

淺談近年光學薄膜之應用

Introduction to Applications of the Advanced Thin Film Technologies

邱柏凱、蔣東堯、蕭健男、陳峰志

Po-Kai Chiu, Donyau Chiang, Chien-Nan Hsiao, Fong-Zhi Chen

本文敘述光學薄膜技術，從一般日常家用的太陽眼鏡與藝術品，民生消費需求的相機鏡頭，拓展至最嚴苛的太空科技中的取像裝置，同時更因應製程需求，延伸至 IC 半導體與封裝產業。另外，透過感測器的蓬勃發展，也廣泛用於生物醫學產業與智慧車產業中各式與感測、取像中與光學有關連的器件…等。在短短數十年間，鍍膜的工藝技術，透過科技的演進與工業技術的精進，已發展成為各個領域製作關鍵性零組件不可或缺的關鍵技術，儼然已經成為現今所有高科技產業背後強大的支撐技術的後盾。文中也介紹儀科中心曾經開發的產品以及開發的理由。

This article gives a brief introduction of thin film technologies which can apply for the variety of goods. The application fields include the sunglasses or art decorations used in the daily life, the camera lens used in consumer devices, and extend to image capture device used in the space instrument subjected to strictly harsh environment, the optical components used in semiconductor and packaging equipment required for the precise and accurate operations. In addition, the applications of thin film technologies are also for the optical components, sensors and image devices related to the optics which are for biomedical industries and automobile industries. Within a few decades, the thin film technologies become an indispensable technology to produce the key and functional parts in all fields and an invisible but profoundly necessary backup for the high tech industries. The thin film technology continues to be advanced with the improvements of the other technologies. In this article, we report what optical components we have developed and the reasons why we have to invent.

一、前言

什麼是光學薄膜？近年來大家應該都已經被眼鏡行訓練得很好，您要升級成抗藍光的鏡片嗎？一般抗藍光鏡片是屬於添加吸收型，高階鏡片則是利用真空製鍍光學薄膜的方式，除了可以更完全的阻斷危害的藍光之外（可以濾除波長 450 奈米以下的藍光，效率可達 95% 以上），還可以調控鏡片的顏色。但光學薄膜是從甚麼時候開始被應用於工業產品上呢？大約為三十年代中期，德國的鮑爾和美國的斯特朗先後用真空蒸發方法，製備了單層減光反射膜，這種簡單的減光反射膜，至今還被大量地應用在一般的光學裝置上。當在折射率為 1.52

的玻璃上鍍製或是塗佈一層折射率為 1.38 的氟化鎂薄膜後，單面的反射率可從 4% 降低到 1% 左右，如果有一平板系統必須堆積 5 塊玻璃平板，當玻璃雙面鍍膜後，在參考波長上總的透射率，可近似地估計為： $T = (0.98)^5 = 90.4\%$ ，比較未鍍膜的系統： $T = (0.92)^5 = 65.9\%$ 。因此經過鍍膜的系統比沒有經過鍍膜處理的系統，透射能量提高了約 24%。

二、藝術用途的應用

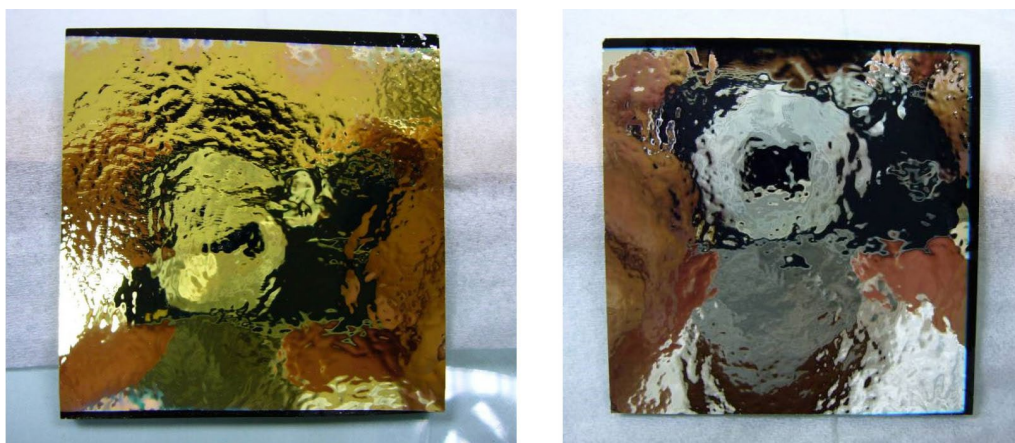
圖 1 為列舉數項工藝藝術品，使用表面鍍膜作為裝飾，既增加美觀，也提高了產品的附加價值。玻璃工藝作品除了對於一般藝術品的審美要素之外，更需要具有獨特的「機能美」，例如變色、透光、折射等，更透過高度的「技術美」，例如徒手吹製、徒手熱塑、實心塑造、空心製作、熔合、烤彎等製作技巧，來實現美的實體形貌。所以藝術先驅者思索如何將琉璃藝術，有不同角度的變色特性。



圖 1. 使用表面鍍膜技術增加工藝品的美觀，也提高藝術品的價值 <http://www.markditzler.com> & <http://www.editionslm.com>。

光學薄膜具有隨著角度變換而變化不同的顏色 (這叫做藍移色飄現象)，以及鍍膜材料受到熱處理後，具有顏色變化的功能。然而此時琉璃製作工法程序就引起廣泛的討論，是要先完成琉璃成品後，在表面再進行鍍膜？還是直接將光學薄膜鑲入琉璃。前者的工法相對簡單，但會失去琉璃原有表面的質感，色彩飽和度也略嫌不足。所以藝術家與鍍膜技術產生了聯結與火花，將光學薄膜鑲入琉璃，再經過玻璃轉換溫度的過程大約為 $500-600^{\circ}\text{C}$ 瑕燒，此時光學薄膜的材料，會因高溫退火而產生第一次的顏色飄移，透過不同的角度觀察，則會有第二次的顏色飄移。藝術家在製作琉璃成品過程中，必須隨時掌握鑲入琉璃中的光學薄膜的顏色變化，這問題是鍍膜工程師必須解答的。舉例來說，一般最常用來製作光學薄膜的材料為二氧化鈦，二氧化鈦薄膜經過 $500-600^{\circ}\text{C}$ 加熱退火後，其光譜會產生飄移，所以呈現的顏色就會有所不同，如圖 2 所示。

鍍膜工程師除了透過模擬軟體，依據觀測角度與顏色的關係，預測顏色轉換，還要藉由實驗的經驗值，預測加熱前、後的顏色變化，並建立一系列的色彩資料庫，提供藝術家進行藝術的創作。除此之外，在進行光學薄膜膜堆設計時，亦須調整膜堆與薄膜層數設計，提升光學反射率與增加琉璃藝術品中所謂的『雙色鏡』傾角變色視覺效果。經過設計改良後，雙色鏡可較先前設計提高薄膜反射率與色彩飽和度，同時提高雙色鏡的色彩對比，其光譜於 0° 與 45° 量測，如圖 3 所示。



900 (白銀色)—未熱處理

900 (白銀色)—已熱處理

圖 2. 對照二氧化鈦薄膜材料沒有經過熱處理過程 (左圖) 與經過熱處理過程 (右圖)，在顏色對比的比較。

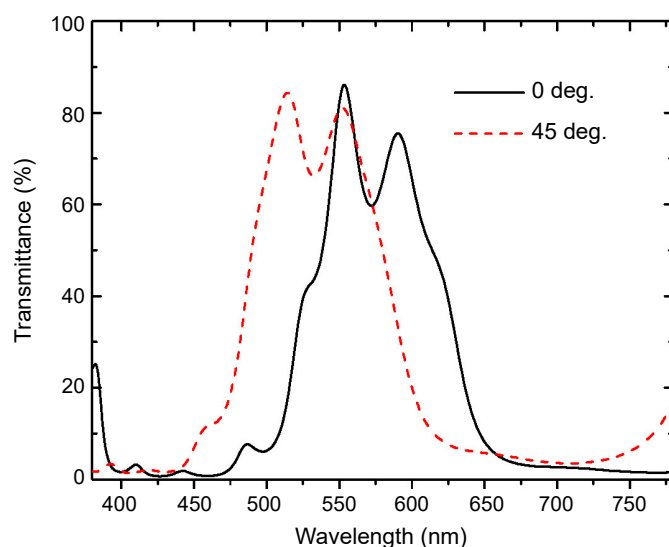


圖 3. 經過光學薄膜堆設計後的光譜圖，於兩個角度量測，提高了薄膜反射率與色彩飽和度，同時提高雙色鏡的色彩對比。

三、飛機航拍與太空衛星陣列式濾光鏡的應用

遙測衛星就是一部接近無限焦距、高解析度的相機，其作用是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。這塊濾光鏡由上而下，區分成五區，各別能讓藍光、綠光、白光 (就是所有波長的光)、紅光、以及近紅外光穿透，穿透光接著由位於後方的影像感測器接收，再將光訊號轉為電訊號，回傳到地面接收站，而電腦依據各色光的強度與位置，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，所製作出來的元件與器件，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) 成效最直

接的方法。然而符合太空規格的這項技術，目前全世界皆為先進國家所管制，因此開發符合太空規格光學薄膜技術的重要性不言可喻。經過儀科中心多年的努力，五波段的帶通濾光鏡陣列，通帶間距由於受到機械式遮罩製程的限制，僅能縮至釐米等級，若是使用黃光微影微圖化整合製程，可將間距縮小至微米等級，有利衛星遙測酬載收光量與解析度(空間及光譜)之提升。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、以及 9022 測試。發展此項元件並安置於儀器的重要性，在於台灣屢遭受颱風侵襲時，可以立即由飛機承載植被及國土變遷觀測儀 (vegetation and change detection imager, VCDi)，往赴災區取像，取代會受天候影響、而被雲層遮蔽的衛星影像，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。儀科中心於 2012 年完成了光阻遮罩式、多波段帶通濾光鏡陣列，見圖 4，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，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。

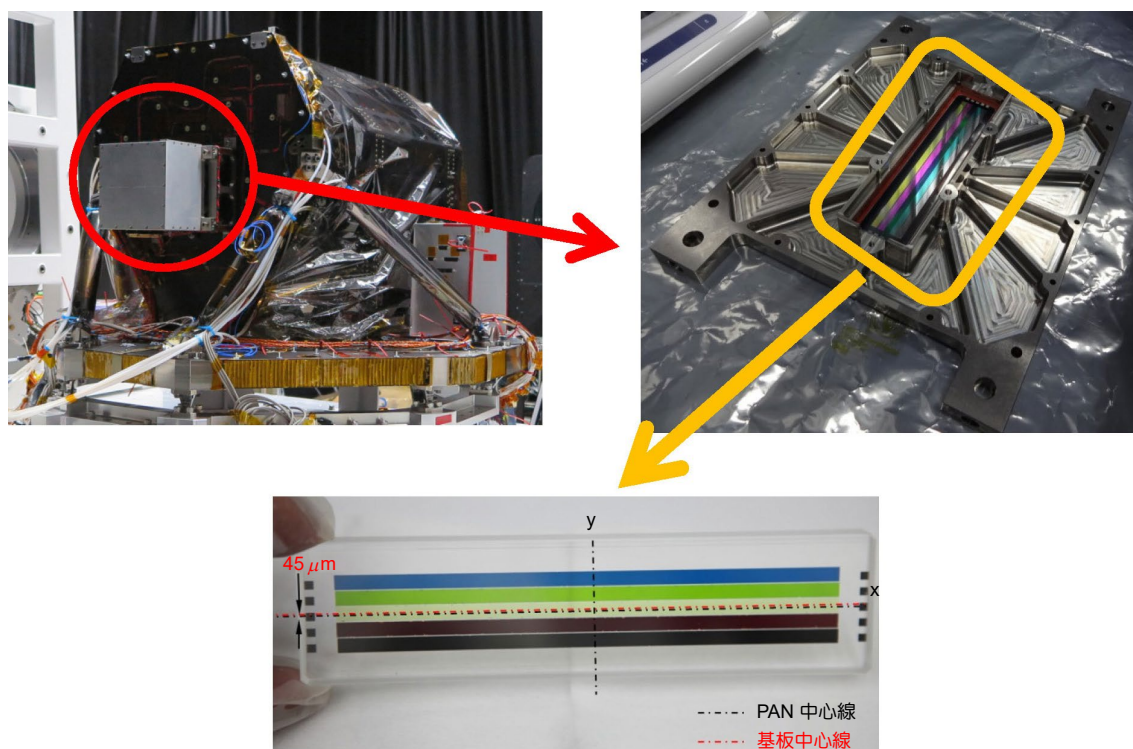


圖 4. 陣列式帶通濾光鏡安裝於福衛五號相關位置圖片。

四、鍍膜技術從太空科技推展至 IC 半導體產業

半導體產業是我國最重要的高科技產業，亦於全球市場佔有舉足輕重的角色。而以半導體市場區域劃分，亞太區是目前全球最大的半導體市場，台灣已經連續第五年成為全球最大的半導體設備市場之一，目前台灣所擁有的技術與扮演的角色，除了台積電在半導體晶片製程技術的開發外，另外則分別是半導體後段封測與檢測設備的部份，以及相關備用與替代品

零件的研發與供應，相對較缺乏半導體前段製程設備技術以及系統整合的能力。有鑑於此，於 105 年政府展開「光電及半導體設備產業發展計畫」，目的為提升國內光電及半導體設備與零組件自製率，減少進口設備依賴。且於 106 年度起推動「前瞻基礎數位建設—自研自製高階儀器設備與服務平台計畫」，整合國家研究單位與產、學界研發能量，主要重點是因應目前國內半導體曝光機設備皆依賴進口、且價格昂貴，因此針對半導體先進封裝製程用步進式曝光機進行布局開發，除了消弭產、學界半導體設備之落差，亦可加速國內半導體設備發展進程，強化國內半導體業未來技術布局，並致力研發先進封裝製程設備暨關鍵零組件。

台灣光學鍍膜廠商在消費性電子市場的需求上，於功能性鍍膜在於可見光波長的範圍 (400 nm – 700 nm)，技術最為熟悉與熟練，因為消費性電子產品是直接廣由消費大眾所使用，因此配合人眼能夠觀察到的波長。然而對於波長短於 400 nm 或是長於 700 nm 的鍍膜技術，則僅限於學術研究，並沒有實際上量產的實績。儀科中心在半導體設備鍍膜計畫，率先接觸到大口徑的 i-Line 鍍膜，其使用波長為 365 nm，利用高壓汞燈為光源，所使用之鍍膜材料仍然延續可見光波段之高、低折射材料對，也就是二氧化矽與二氧化鈦材料對或是二氧化矽與五氧化二鉬材料對，這些材料的多層膜堆設計、鍍膜的參數調整以及量測手法與需要注意之事項，大部分仍然延續可見光的材料對製程條件與量測規範，只是應用之光源能量變強，因此膜堆設計的誤差可容許量大幅縮減，各種操作參數的變異量，也需要嚴謹、且有經驗的被控制。但是當使用的光源能量由 5 kW 增強至 25 kW 時，單位面積所承受的功率與熱量必須要重新考量，但是也因為高瓦數的光源，造成單位面積功率密度提高，以及短波長、高光子能量的特性，原先在 i-Line 波長下使用的材料對，必須更在乎薄膜吸收問題與鏡片本體瑕疵問題，這是自然給予的材料限制。我們也無法創造任意組合的折射率差值 (Δn)，以便於堆疊出所需求的光譜圖案。當波長持續地縮短，以便於產生更窄的線寬圖樣時，在目前所知可以使用於紫外光之薄膜材料對，具有可以接受的消光係數 (extinction coefficient)，就只有少數的稀土氧化物以及氟化物組合，然而除了原材料成本增高外，在技術上需要克服的困難更多，例如在鍍膜製程中，若是化學元素成分的對比不對、或是密度不足，鍍膜時具有缺陷、雜質、應力、不良之膜層介面或是表面平整度不足、清潔不良的基板，鍍製後所獲得的薄膜，則具有不可接受的吸收率。而在鍍製的過程中，如何控制補足氣氛，得到所需求的化合物組成，讓化合物中各別元素的成分保持固定，考驗鍍膜經驗與技術，也考驗著設備監控能力。此外，鍍製後的氟化物，一般極容易與存在於大氣環境中的水或其蒸氣化合，造成潮解，衍生光學性質產生大變異，因此如何密閉、保存以及封裝等，也是在實際生產中需要解決的課題，這也是需要在初始的設計階段，就必須要詳細思考的務實問題。

如圖 5 為儀科中心鍍膜工藝，藉由衛星計畫所延伸到半導體曝光機光學元件，包含了 45 度斜面反射鏡、特性波長的能量調控元件、抗反射透鏡、偏振曝光機之偏振元件與 i-Line、h-Line、g-Line…等設備光源用之濾光鏡片。

1. 紫外光譜帶通濾光鏡片設計

紫外光譜帶通濾光片之設計，其製作困難度高於一般可見光與紅外光所使用的濾光鏡，主要的困難處為紫外帶通濾光片之中心波長飄移率要求，遠遠高於其他波段光譜之要求，因為紫外光的波長本身就短，鍍膜厚度的精準度就要求極高。以日本大廠 CANON 應用於半導體設備之步進式曝光機 (stepper)，對其紫外帶通濾光片要求得知，其中心波長飄移規格要求之嚴，高於福衛 5 號濾光片，且是製鍍於大面積之光學玻璃鏡片上。作為紫外帶通濾

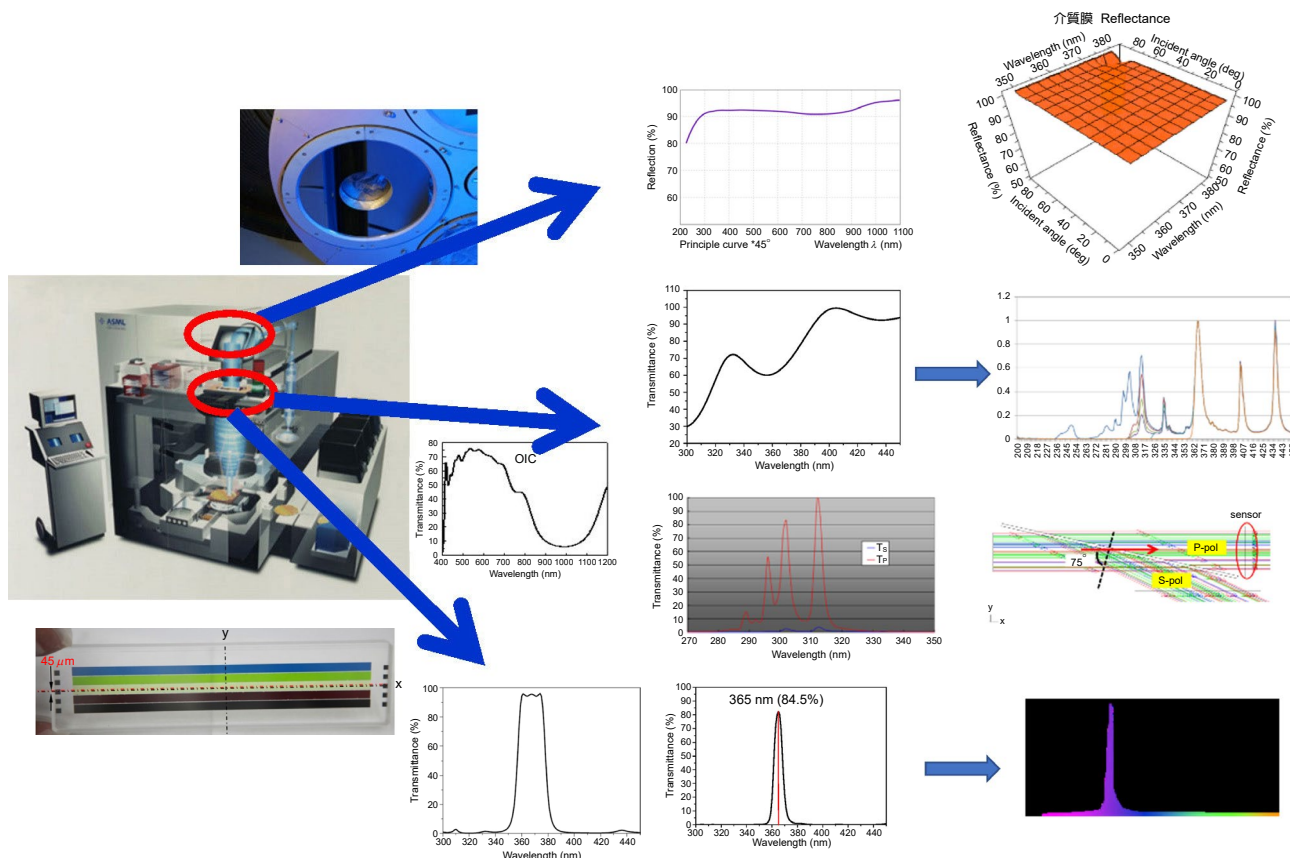


圖 5. 儀科中心鍍膜技術衍生之用於半導體設備上的各式產品。

光片開發，一般預期此濾光鏡片通帶應介於 360 nm－370 nm 之間，而頻譜 300 nm－350 nm 與 380 nm－450 nm 為止帶。由於此關鍵零組件屬國際大廠的商業機密，關聯到整體系統細節，故無法明確地確定其規格，我們只能夠透過逆向工程，找出適合曝光機光路設計之紫外光譜帶通濾光片規格，並於 2 吋與 8.5 吋石英光學玻璃鏡片上進行實驗的製鍍。濾光鏡片以高、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)，用以減少穿透帶間干涉波紋與反射，提昇穿透率，設計概念為：

Sub / NmSub / 對稱膜堆 / NmAir / Air

其中 Sub 指的是基板，NmSub 為膜堆與基板匹配層，而 NmAir 則是膜堆與空氣間匹配層。最後，將此初步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，其膜層仍為高、低折射率材料堆疊 (如 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$)，並利用氧離子輔助蒸鍍製鍍帶通濾光鏡，光學工作波段在 300 nm－450 nm 範圍內，此範圍是配合汞燈功率 350 W 平行光光源的頻譜波段，如圖 6 所示。由於紫外波域吸收較大，因此欲兼顧寬廣波域之濾除與通帶之高穿透率 (> 90%)，必須於膜層之堆疊上做特殊之處理，必要時將以電腦優化處理輔助，務求達到通帶之高穿透率與截止帶之低穿透率，圖 7 為電腦所跑出的測試規格模擬光譜圖之一件案例。

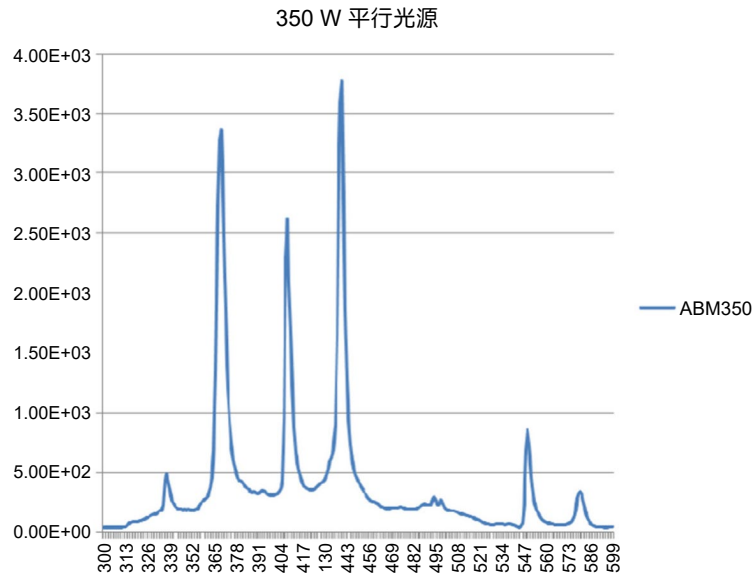


圖 6. 汞燈 350 W 平行光光源的強度與頻譜波段的關係圖。

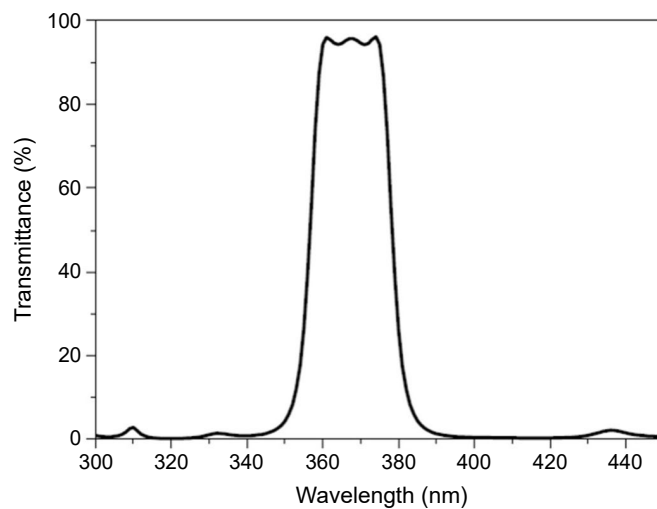


圖 7. 通帶之高穿透率與截止帶之低穿透率的最初階段模擬光譜圖案例。

2. 曝光機之衰減元件設計與製作

曝光機的中性衰減片 (neutral density filter) 最終將放置於曝光機之最末端，如圖 8 所示。若是剛開始將此中性衰減片放置於橢圓面鏡之出光口處，如圖 9 所示，雖然可縮小中性衰減片之製作面積，但是放置於此位置上，由於光源為非平行光，越接近光源，入射角度的變異越大，因此會有 0 至 25 度不等的大角度入射角範圍，這些不同的入射角將會造成 filter 穿透光譜的漂移現象，如圖 10 所示。不同之入射角度對於獲得同樣穿透率的波長產生飄移，導致薄膜濾光與均勻性效果不佳，甚至導致濾光光譜錯誤。因此在考量角度造成光譜飄移，以及 filter 接近光源時，雖然可以帶來小的製作面積，但也伴隨著接近光源後，受光能量大增與能量和溫度分佈較不均勻等缺點，因此捨棄將此 filter 放置於前端的概念，因此決定將此 filter 的尺寸做大，安置於曝光機的末端光源出口處。

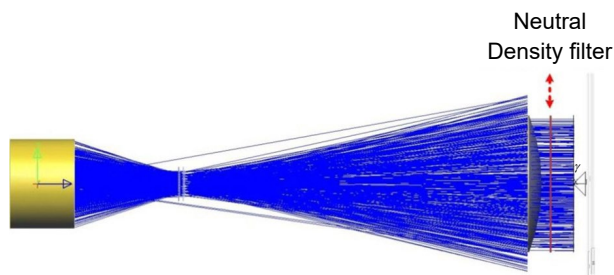


圖 8. 理想 Neutral density filter 將放置於曝光機之最末端的光路徑模擬圖。

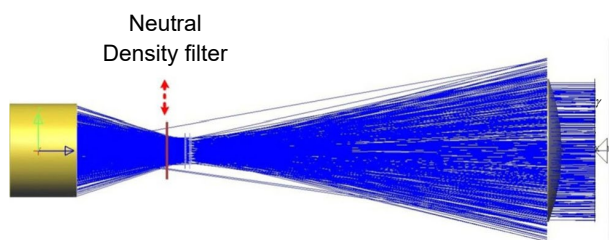


圖 9. 將 Neutral density filter 將放置於曝光機之最前端的路徑模擬圖。

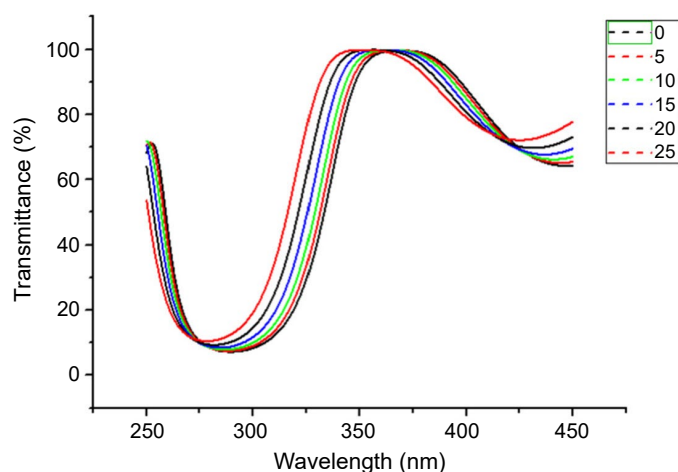


圖 10. 不同入射角所造成之 Filter 穿透光譜漂移現象。

而為驗證所設計出中性衰減片能符合需求，故後續我們設計出之中性衰減片膜層參數，導入 LightTool 光學模擬軟體，進行模擬驗證。在此我們分別建立 20%、50% 與 75%，三種衰減比之中性衰減片，並將此三種中性衰減片分別進行模擬結果驗證，其比較結果如圖 11 所示。由模擬結果圖來看，可發現在 365 nm 波段，其光源原始功率約為 29.4 W/nm，而其經過 20%、50% 與 75% 之 neutral density filter 後，其分別降低為 6.12 W/nm、12.36 W/nm、21.78 W/nm，並與廠商驗證，符合一開始客戶所要求之比例值。

3. 廣波域吸收型衰減片膜堆設計

以下介紹為兩種廣波域吸收型衰減片的設計實例。穿透率 20% 之一般廣波域衰減片，中心波長設定為 350 nm，膜堆結構為 AIR/(HL)⁶H/GLASS，其穿透率與反射率隨著波長變化，如圖 12(a) 所示，因為反射率於工作區域高達 80%，如此高反射率容易產生例如鬼影的

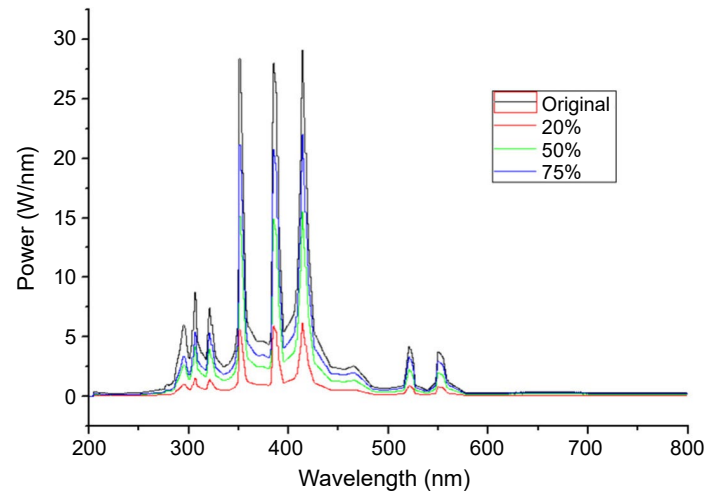


圖 11. 不同 Neutral density filter 衰減比對波長結果比較關係。

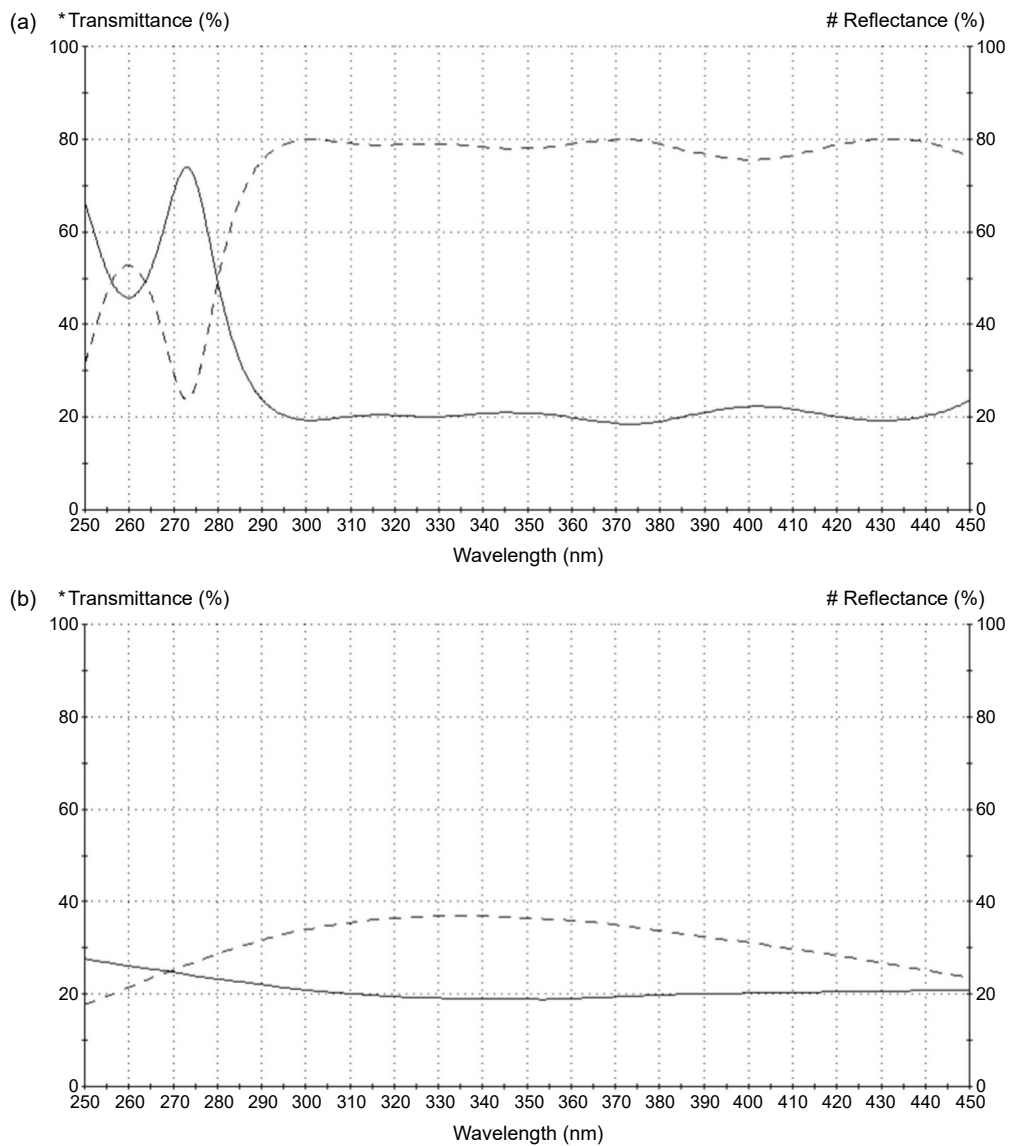


圖 12. 穿透率 20% 之廣波域衰減片 (a) 非吸收型 (b) 吸收型、中心波長 350 nm。

副作用。而經過儀科中心所設計之廣波域吸收型衰減片，中心波長仍為 350 nm，膜堆設計結構為 AIR / M (HL)³ / GLASS。比較一般型與吸收型衰減片，吸收型所用的鍍膜層數較少，但是多增加一層金屬吸收層。其穿透率與反射率隨波長的變化分別如圖 12(b) 所示，此設計不僅將反射率在工作區間壓低，同時穿透率在工作區間內更為平滑與擴大。式中的 H、L 是為高、低折射率材料鍍膜，M 則是金屬薄膜。

此為第二則儀科中心製作廣波域衰減片的實例。規格為穿透率 50% 之一般廣波域衰減片，中心波長 370 nm，膜堆結構為 AIR / (HL)⁶ H / GLASS，其穿透率與反射率隨波長的變化分別如圖 13(a)。穿透率在波長工作範圍 290 nm—450 nm 為 47% ± 1.5%，而反射率為 52% ± 2%，因為高反射率緣故，因此常會出現鬼影或是眩光等副作用。而儀科中心開發之廣波域吸收型衰減片，中心波長 370 nm，膜堆結構為 AIR / M (HL)³ / GLASS，其穿透率與反射率隨波長的變化分別如圖 13(b) 所示。穿透率於工作區間內高達 55% 以上，同時將反射率壓低到 13% 以下。式中的 H、L 是為高、低折射率材料薄膜，M 則是金屬薄膜。

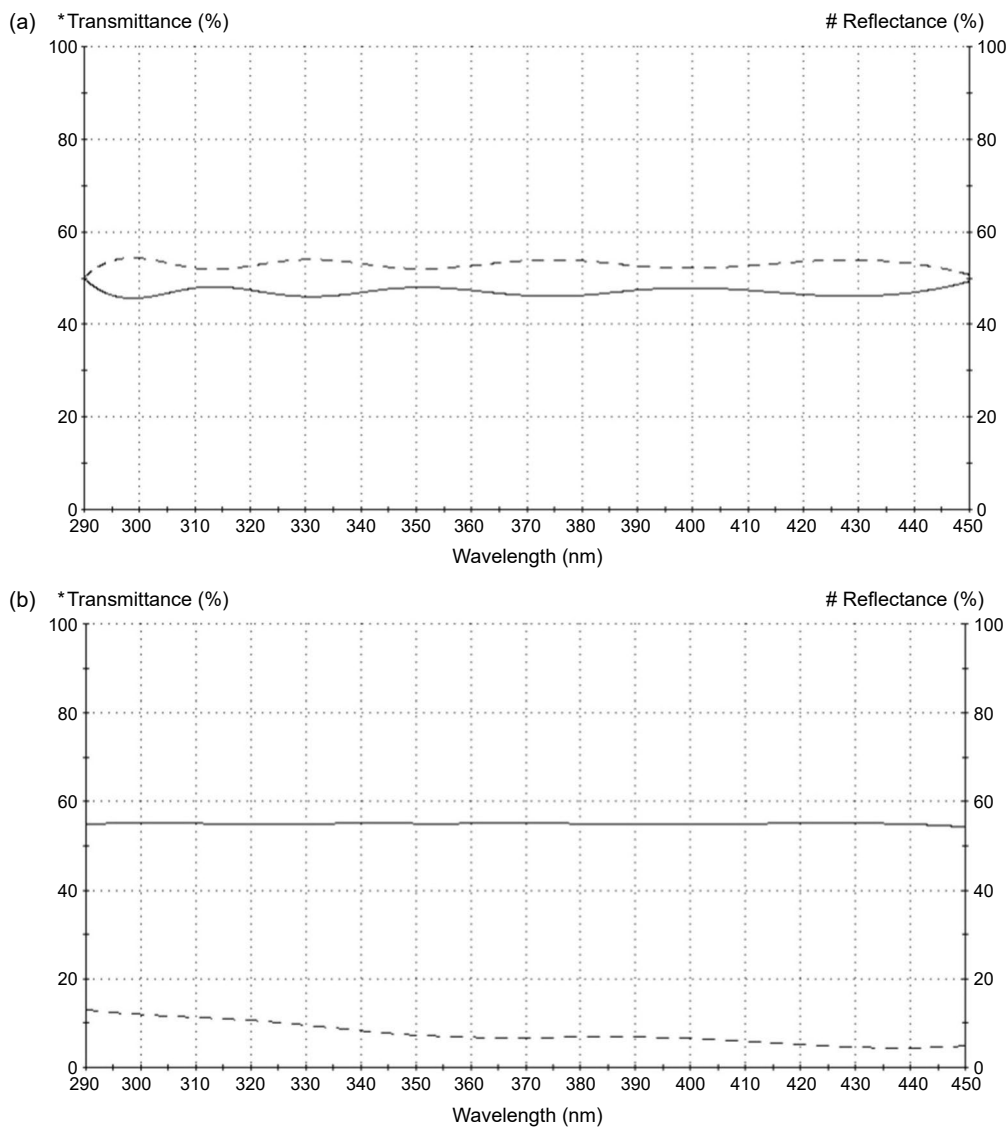


圖 13. 穿透率 50%、中心波長 370 nm 之廣波域衰減片開發舉例 (a) 非吸收型 (b) 吸收型。

4. 具光源波段選擇之衰減元件

以目前產業所處環境現象與需求，光阻廠商必須先驗證自己的光阻特性，進而提供資料給使用者，而設備供應商需要配合光阻廠商的需求，提供適當波長的光源。因為光阻的吸收、固化特性，只會發生於極為狹窄的波長內，因此設備與光阻是配對一起出售。由於目前各設備廠商所提供 UV 光源的波長種類太多，所以光阻廠商所提供的資料無法完全對應，儀科中心因應業者的需求，開發一款具有光源波段選擇之衰減元件，可以適用於不同設備商提供之 UV 光源。當套入此衰減元件可以有限度的改變光源特性波長的強度，讓原先只能夠使用某一家廠商的光阻，可以同時適用另一家公司的光阻。因為此衰減片，可以降低設備的投資費用，增加曝光機設備在不同光阻供應商間運用的靈活度。當初開發設計流程簡述如下，依市面上所獲得光源的各種光譜做疊加，發現光阻所使用的光源只在於 365 nm 以下的波長有明顯變化，又發現 filter 在 365 nm 以下藉著各種斜率變化，可以讓 300–450 nm 光路設計去做各種光譜的切換。製作此 filter 最大的優點是可以利用原先不能使用的光阻設備，在安裝此衰減片後，讓製程廠商可以根據光阻廠商的資料進行驗證，不需要因為使用不同廠商的光阻，而需要新增購置多部設備。

(1) 產業對於波段選擇 filter 的需求

依據國內設備供應商的高壓汞燈的光譜圖，見圖 14，與產品製程廠商提供的需求，如圖 15 以及 16，我們可以定義出偏振曝光機的工作光源範圍為 300 nm–436 nm。針對此工作光源範圍，進行濾光透鏡元件的設計，預期效果能到達日商公司所提供之工作光源量測圖。茲以曾經開發之濾光片為例，將開發後的濾光片套入原先高壓汞燈，於改變汞燈的光譜於工作波長範圍內，成為產品製程廠商能夠接受的光譜。

- (1) 將國內設備供應商所提供光源的 A 光譜轉變成 B 光譜，以符合 ABM、DNK、大尺寸光源等光譜
- (2) 將國內設備供應商所提供光源的 A 光譜轉變成 C 光譜，以符合 USHIO、或其他國內設備供應商等的光譜

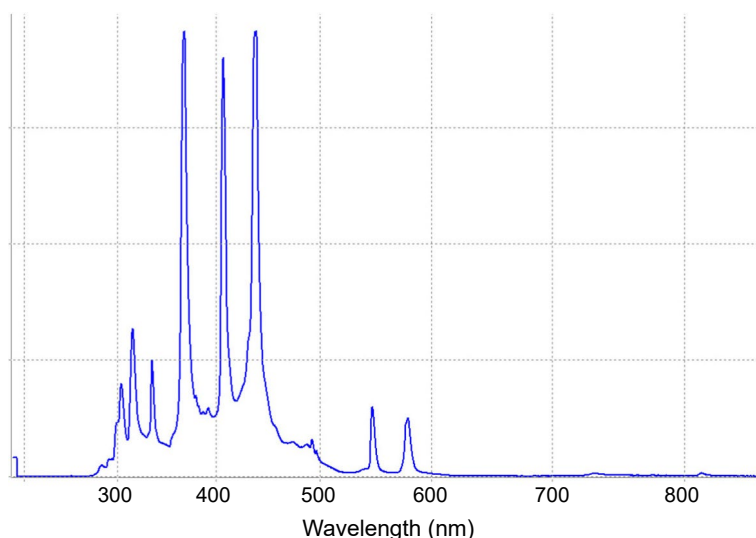


圖 14. 300–450 光路、300–405 AR，國內設備供應商近期光路設計 (A)。

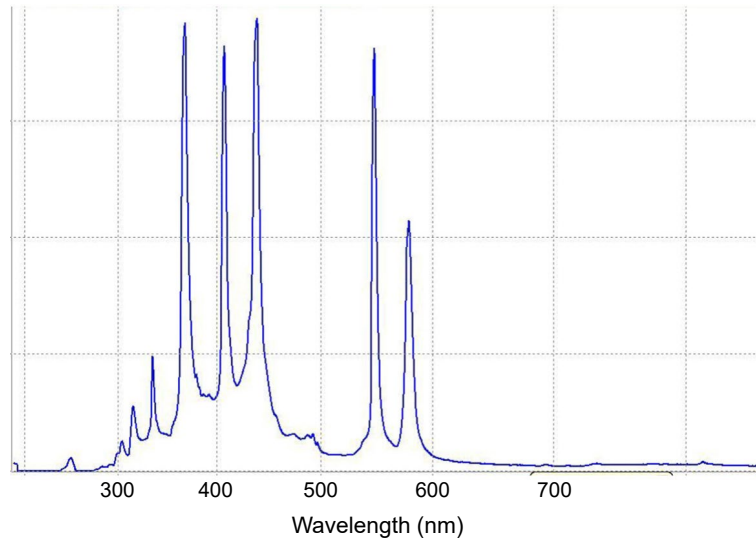


圖 15. 300–450 光路、300–405 AR，ABM、DNK、大尺寸光源等光譜 (B)。

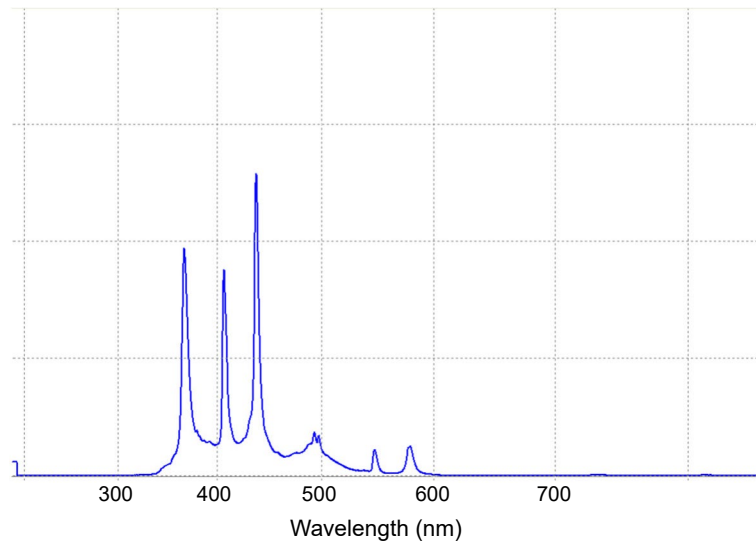


圖 16. 300–450 光路、300–405 AR，如 USHIO、早期光源光譜 (C)。

(2) 特定波長廣波域衰減片膜堆設計

某一設備供應商提供之原始光源，如下圖圖 17 的紅色曲線所示(標示target 1)，經過第一次的試作濾光鏡片的結果，如圖中所示 (標示 target 2)，而本節是敘述製作一特定廣波域衰減片 (濾光片) 將原始光源改變形成 Daxin 設備使用之特殊光源。圖 17 下圖 (標示 target 3) 是將該廠商的光源，經過 Daxin 紫外特定波長衰減片整形後，所得到的光譜圖，也是製程廠商能夠接受的光譜圖。

本衰減片開發的歷程簡述如下：以設備廠商提供之原始高壓汞燈光源為基準，並以 365 nm 的光穿透率訂為 100%，其他波長的穿透率相對以此穿透率的值進行百分比定義，如表 1 所示，並設計一特定波長衰減片，預期原始高壓汞燈光源，經過此特定波長衰減片之整形後，可以獲得如表 1 所示之 Daxin 之光源光譜穿透值。當以此條件進行衰減片設計時，其中仍必須考量薄膜的敏感性與量產性，所以在光學薄膜設計時，須在不增加薄膜敏感性的前提

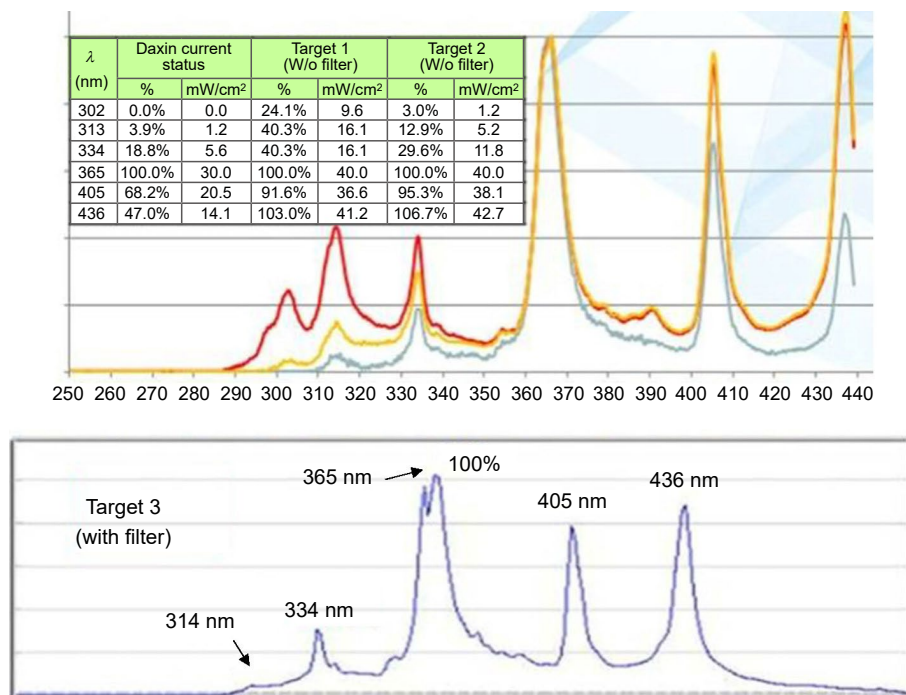


圖 17. 特定波長廣波域衰減片規格。

表 1. Daxin 光源與原始高壓汞燈光源之波長與穿透率對應值。

A (nm)	Daxin current status		Spectrum (none filter)	
	%	mW/cm ²	%	mW/cm ²
302	0	0	24.1	9.6
313	4.0	1.2	40.3	16.1
334	18.7	5.6	40.3	16.1
365	100	30	100	40
405	68.3	20.5	91.5	36.6
436	47	14.1	103	41.2

下，盡量減少薄膜堆層數，如此才能設計出最佳的光學薄膜參數。依據這些相關的考量，本團隊將光學薄膜衰減片設計成似正弦波型態的光譜如圖 18，結果證明所得到濾光光譜可以被業者所接受。

5. 偏振曝光機之偏振元件

曝光機所使用的偏振元件，一般有兩種型態，即為膠合稜鏡式偏光鏡，以及平板式偏振分光鏡，其產品規格之一是在工作的波長範圍，偏振透設比 $P = T_p/T_s$ 必須要至少高於 20:1。以下將對此兩種偏光鏡，在功能上做簡單的介紹，同時說明其模擬方式、試做結果與偏振比的說明。因為膠合稜鏡式偏光鏡是商業上常用的偏光鏡，也有專利保護，我們則開發平板式偏振分光鏡用來取代膠合稜鏡式偏光鏡。

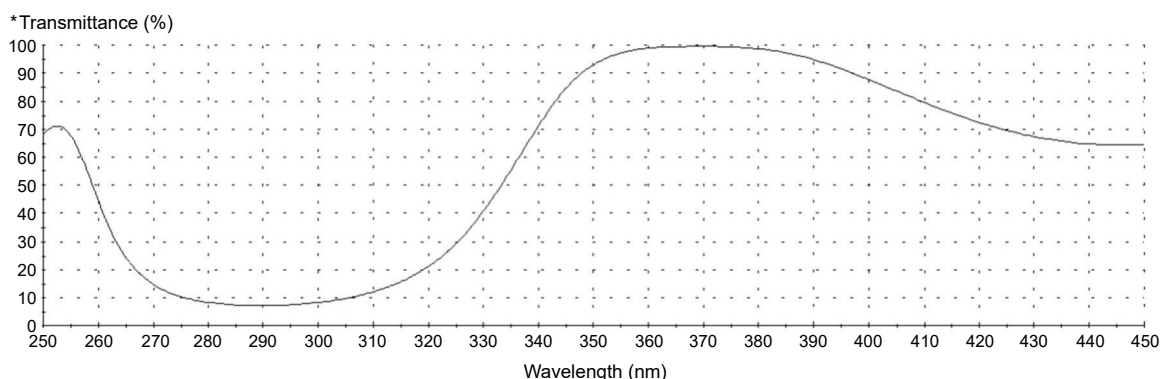


圖 18. Daxin 紫外廣波域特定波長衰减片模擬光譜圖。

(1) 膠合稜鏡式薄膜設計

膠合稜鏡式薄膜偏光鏡設計為光源入射石英玻璃，進入多層光學薄膜，形成偏振態之後，再經由石英玻璃出射。其膜堆結構為 $\text{Quartz}/(\text{HL})^5\text{H}/\text{Quartz}$ 。光入射該設計薄膜材料，在波長為 313 nm 時，其角度 $\theta_0 = 48.55^\circ$ ，結果得知 T_p (P 偏振的穿透率) = 100%，而 T_s 也接近 100%，如圖 19 所示。由圖可以明顯看出偏振透射比 $P = T_p/T_s$ 並不高，使得應用受限。

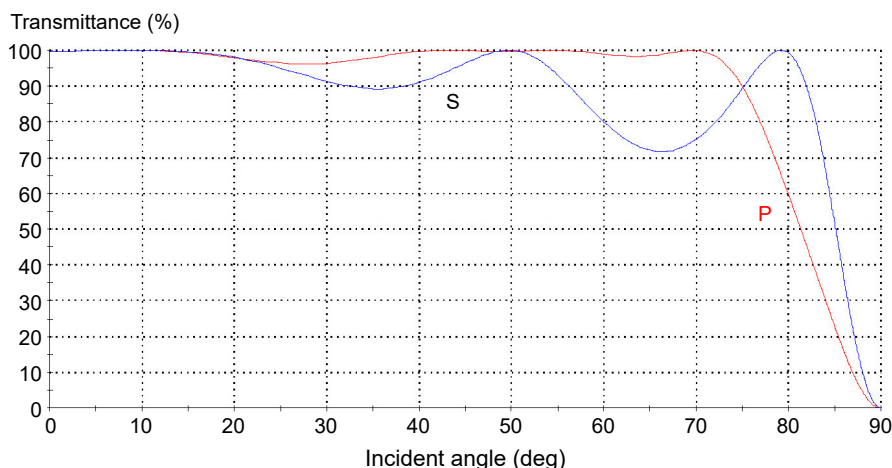


圖 19. 一膠合稜鏡式偏光鏡穿透率與入射角之關係圖。

(2) 平板式偏振分光鏡薄膜設計

平板偏振分光鏡主要為空氣入射薄膜層，S 偏振光之 (η_H/η_L) 之比值，隨入射角度增加而變大，P 偏振光之 (η_H/η_L) 的比值，隨入射角度增加而下降。式中 η_H 與 η_L 分別為介電質材料的等效光學導納與自由空間導納。依據半高頻寬 (half-peak bandwidth) 得知，S 偏振光之四分之一波膜堆的高反射區增寬，而 P 偏振光之高反射區變窄，於是中間出現了 S 偏振光之 R 極大，而 P 偏振光之 R 極小 (T 很大) 的波域，應用此基本原理進行設計。其膜層結構為 $\text{Air}/(\text{HL})^{13}\text{H}/\text{Quartz}$ ，光由空氣 n_0 中入射於石英基板 $n_{\text{Sub}} = 1.52$ ，其布魯斯特角為 $\theta_B = \tan^{-1}(1.52) = 56.66^\circ$ 。換言之，光以 $\theta_0 = 56.66^\circ$ 入射於玻璃基板，結果 $T_p = 100\%$ ，如圖 20 所示。由圖可以明顯看出 $\theta_0 = \theta_B$ 時， $R_s < 20\%$ ，故知偏振透射比 $P = T_p/T_s$ 並不高，使得應用受限。

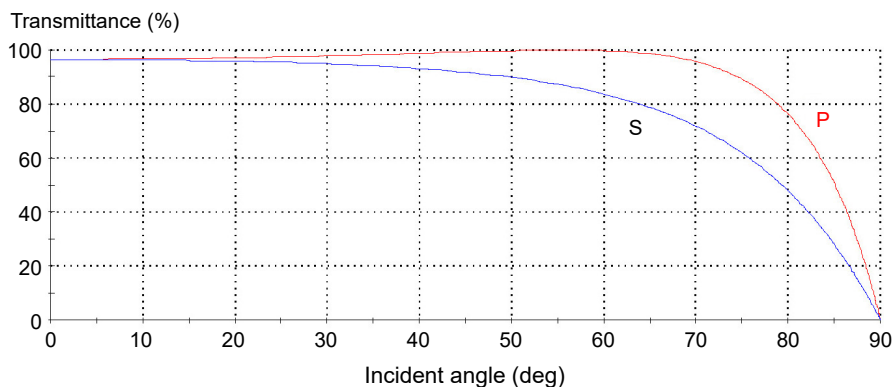


圖 20. 初期平板偏振片設計穿透率與入射角之關係圖。

(3) 紫外偏振分光鏡設計

由布魯斯特角 (Brewster angle) 特性當中得知，其入射角度會影響光學薄膜的整體偏振特性，因此在本節中，我們將討論膠合稜鏡的最佳薄膜設計，探討中紫外光波長的薄膜入射角度與偏振光穿透率之影響，並使用 Essential Macleod 光學薄膜軟體模擬方式，來計算偏振分光鏡之最佳入射角度，其波段範圍設計在紫外光 UVB 290 nm－320 nm，設計理念如圖 21 所示。

經由每段波長的變化，我們分析 S 偏振光與 P 偏振光的穿透率變化，藉由光譜圖的分析，可以得知平行光線入射於光學薄膜時，具有高偏振比的最佳角度，接著再進行其薄膜優化設計，達到最佳的偏振分光比。



圖 21. 光學薄膜設計理念流程圖。

(4) 膠合稜鏡式偏振元件模擬設計結果

經由 Essential Macleod 光學薄膜模擬軟體進行分析，膜堆設計為 Quartz / (HL)⁵ H / Quartz，Quartz 的折射率取 1.52，以每間隔 10 nm 波段的方式分析最佳入射角度的偏振比，其 λ_0 為 280 nm－320 nm、高折射率材料折射率 $n_H = 2.02$ 、低折射率材料折射率 $n_L = 1.38$ ，其穿透率 (T) 與 θ_0 光譜圖如圖 22－25 所示。

由以上各圖綜合可知，若希望 290 nm－320 nm 得到最大的偏振透射比 P，則入射角度須介於 45°－50° 之間，故我們選擇以 50° 入射角，進行偏振薄膜設計。當入射角度 50°、中心波長 313 nm，則膜堆結構為 1.52 / (HL)⁵ H / 1.52，其穿透率隨波長的變化，分別如圖 26 所示。最後，本設計以 50° 入射角度的方式，進行優化膜層，先應用光學薄膜軟體分析影響偏振比最敏感的膜層，接著再將目標膜層進行優化，其優化之後理想光譜圖，如圖 27 所示。

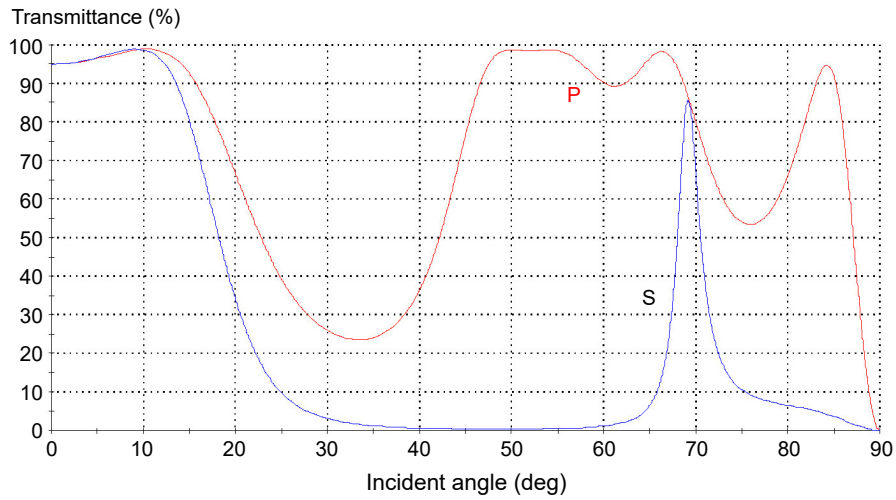


圖 22. $\theta_0 = 50^\circ$, $T_p = 98\%$, $T_s = 0.1\%$ 。

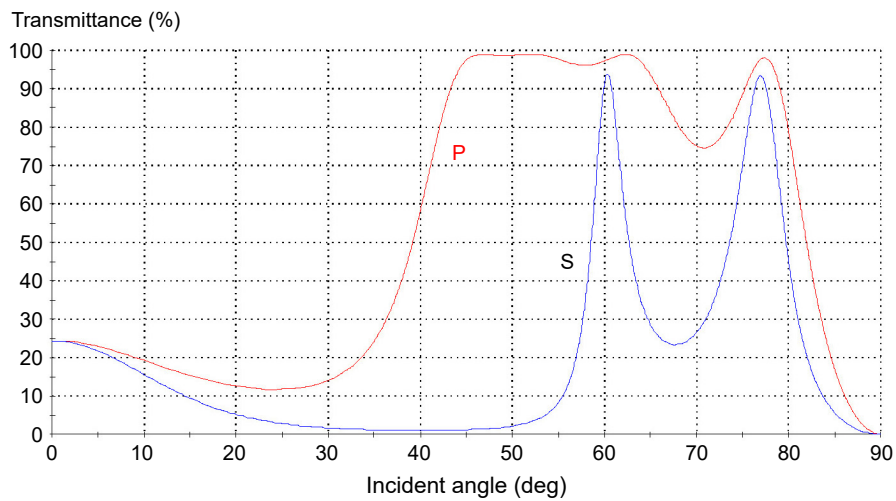


圖 23. $\theta_0 = 49^\circ$, $T_p = 99\%$, $T_s = 1.37\%$ 。

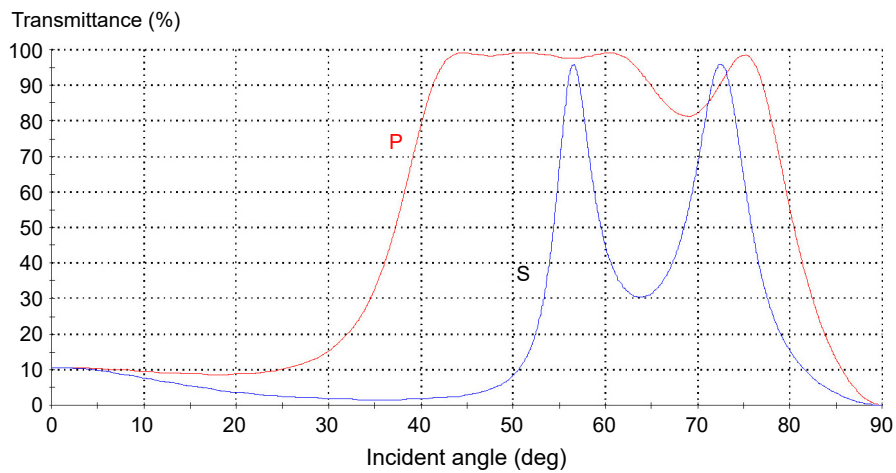


圖 24. $\theta_0 = 44^\circ$, $T_p = 99\%$, $T_s = 2.64\%$ 。

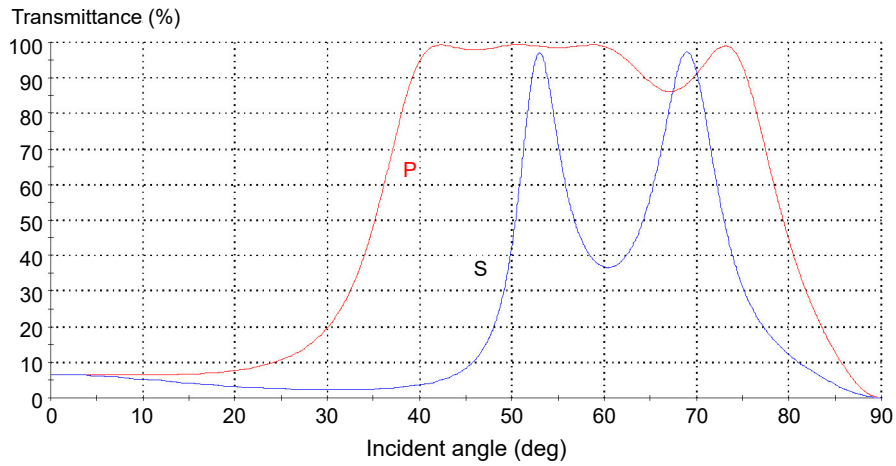


圖 25. $\theta_0 = 42.5^\circ$, $T_p = 99.23\%$, $T_s = 5.05\%$ 。

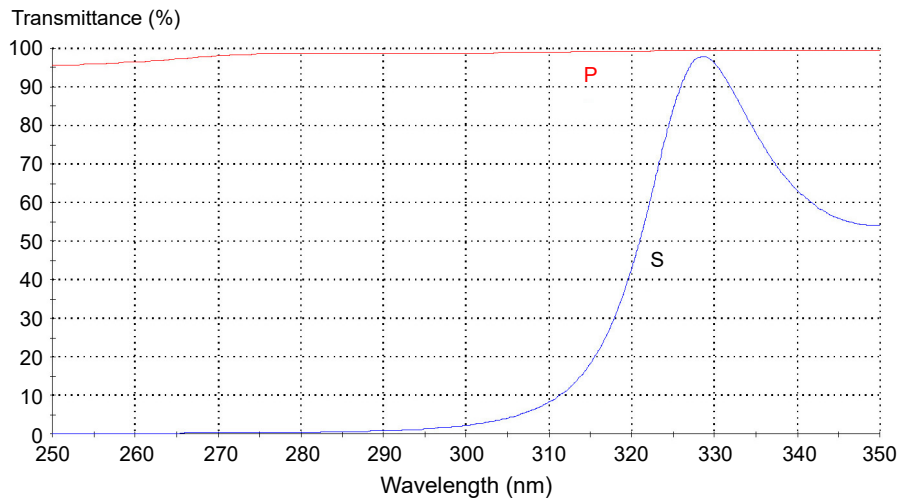


圖 26. 入射角度 50° 、中心波長 313 nm 光譜圖。

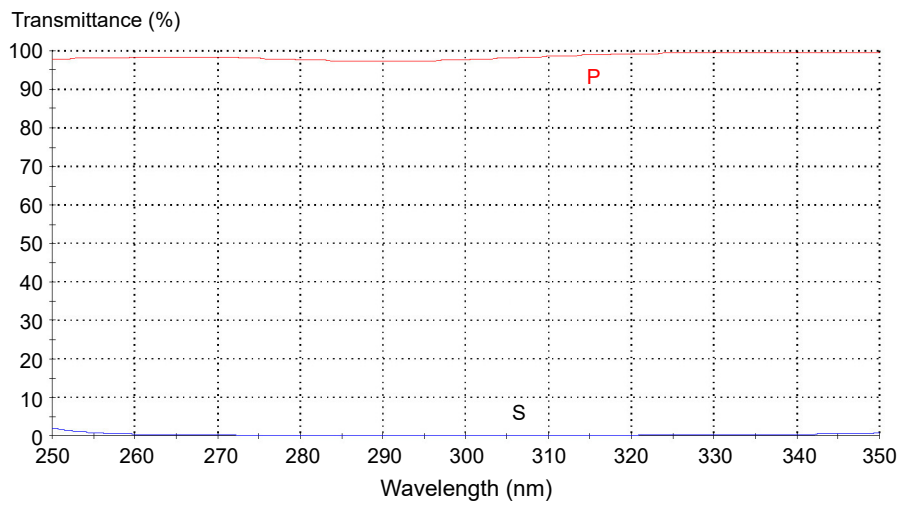


圖 27. 優化之後理想的光譜圖。

(5) 平板式偏振元件模擬設計結果

該偏振分光膜以同樣的方式進行分析，其膜堆結構為 $\text{Air}/(\text{HL})^{13}\text{H}/\text{Quartz}$ 、波長分佈為 $\lambda_0 = 280\text{ nm} - 320\text{ nm}$ ，以每間隔 10 nm 波段的方式，分析最佳入射角度的偏振比，高折射率材料折射率 $n_H = 2.02$ 、低折射率材料折射率 $n_L = 1.38$ ，其穿透率 (T) 與 θ_0 光譜圖 28-31 所示。

然而，若希望 $280\text{ nm} - 320\text{ nm}$ 得到最大的偏振透射比 P，則我們可以得知入射角度須介於 $70^\circ - 80^\circ$ 之間，故選擇以 75° 入射角進行偏振薄膜設計，中心波長 313 nm ，膜堆結構為 $\text{Air}/(\text{HL})^{13}\text{L}/\text{Quartz}$ ，其穿透率隨波長的變化如圖 32 所示，優化後理想光譜如圖 33 所示。

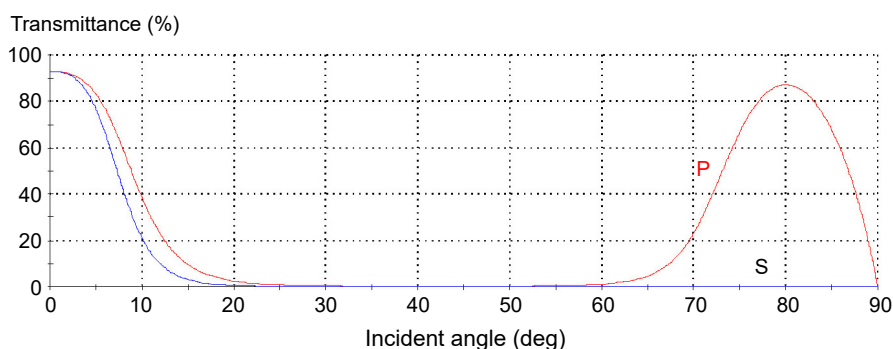


圖 28. $\theta_0 = 80^\circ$ ， $T_P = 87\%$ ， $T_S = 0.1\%$ 。

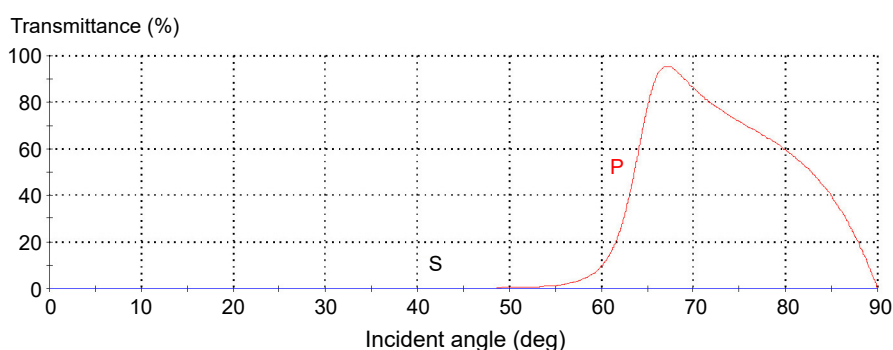


圖 29. $\theta_0 = 67^\circ$ ， $T_P = 95\%$ ， $T_S = 0.05\%$ 。

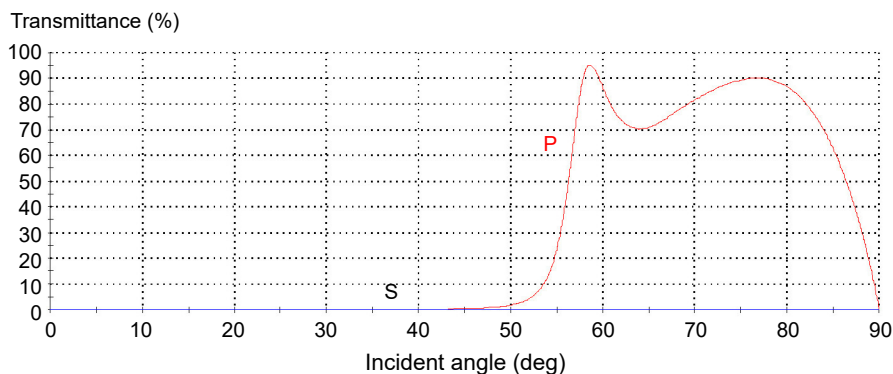


圖 30. $\theta_0 = 58^\circ$ ， $T_P = 95\%$ ， $T_S = 0.1\%$ 。

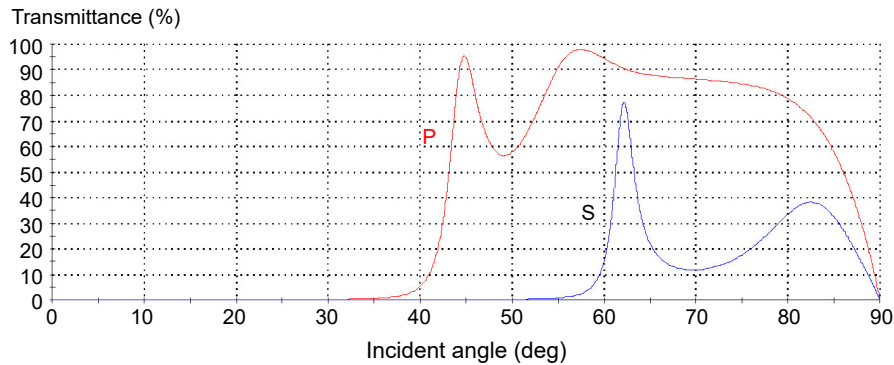


圖 31. $\theta_0 = 45^\circ$, TP = 95% , TS = 0.05% 。

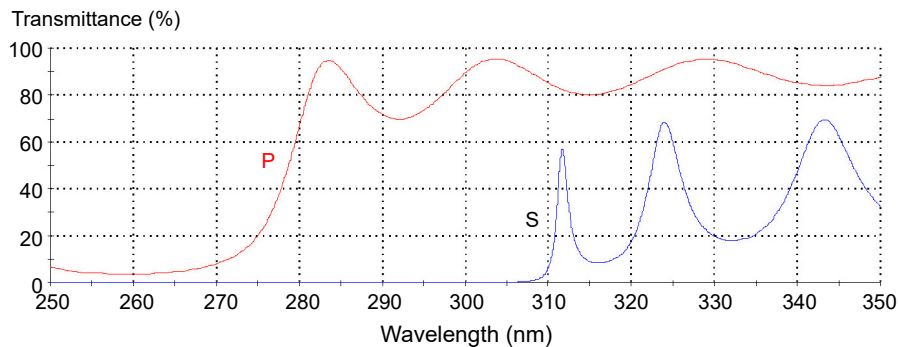


圖 32. 入射角度 75° 、中心波長 313 nm 。

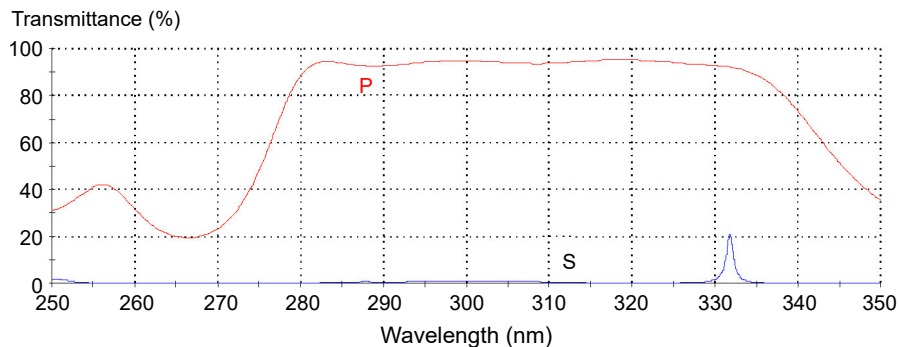


圖 33. 優化之後理想的光譜圖。

(6) 偏振光學薄膜製鍍

圖 34 為 Quartz / (HL)⁵ H/ Quartz 形式之對稱膜堆實驗結果之光譜。選用高折射率材料為 HfO₂，低折射率材料為 MgF₂。在基板溫度為 200 °C 的環境下，經由電子鎗蒸鍍之後，共堆疊 11 層於一稜鏡斜面上完成此一鍍膜，薄膜的厚度約為 867 nm，各層 HfO₂ 的膜層厚度約 50 nm，MgF₂ 的厚度約為 113 nm。由光譜儀量測光譜圖結果顯示，波長在 313 nm 時，P 偏振光與 S 偏振光的偏振比為 70.04 : 0.13，而從 330 nm－280 nm 波長範圍，P 偏振光由 83% 的穿透率逐漸下降至 54%，推測其原因為當稜鏡進行斜面膠合時，因光固化劑材料在紫外光波段時具有吸收情況，而可能導致穿透率下降。

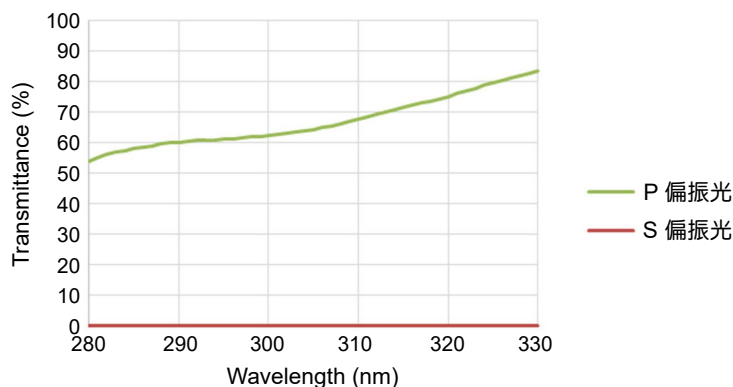


圖 34. 量測之膠合稜鏡式偏振分光鏡。

另一設計為高入射角度平板式偏振分光元件，此偏振分光元件應用範圍同樣為深紫外線波段 (290 nm–320 nm) 進行偏振分光，其實驗結果如圖 35。元件上的光學薄膜層 Air / (HL)¹³ H / Quartz 也是以高、低折射率介質材料，進行多層堆疊而成，薄膜的厚度約為 1251 nm，各層 HfO₂ 的膜層厚度約 75 nm，MgF₂ 的厚度約為 90 nm。本設計以單一光學平板式進行偏振分光。經由光譜儀穿透效率的量測，可以觀察出當波長在 313 nm 的 UVB 紫外光波段時，入射光的 P 偏振光與 S 偏振光的穿透率有明顯的差異，偏振比約 83.4 : 0.99。而波長為 290 nm 時的紫外光，最低偏振比為 67.71 : 0.64，如圖 35 所示。

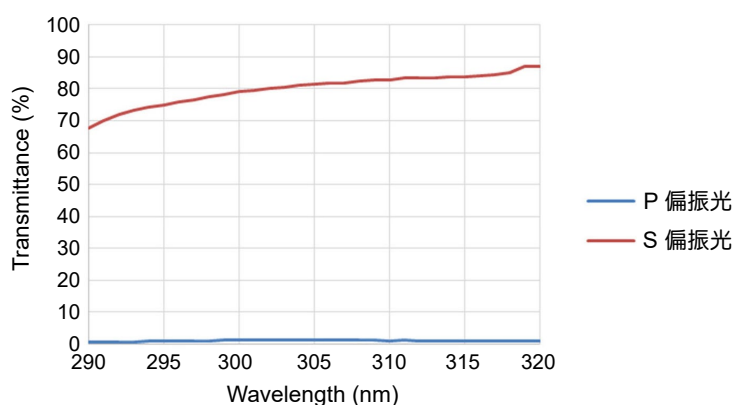


圖 35. 平板式偏振元件光譜圖。

(7) 偏振比討論

由圖 34 與圖 35 的量測數據中可看出平板式偏振分光鏡的偏振比，在參考波長 313 nm 時，P 偏振光具有相當不錯的穿透率 84.4%，而 S 偏振光則僅不到 1% 的穿透率。相較於膠合式偏振分光鏡，同樣 S 偏振光具有低於 1% 的穿透率，但是 P 偏振光卻只有 70.04%。導致膠合式偏振分光鏡分光效率下降的原因有二：一為光固化膠固著時，使用手動對準的方式，這種方式在光學薄膜與光固化膠間很難達到完全的密合，在此誤差中會使穿透率無法達到完美的分光效果。二為光固化膠具有紫外光吸收的問題，導致部分 P 偏振被光固化膠吸收。

本設計的平板式偏振分光元件，以高入射角度的方式進行偏振分光，可以解決膠合式偏振分光元件的問題。因為該膠合式偏振分光元件是由兩組配件膠合而成，使用膠合的光固化膠在紫外光段容易產生光吸收問題，及膠合時產生氣泡而影響其工作效率。將實驗量測穿透率結果，整理如表 2。

表 2. 膠合式偏振分光鏡穿透率。

膠合式偏振分光鏡穿透率			
	290 nm	313 nm	320 nm
P 偏振光	60.24%	70.04%	75.32%
S 偏振光	0.09%	0.13%	0.15%
平板式偏振分光鏡穿透率			
	290 nm	313 nm	320 nm
P 偏振光	67.71%	83.4%	86.94%
S 偏振光	0.065%	0.99%	0.98%

五、結論

近年來光學薄膜之應用已經是拓展至所有行業，如傳統的農業科技使用濾光片，過濾特定波長照射植物。生醫產業使用光學元件，增加訊雜比，以增加檢驗的精準度。遙測航拍使用光學元件，進行特定波段的光譜訊號蒐集，可以大面積的進行特地區域的植物或海洋判別。消費電子產品則使用濾光片，增加臉部辨識與智慧車辨識的精準度與人體生物特徵的感測。半導體產業則因應元件製程的需求，支援紅外到中紅外的檢測元件與紫外、深紫外到 EUV 的曝光所需的光學元件。藝術創作提供更多元的創作元素與方法給藝術家…等。由此可知光學薄膜科技已經是近代科技與下世代科技不可或缺的基礎技術，也與我們的生活息息相關且密不可分。

本文中我們介紹曾經開發過的光學元件，也以偏振式曝光機中的偏振元件為例，敘述需要開發此偏振元件的原因、設計時需要注意波長範圍以及偏振比、設計時光學薄膜設計理念流程、模擬設計結果比較、實際鍍膜的成品、偏振比的比較以及實際鍍製的樣品與理論不同的比較與分析解釋。這也是薄膜元件開發時，經常需要經過的研發歷程。

儀科中心肩負推動前瞻科技的任務，成立鍍膜實驗室，最初從民生工業的民生用品與藝術創作的藝術品外部包裝的色彩變化鍍膜開始，進而作用於飛行航拍與衛星太空陣列式濾光鏡應用的開發，到最近為了支援光電產業、顯示器產業與積體電路半導體產業所使用各項設備中光學關鍵性零、組件的開發多所著墨。茲舉數例，如紫外短波反射鏡、特性波長能量調控元件、不同波長用抗反射鏡、跨可見光、紫外光以及深紫外光偏振元件鏡片的開發，以饗讀者。唯光學鍍膜技術是跨領域、跨學門的技術，除了在學理上的知識外，需要電腦輔助設計軟體，於光學鍍膜的設計以及設計最佳化處理，也特別著重在經驗的累積，經驗中於製程的控制、工作環境的要求、機台的保養維護以及檢測設備的更新等，這些經驗與技術都與鍍膜成品的種類、品質以及價值，息息相關。於開發元件的過程中，也必須要明瞭元件在整體設備所扮演的角色以及發揮的功能，因此也必須要與設備供應商以及使用者保持良好的關係，得到元件功能正確的資訊。願有志於此的同業或同好，可前來儀科中心一同研討、切磋，祈以互相激盪產生新的創意火花。

作者簡介

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台灣儀器科技研究中心研究員兼任真空鍍膜與光學元件組副組長。

Po-Kai Chiu received his Ph.D. in Materials Science and Engineering at National Taiwan University. He is currently a researcher and deputy division director of Vacuum & Optical Components Division at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蔣東堯先生為美國羅徹斯特大學博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心生醫與曝光機系統組研究員。

Donyau Chiang is granted his Ph.D. degree in University of Rochester, USA. He is a researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蕭健男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兼任真空鍍膜與光學元件組組長。

Chien-Nan Hsiao received his Ph.D. in Materials Science and Engineering from National Taiwan University. He is currently a researcher and director of Vacuum & Optical Components Division at Taiwan Instrument Research Institute, 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台灣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 Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.