

光學薄膜與真空科技

李正中

一、引言

真空技術應用廣泛，其技術也不斷的在向前推進，國外如此，在國內也是如此。利用真空蒸鍍技術製鍍薄膜在光電元件上也是真空科技的應用之一，利用此技術可以製鍍各類型的光學薄膜，使光學薄膜能在光電系統中有如下的功能以完成或增加光信號的發射、傳遞及接收的效率^[1]。

1. 反射率的提高（增反射）或穿透率的降低。
2. 反射率的降低（減反射）或穿透率的提升。
3. 將信號分光：
 - a. 中性分光（各波長一視同仁等量分光）。
 - b. 雙性分光（可選取各色光）。
 - c. 極性分光（可選取所需極光）。
4. 帶通濾光（可選取僅所需要波域的光）。
5. 帶止濾光（排除特殊之波長的光）。
6. 截止濾光（選取某段波長的光，如長波通或短波通濾光片）。
7. 輻射熱與發射率的控制，光通量的調變。
8. 相位的改變。
9. 光波的引導，光開關及積體光學。
10. 色光、色溫調變。
11. 光資訊的記存。
12. 液晶顯示、除霧、除靜電。
13. 色光顯示、色光反射。

二、真空科技的需要：

光學薄膜自十七世紀“牛頓環”被發

現以後就開始被討論著，而合理的解要晚約150年待Young氏視光為波而建立干涉原理後才有圓滿的解釋。但真正能將光學薄膜製造及應用還是沒有辦法。雖然1817年Fraunhofer成功的利用酸蝕法製造了抗反射膜使透光率增加。但那只能是一層簡單的薄膜。待1930年油擴散幫浦，真空技術提升了，才使得製作各種光學薄膜變成可能。

光學薄膜的製作為何需要真空呢？真空度多少才夠呢？有些光學薄膜的製鍍並不需要真空，例如利用凝膠溶膠(sol-gel)來塗佈或浸鍍可以在乾淨空氣中進行。但比較多層、精密的光學薄膜還是得利用真空蒸鍍法才可行。

隨著真空科技的提升，光學薄膜也相對的快速發展，有些膜層設計不但層數多而且複雜，非利用真空蒸鍍法難以完成。所謂真空蒸鍍法即將被鍍物（通稱為基板）放在真空腔中，而要鍍上去的材料則在基板下方利用各種方法使其由固體變成氣體（例如加熱熔解然後蒸發或直接由固態昇華或撞濺飛離(Sputtering off)等）飛向基板。並依序一個原子層一個原子層地沈積在基板上。這時蒸鍍環境若是真空度不好，則被鍍材料由固體變成氣體時馬上與環境中的其它氣體起化學作用，而成為光學性質不一樣的東西，特別是折射率若不一樣則整個膜堆性質絕對會與設計時不同。再者由於被鍍物變成氣體飛向基板，過程中若與其它氣體相碰則動量變低，沈積在基板上會附著性不佳，膜質鬆軟，而真空不好

的膜堆中也會包含一堆雜氣，整個薄膜的折射率、厚度都難以控制。對精密的光學鍍膜、折射率及厚度都必須嚴格的控制才能完成。再者，蒸發源在高溫下若真空間不好易與殘餘氣體起化學作用！而縮短使用壽命。那麼真空間要多少才夠呢？從蒸發物由固體變成氣體後飛向基板過程中若不與環境中（真空中）的殘餘氣體分子相碰的觀點來看，我們可以定義一個術語叫平均自由路徑，其定義是氣體在真空中飛馳經過“某距離”後會發生相碰，這些“某距離”有時長有時短，取其統計平均值，即為平均自由徑，也就是說平均多少距離內氣體的飛馳是自由的，不會與其它氣體相碰。以L表示平均自由路徑，設環境是空氣，則在室溫時（300° K）L與抽真空間的真空間P（以torr表示）之關係為

$$L = 5 \times 10^3 / P \text{ (cm)}$$

一般的蒸鍍腔其蒸發源到基板的距離大約在30到50cm以上，因此P值必須小於 10^{-4} torr，而一般的機械幫浦所能抽到真空間其P值約在 10^{-2} torr，因此必須加連擴散邦浦(Diffusion pump)才能抽真空間到 10^{-4} torr以下，這也就是為什麼在前面會說待1930年油擴散邦浦發明後真空間技術提升了，製作各種光學薄膜才變成可能。

由於真空間技術的發展前述的油擴散邦浦很多都以冷凍邦浦(Cryopump)來代替。因為使用油擴散邦浦會有油氣跑到鍍膜腔內而造成膜質不良。雖然可加冷凝阱及油擋板在鍍膜腔與擴散邦浦間以吸附油氣。但還是很難百分之百把油氣吸附住，且加了冷凝阱及油擋板也阻礙了氣流通量而降低抽氣速率（約降50%）。

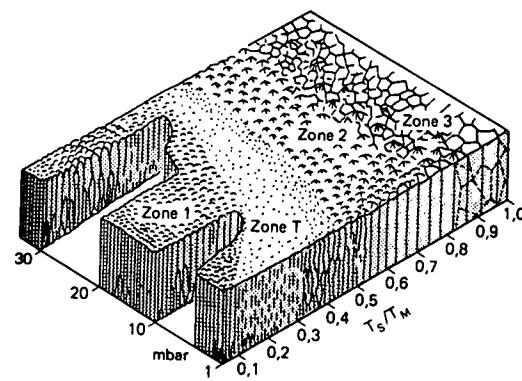
使用冷凍邦浦比油擴散邦浦還有兩個好處。其一抽真空間數高（一般油擴散邦

浦連接機械邦浦真空間可抽到 10^{-6} torr，而冷凍邦浦連接機械邦浦真空間可抽到 10^{-7} torr甚至更低）其二是冷凍邦浦抽水氣之速率比油擴散邦浦要快很多。這點對有些鍍膜非常重要。

雖然真空間科技的發展可以利用渦輪分子邦浦(Turbomolecular pump)，吸附邦浦(Adsorption pump)，鈦昇華邦浦(Titanium sublimation pump)或離子邦浦(Ion pump)等組成起來使真空間抽得更高。但考慮成本與需求性，以上之邦浦大多用在學術研究上或半導導工業，很少用在光學鍍膜系統上。倒是在擴散邦浦或冷凍邦浦與機械邦浦如油迴轉邦浦(Rotary pump)間加一魯氏邦浦(Root's pump)以增加粗抽真空間時的速率，而節省時間。因為魯氏邦浦在氣壓為 10 到 10^{-3} torr時抽氣速率很快，約油迴轉邦浦的5到10倍。

三、真空間鍍膜機的要求

第二節中由簡單的計算知真空間內之壓力要小於 10^{-4} torr才能夠鍍出膜質優良的光學薄膜來。因此真空間系統要有抽到 10^{-5}



圖一 真空間鍍膜之膜結構因鍍膜條件不同而有差異，左橫軸代表氣壓上升後膜結構越鬆越粗糙^[2]。

torr以下的能力。事實上真空度越好有助延長蒸發源的安全及壽命。用如鈦(W)、鉬(Mo)、鉭(Ta)做成的熱阻舟或熱阻絲，在真空中可避免氧化，而使用電子槍者其內有數千伏特之高電壓，因此真空度要更高，同時膜質也會更好。圖一表示了真空度越好則膜質越緻密^[2]。但光學鍍膜機的設計往往會依不同的鍍膜方式對真空鍍做更高一級的要求。尤其當真鍍時必須加熱而致使真空中壁會釋放氣體，或要充氧氣（或其他氣體）做化學合成反應，或加裝其他任何增能輔助蒸鍍如離子助鍍(ion assisted deposition)而必須充其他氣體時不但真空度要好，而且抽氣速率要快，以維持蒸鍍時真空中氣壓小於 10^{-4} torr。因此一般除對鍍膜要求空載沒有蒸鍍時的最終氣壓可抽到 10^{-7} torr外還要對抽氣速率做特殊要求。以下舉個典型光學鍍膜機做例子說明。

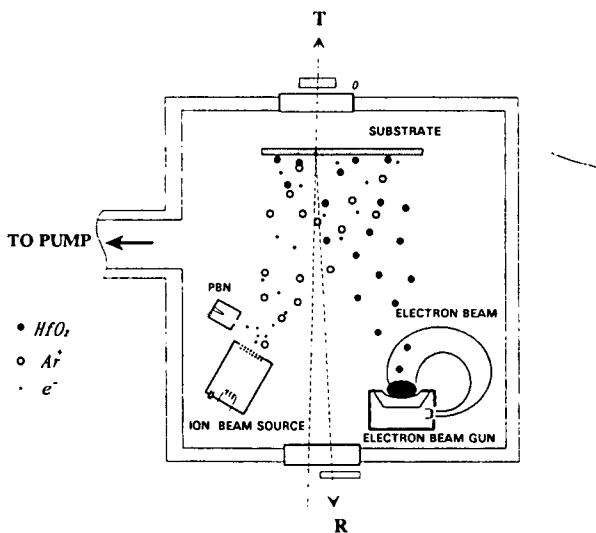
(一)製鍍一般多層光學薄膜用真空鍍膜機：

這裡所說一般是指通常各光電元件要用的抗反射膜、各種濾光片、反射鏡等。此抽真系統主要由油擴散邦浦及油迴轉邦浦組成。為增加抽低真空速率可在兩邦浦間加一魯氏邦浦。為防止油氣流向真空中鍍膜室，可在油擴散邦浦上方與真空中間加一油擋板及冷凝阱。為增加抽水汽之速率（油擴散邦浦抽水汽之能力不好）則可在真空中鍍膜室內或油擋板上方加裝麥氏冷凝管(Meissener trap)此Meissener trap以前都通灌以液態氮以捕捉水汽。自 Polycold cryocooler 發明後則都改用 Polycold 代替液態氮。Polycold 用起來方便，對於多水汽的元件很值得加裝。例如以有機物、塑膠等為基板的鍍膜機更值得加裝 Polycold cryocooler。其使用特殊冷媒使溫度迅速降到-90°C 到 -140°C。而破真時又能快速送出熱氣立即除去 Meissener trap 上的霜。

由於冷凝邦浦 cryopump 的技術已經相當成熟，所以許多油擴散邦浦都以 cryopump 代替。如此可免掉油汽跑到鍍膜室的煩惱。而且真空度也可抽高一點(10^{-7} torr，甚至 10^{-8} torr)。不過也有缺點。例如停電超過五或十分鐘以上，則 cryopump 必須再生。這要花費約 6 小時才能回到原來的真空狀態。

所需之蒸鍍源可由鉬(Mo)，鈦(W)，或鉭(Ta)等做成的船片或網或絞絲經由高電流通過產生熱來達成。這叫熱阻舟加熱法。這種蒸鍍法是先熱自己才熱蒸鍍材料，是屬於間接加熱。這種加熱蒸鍍法的缺點是船片或網絲有時會與材料起化合作用，或把雜質蒸鍍上去。因此電子槍發明後除了一些金屬或一些低熔點的氟化物還保留用上述熱阻舟加熱法外，大多以電子槍當蒸發源。它是由加熱鉬絲發射出電子來並將此電子束加速到數千伏特來撞擊蒸鍍材料。材料被撞後產生大量熱量而熔解而蒸發。此種加熱法為直接加熱法，所以材料的污染少，同時電子加速到幾千伏特後能量很高。因此以前用熱阻舟加熱無法熔解的氧化物現在都可用電子槍來蒸鍍。

不管用熱阻舟或電子槍蒸鍍成的薄膜都像圖一所示，有結構上的缺陷。即有空隙、粗糙，以致光學特性不穩定（隨環境而變）或會散射光及有應力存在。這是因為這些蒸鍍法蒸鍍上去的原子的動能太少，大約零點幾 eV。以致附著基板後不太會游動。因此先到的原子會擋到後到的原子而產生自我遮影效應以致膜在成長方向有柱狀結構（如圖一所示）。為解決這問題，有人做各種加能量的方法、或加熱或用光能照射、或用電子轟擊生長中的膜、或游離蒸發出的原子然後加電壓加速之。現在較被普遍使用的則是用離子轟擊生長



圖二 離子助鍍光學鍍膜機示意圖，圖中R及T代表光學監控膜厚用之反射率及穿透率。

中的膜。離子量大，可把附著的原子堆打密便變得很結實，因此膜層的堆積密度(packing density)很高。此離子束由離子源產生，圖二是國立中央大學光電所光學薄膜實驗室組裝的離子助鍍光學鍍膜室的示意圖。由於離子源要充氣(一般為氬氣)，而鍍氧化物時又要充氯氣。因此真空系統的抽氣速率要很快。

(二) 製鍍低損耗光學多層膜的真空鍍膜機

此類製品的要求為低散射、低吸收，光學特性穩定高。例如超高反射率的反射鏡，能承受高輻射能的光學干涉多層膜及雷射鏡。紫外光用各種鍍膜，積體光學用鍍膜，光纖多波分工鍍膜，窄帶濾光片及特殊環境用濾光片等。

因此真空度的要求要比(一)項高一級。此抽真空系統以cryopump為主，前置抽氣系統還是魯氏邦浦及迴轉邦浦，空載時的真空度一定要達到 10^{-8} torr以下。

這種光學薄膜的品質要求如此之高，固然增加其他邦浦以提高真空間度會有幫助，但另外一個更有效的方法是不用蒸發法蒸鍍材料而是用離子濺鍍法(Ion Beam Sputter Deposition, IBSD)。這種法是用高能量(KeV)之離子(一般為氬離子)撞擊靶面(材料為要鍍成薄膜的原材，例如要鍍 SiO_2 膜則靶材用熔融石英；要鍍 TiO_2 膜則用高純度之金屬鈦，並同時充氧。)這時離子會把靶面上的原子一顆一顆敲出，原子就一顆一顆以十幾eV的動能飛向上基板紮實的沈積下來。這種膜密度很高且呈無晶狀態，因此光散射量很小。雷射陀螺儀所需的雷射鏡其散射量要求在100ppm以下，就是用IBSD方法製成的^[3]。目前美國加州理工學院(California Institute of Technology)正在進行觀測重力波的實驗(Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, LIGO)^[4]需要低更多損耗的雷射鏡(數ppm)也非依賴IBSD製成不可。圖三是LIGO干涉儀的原型機的照片，箭矢所指方向是雷射光射入處。干涉儀L型兩臂適直徑61cm長40m之真空間不鏽鋼管，其內懸吊一對極低損耗之超級雷射鏡。愛因斯坦在廣義相對論中預測一由強重力造成的黑洞是無法以望遠鏡觀



圖三 LIGO干涉儀之原型機照片^[4]。

測到。利用重力迅速的改變，就像用一個小黑洞被一個大黑洞吞進時會放出重力波。它穿越宇宙且可經由地球上干涉儀懸吊的超級鏡片的移動來偵測到。

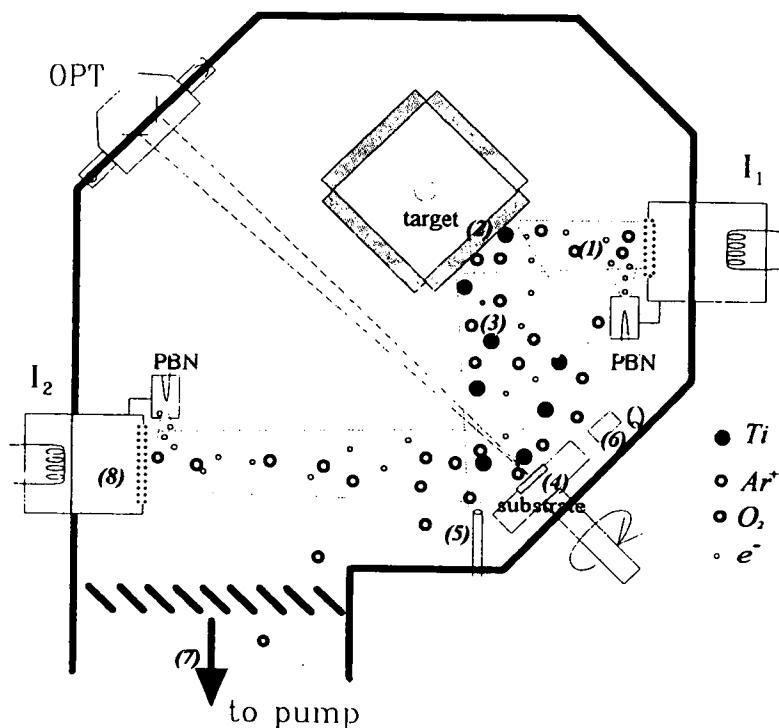
以上所說之離子濺鍍有別於一般所說的濺鍍，一般所說的濺鍍是指二極、三極、RF濺鍍或磁控濺鍍。後者是在真空中度很低下以高電壓游離氣體，在靶材(target)與基板間形成電漿，這樣鍍出來的膜自然會參雜氣體與雜質。而IBSD是利用獨立的離子源產生離子束，因此鍍膜室還是維持在高真空中度狀態下(約 10^4 torr到 10^5 torr之間)，膜的成長自然要完美多了。圖四是國立中央大學光電所光學薄膜實驗室之雙離子源

之實際裝置示意圖。圖中方塊是裝靶材(target)的基座，必須水冷。我們做了四片不同材料的靶材以便做各種實驗。

由於光電產品在尺寸上越做越小，微機電系統Micro Electro Mechanical System (MEMS)工程應運而生，它所使用光電系統的波長更短，由超紫外光到軟X光都將用到，因此所需之光學薄膜也相對的要更精密微細。上述的IBSD是不是能勝任，真空中度是不是要更高都還在努力，但可確定的是真空科技的提升有助於高品質光學薄膜的完成。

(三)其它種類之光學鍍膜機

此類鍍膜所討論的真空中度要求並無特



圖四 雙離子束濺鍍鍍膜機示意圖， I_1 及 I_2 為隻離子源，(1)為高能氬離子，(2)為靶材，(3)為濺離原子，(4)為基板，(5)為充氧氣孔，(6)為石英膜厚監控器，OPT是光學膜厚監控器。



殊，但為某種目的則在機械設計上，或抽氣系統必要做不一樣的安排，其中涉及到一些為達目的而還能維持高度真空的技術，以下舉幾個例子說明：

1. 需要鍍膜材料的量很多的鍍膜機：

如紅外光區的干涉濾光片，如設計連續蒸鍍的蒸鍍機。以往都以機械臂送料到熱阻舟上。而硫化鋅為昇華材料則可作成大塊狀而在中間加鎢絲蒸發之。但自電子槍發明後有人開始將盛裝材料的坩鍋作成很多個（例如說30個50個）排成一大圓圈然後設計輪盤輪流轉到電子束蒸發的位置。這種真空腔一般都在1公尺以上空間才夠。

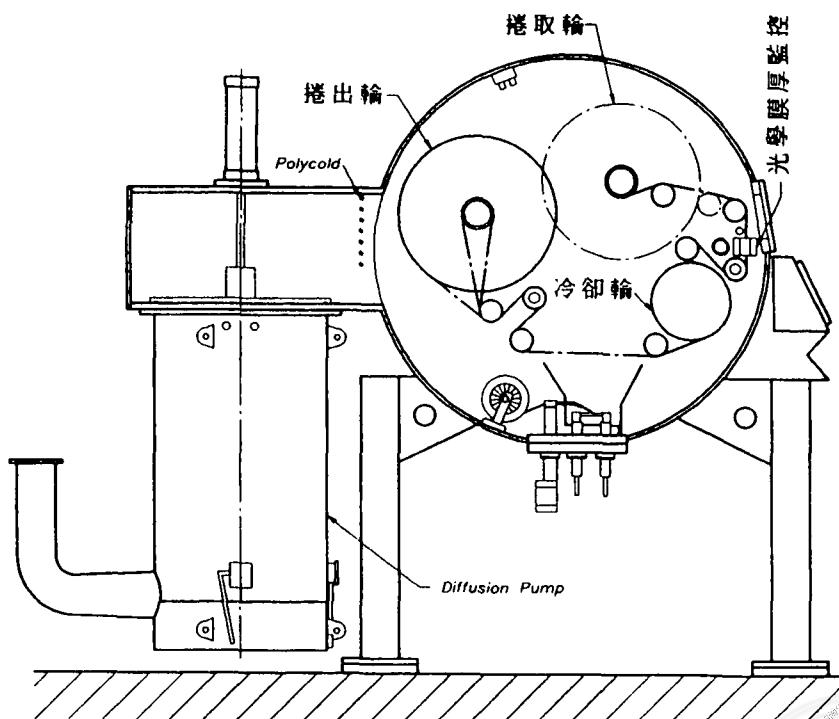
2. 可捲繞式基板上鍍膜機：

例如鍍鋁在塑膠包裝膜上或鍍防熱透明膜在塑膠膜上，此類塑膠膜可以捲起

來，此時除了要設計如何加填鍍膜材料外還得防止塑膠過熱及吐氣。顯然前述之 Polycold cryocooler 在此是需要的，而放及收的兩輪間之速度要能使塑膠有一定的張力也是很重要。圖五是此類鍍膜機的示意圖^[5]。

3. 連續式磁控濺鍍膜機：

典型的例子是鍍透明導膜ITO（及加抗反射膜）於大片基板上。一般的設計會在鍍膜室之前後加一兩個過渡室其真空中度介於大氣及高真空間以使基板可連續由大氣進入鍍膜室再傳送出來大氣，製作過程中不必打破鍍膜室的真空，因此可以24小時生產。其抽氣系統與單真空間的系統完全不同。圖六是Leybold公司製造的橫躺式連續鍍膜機^[6]。桃園觀音鄉的默克百成公司使用的即屬於這類，但為立式的。



圖五 連續塑膠膜繞捲式蒸鍍機示意圖^[5]。



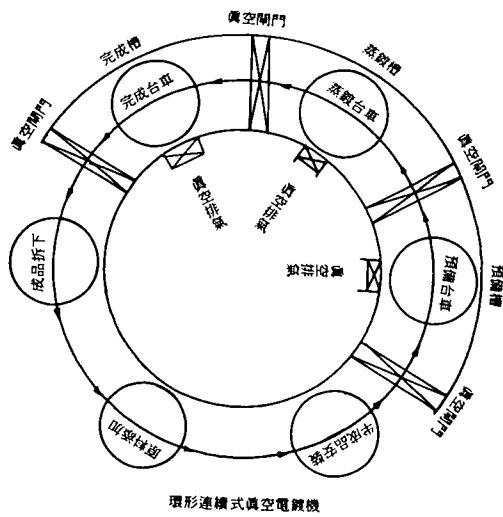
圖六 橫躺式連續濺鍍鍍膜機照片^[6]。

4.連續式蒸發式鍍膜機：

有些被鍍物件（基板）的形狀使鍍膜機不適合做上述橫列式的安排，而只能像1)一樣以一爐一爐的方式蒸鍍(one batch by one batch)。因此有人模仿橫列式鍍膜機在鍍膜室兩邊各加一中真空度的轉接室。數量很多的基板放在支撑架，由大氣先進中真空度轉接室，再抽氣後轉到鍍模室，鍍完後再移運另一邊的中真空度轉接室再運出大氣。其設計如圖七所示為一環形連續式蒸發型鍍膜機^[7]。

5.冷光鏡盃的鍍膜機：

為了增加每一爐放置基板的數量鍍膜室可做大（因此真空系統也要跟著增大）於是基板支撑架可以做得盡量大。這時為了避免中間與旁邊基板的膜厚不一樣，通常會在基板支撑架與蒸發源間放置一膜厚



圖七 直立式環形連續蒸鍍鍍膜機示意圖^[7]。



圖八 行星式基板支撑架真空蒸鍍機照片，專為鍍冷光鏡盃設計^[8]。

修正用遮板，蒸鍍時同時旋轉支撑架或者除支撑架公轉外基板自身也設計成可以自轉（這叫行星式基板支撑架）。這樣膜厚分佈可以得到很高的均勻度。尤其像冷光鏡盃這類面凹度很深的基板更需如此。因為此類鍍膜必須加熱280°C以上因此旋轉系統也必須在此溫度下順暢運轉且不影響真空度。圖八為Leybold A 600C專為鍍冷光鏡盃用的真空鍍膜機^[8]。

四、結語

光學薄膜因真空科技的開發而得以製成並廣泛的應用在各種光電系統及各種實驗裝置上。光學薄膜也因真空科技的發展而得以使品質一再提升。鍍膜工程師都深知真空度不好則膜質必差，真空度不穩則產品良率必降。他們也深知鍍紫外光用薄膜的真空度要求也比鍍長波域用薄膜的真

空度要高。光電薄膜不僅在現有的光電系統中扮演很重要的角色，對未來科學發展亦深具需要。目前已可看到更短波長甚至X光用的光學薄膜已越來越需要，其精密度更高，因此可以預期對真空科技的依賴也更深了。

五、參考文獻：

1. 李正中“光學鍍膜的功能”光學工程第十期（73年3月）pp.8-11.
2. J. A. Thornton, “Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings,” J. Vac. Sci. Technol. 11 (1974) PP. 666-670.
3. D. T. Wei, “Ion beam interference coating for ultra-low optical loss,” Appl. Opt. 28, (1989) PP. 2813-2817.

4. A. Abramovici, W. E. Althouse, R. W. P. Drever, Y. Guursel, S. Kawamura, F. J. Raab, D. Shoemaker, L. Sievers, R. E. Spero, K. S. Thorne, R. E. Vogt, R. Weiss, S. E. Whitcomb and M. E. Zucker, LIGO, the laser interferometer gravitational-wave observatory, *Science* 256, (1992) pp. 325-333.
5. 美國DARLY TECHNOLOGY INC. former CUSTOM FABRICATION & SERVICE公司設計。
6. H. Fery and G. Kienel "Dunnschichttechnologie" VDI Verlag (1987) pp. 531. (圖9-93) .
7. 楊貽謀 “多槽迴轉式真空電鍍系統” 真空科技第4捲第1期 (80年2月) pp.27-31.
8. 同6. pp. 497 (圖9-60) .

(本文作者現任教於國立中央大學光電所)

