定義位置與尺寸，並選擇適當的光阻以便在薄膜鍍製的過程中能有效抵抗基板溫度和高能離子轟擊的損傷，再

採用掀離法 (lift-off process) 來獲得精確的圖案轉移，這樣的製程需要重複進行五次，才能完成不同波段的陣列式濾光鏡，最後製鍍上抗反射膜 (anti-reflection, AR) 以降低穿透光之反射，如圖 11 所示，陣列式濾光鏡五個不同波段的穿透率皆高於 90%，有助於提升衛星遙測光學酬載系統的收光量與解析度。

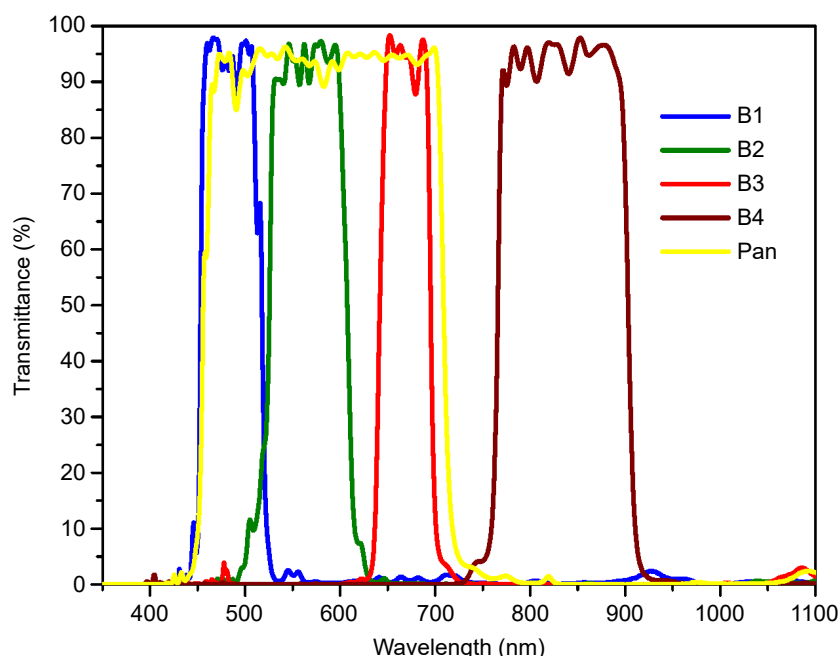


圖 11. 福衛五號陣列式濾光鏡之光譜圖。

挑戰三：太空環境測試

為了開發符合太空規格的陣列式濾光鏡，還需要依據 ISO-9211 光學鍍膜規範下進行光學薄膜基本測試與環境測試，以檢視陣列式濾光鏡對於各項影響的耐受程度。基本測試包括穿透率、反射率、折射率等光學性質測試，以及附著性、表面粗糙度等機械特性測試與分析；環境測試則需要通過 35 kRads 的輻射損傷、100 次溫度 80K 至 320K 的熱循環測試，以及 24 小時 65 °C、95% RH 的溼度測試⁽³⁾。在接受過這些嚴格的測試項目並符合條件後，才算是真正完成關鍵的陣列式濾光鏡開發。如圖 12 所示，可以明顯觀察到經由太空環境熱真空測試後穿透率沒有明顯衰減，平均透過率損失小於 1%，且通過百格刀附著力測試 (cross-cut test)。

結論

國研院儀科中心是臺灣高階光學與精密系統的研發基地，在國內是光學領域的領頭羊，提供光學解決方案的專家，累積 50 年光學設計與鏡片製作經驗，在鏡片的拋光與鍍膜都是專家中的專家。接續「提升遙測衛星成像品質的秘密開箱全臺灣唯一的大口徑非球面鏡」的介紹²，本文為探究臺灣第一個陣列式濾光鏡的關鍵奧秘，透過深入淺出的方式，引導讀者

2. 詳見陳柏荔、林麗娥、魏崇倫、莊子右，〈提升遙測衛星成像品質的秘密－開箱全臺灣唯一的大口徑非球面鏡〉，《科儀新知》，第 237 期，2023 年 12 月，頁 97-105。

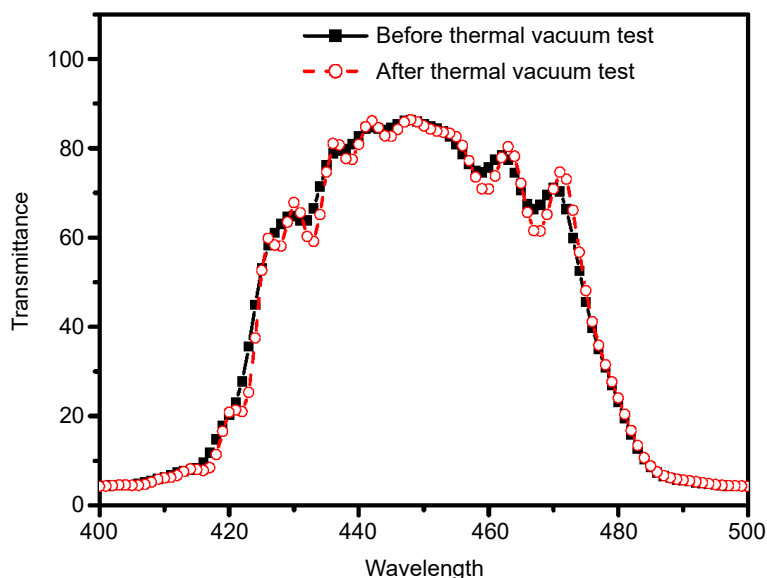


圖 12. 太空環境熱真空測試前後之光譜圖。

認識光學薄膜的基本原理與製作方式，拓展至常見的生活、科學與工業上的應用，延伸至由儀科中心所自主開發用於衛星遙測系統的「陣列式濾光鏡」，藏在其中的專業細節以及設計、製造與測試的各項挑戰，都是造就我國的遙測衛星關鍵技術發展上的重要里程碑，這類太空科技的關鍵元件，大多是國際管制輸出的項目，不是有錢就能買到的，臺灣需要自主開發的關鍵技術就由國家級的研發單位來挑戰與實現。

參考文獻

1. 邱柏凱, 蔣東堯, 蕭健男, 陳峰志, 科儀新知 222 期, 淺談近年光學薄膜之應用 (2020).
2. 李正中, 光學薄膜與鍍膜技術 第九版, 藝軒圖書出版社 (2019).
3. 邱柏凱, 陳宏彬, 蕭健男, 陳峰志, 科儀新知 217 期, 遙測酬載陣列式濾光鏡設計與製作 (2018).

作者簡介

陳柏荔女士為國立清華大學動力機械博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。
Po-Li Chen received her Ph.D. in Power Mechanical Engineering from National Tsing Hua University. She is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

莊子右先生為國立成功大學工業設計碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理工程師。

Tzu-Yu Chuang received his M.S. in Industrial Design from National Cheng Kung University. He is currently an Engineering Assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳宏彬先生為國立中央大學光電科學與工程博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Hung-Pin Chen received his Ph.D. in Optics and Photonics from National Central University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.