



光學薄膜對皮秒雷射加工機 之影響性

The influence of the optical thin films
on picosecond laser saw

魏敬易

統新光訊股份有限公司
經理

藍宏利

統新光訊股份有限公司
總經理

關鍵詞

- 雷射技術 Laser technology
- 光學薄膜 Optical thin film
- 皮秒雷射 Picosecond laser
- 雷射切割機 laser saw

摘要

雷射技術已廣泛應用於機械加工產業，光學薄膜的設計與製鍍對於其有愈來愈重要之趨勢，隨著雷射的峰值功率和脈衝能量提升，所需之雷射鏡片要求越來越嚴格，傳統之光學薄膜已無法滿足現今需求，對於皮秒雷射加工機內光學鏡片所需膜質較高之薄膜，本文將概述針對皮秒雷射

加工機內所應用之光學薄膜設計方向與檢測技術。

Laser technology is applied to machining industry extensively, and the current trends are toward to optical design and optical thin film. Since the frequency and the power of lasers are increasing, the (characteristic) quality requirements are more and more serious than before. So we thinking the traditional optical thin films cannot meet the modern requirements. For example, the high power laser lens requested high quality of films for laser saw. The challenges are how to design and inspection the films. This research has discussed the topics about the design directions and the inspection skills of the optical thin films for picosecond laser saw applications.



前言

筆者委外加工金屬件材時，常以雷射切割加工機設備作為選擇指標，但目前國內雷射產業，在長期依賴國外技術與設備之下，面對成本高居不下的壓力，未能有突破性發展。一旦面臨內部鏡片損壞，價格不斐，而昂貴的鏡片價格主因來自於少量客製化。本文將論及如何從設計端來避免類似問題的發生。從光學設計與優質的光學鏡片著手，使用合適之光學設計，不讓雷射光能量聚焦在膜層上，可避免因雷射能量過大，導致薄膜吸收或介面缺陷而破壞鏡片；優質的光學薄膜則須符合以下條件：透明度高、吸收小、穩定之折射率、高堆積密度、散射小、均勻的材質、良好的機械附著力、良好的硬度與應力、化學性穩定、受環境影響小及輻射能之承受量高等¹。綜合上述兩點再加上電子顯微鏡等量測儀器的觀測，可進而分析雷射鏡片損毀之主因。

雷射加工機產業現況

由於機械式的加工方式效率高，因此一直都是加工的主流方式，但由於其精細度不夠，無法滿足產業界的要求，使得雷射加工技術逐漸成為新興的方式來取代機械式加工的不足。根據 Laser Focus World 2010 年調查，雷射應用產業在材料加工佔 25.7%、通訊/光儲存佔 55.2%、醫療佔 6%、軍事佔 5.7%、感測佔 3.4%，其餘領域用途所佔的比例較小，如圖 1 所示。除了通訊/光儲存外，材料加工為重要的雷射應用領域，主要的加工用雷

射源以光纖雷射、二極體激發固態雷射、二氧化碳雷射及準分子雷射等為主，雷射使用在加工已有多年的經驗，其特色為非接觸式的加工方式，具有夾具損耗率低、容易自動化及可透過透明體加工等優點，且除了金屬以外，亦可加工非金屬材料如木材、陶瓷及塑膠等。

國內雷射加工的應用從早期大型鋼板切割、太陽能產業畫線、發光二極體 (light emitted diode, LED) 藍寶石基板切割，至應用於矽晶圓低介電質膜之切割²等，應用面有愈來愈廣泛的趨勢；從技術功能需求的角度來看，聚焦光點尺寸需求越來越小，加工能量分布須更均勻，加工光束光型有客製化需求，切割深度需控制得更精密，未來將會取代輪刀切割方式，許多輪刀切割機製造廠商為了掌握先機，也很早就投入發展雷射切割機，國外設備廠商多採垂直整合方式，從元件到產品均自行生產，除避免受限於廠商交期過長與客製化產品單價太高等限制，更為確保關鍵元件取得來源正常與保護公司技術等目的，皆自行建構關鍵技術與發展製造能力。例如日商 Disco Corporation 所推出之 7000 系列³，就是全自動之雷射切割機，可預測雷射切割機在未來會有更多的應用，相較之下，國內產業對雷射光學系統之需求雖強勁，但開發光路系統設計技術及關鍵光學模組組件技術需耗費大量之人力及財力，並需長時間投入相關研發才能健全關鍵技術，因此國內廠商於考量研發成本過高及研發時程過長之限制下，多卻步而不投入雷射產業之技術研發，使得整合性光路設計、關鍵光學模組（擴束鏡、光束整型模組...）以及關鍵鍍膜元件等技術國內仍很缺乏，主要關鍵技術與模組元件等掌握於國外



之

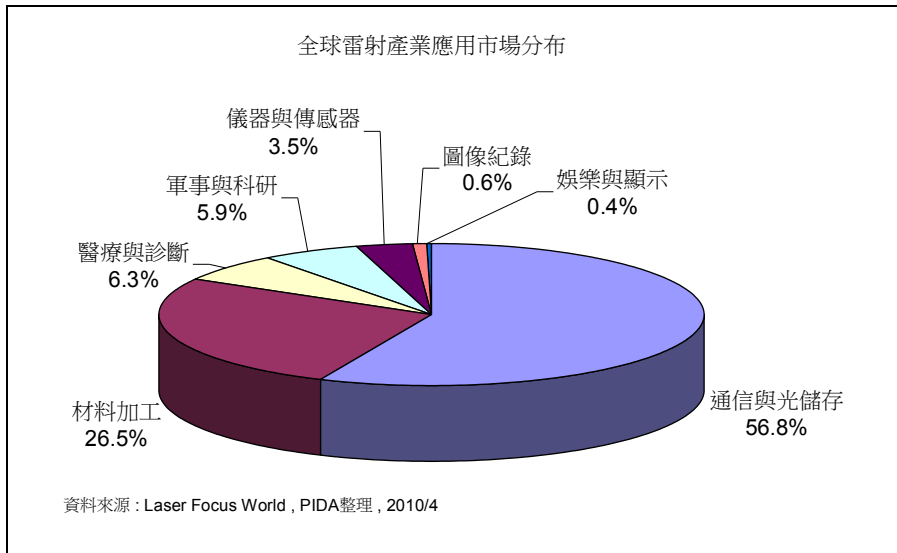


圖 1
全球雷射應用產業值趨勢
與應用市場分布

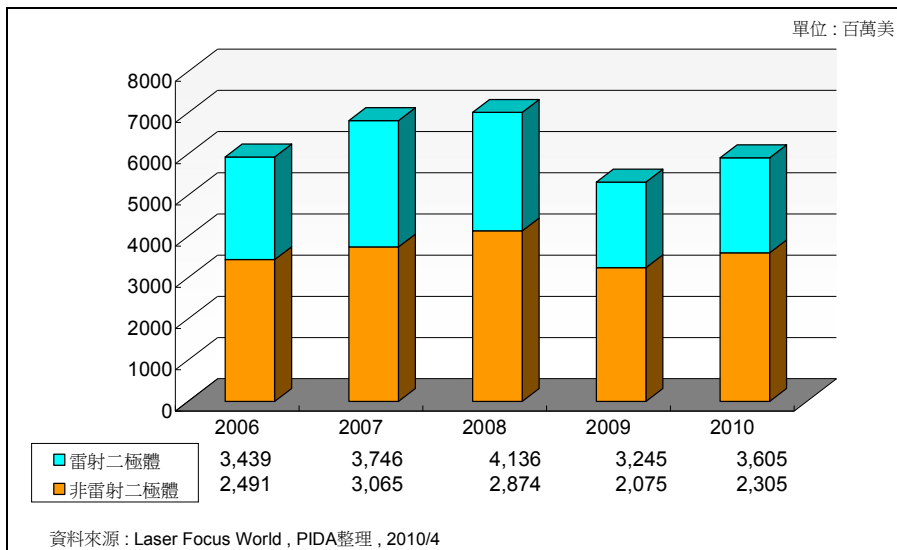


圖 2
PIDA 整理
之全球雷射產業總產值

手，因此國內雷射產業雖已萌芽，但尚未能蓬勃發展，同時，仰賴雷射設備的相關產業發展亦會受限。

如此長久下來，造成國內雷射製程設備皆需向國外採購，產品成形型態往往受限既定機種限制，而無多樣化產品之發展空間，而若以客製化需求訂購設備，則設備價格將十分高昂；此外，雷射加工機中之關鍵光學模組及零組件無自有技術與自製能力，亦是箝制國內雷射產業發展之重

要因素，外購各模組及零組件將使其各功能特性固定，而無彈性設計製造各產品之空間，同時，一旦雷射設備或關鍵模組組件需維修時，其維修養護將只能仰賴國外原廠進行，為配合原廠之人力調度，屆時耗時耗費將是無可避免。再者，雷射設備由於只能外購，造成購置成本過高，因而降低國內生產業者轉型至高階生產製程之意願，此對國家之經濟發展而言殊為可惜。

根據圖 2 由光電協進會(PIDA)⁴所整理之研究



資料顯示2008年全球雷射產業總產值為70.1億美元，2009年全年總產值雖受金融風暴影響而下滑，但仍有53.17億美元水準，2010年又微升達到59.1億美元，預估2011年會再增加10%以上。雷射分為兩大類，傳統的雷射以連續雷射（continue wave laser）為主，不間斷的提供能量，現在大部分的雷射皆為脈衝雷射（Pulsed laser），將能量壓縮然後瞬間釋出，以脈衝時間來分，奈秒（nanosecond）等級為Q-開關雷射（Q-switch laser），利用共振腔內的特殊快門，抑制振盪，當快門打開時的瞬間，nanosecond 可得脈衝寬短而峰值大的脈衝雷射。飛秒（femtosecond）與皮秒（picosecond）等級的是鎖模雷射（Mode-locking laser），利用在共振腔內加入脈衝壓縮的機制，使雷射同時工作在不同的頻率上，並鎖定其相位，因此稱這類脈衝壓縮機制為「鎖模」，但是經過鎖模後的雷射必須經過放大器輸出才能使用在加工上。

皮秒雷射是超快雷射，由於脈衝短得足以避免能量的熱擴散，因此可忽略傳熱所造成的熱影響區，利用光化學作用（photochemical）加工機制來移除材料，讓電子吸收足夠的光子能量然後脫離鍵結，被去除的材料並未歷經高溫熔解和汽化等過程，因此被稱為雷射的冷加工（cold machining），其精細度和解析度大為提升。皮秒雷

射的雷射源為雷射二極體（DPSSL, Diode Pump Solid State Laser），波長為1064nm，其優點為光束品質佳、能量轉換效率高及使用壽命長之外，還有組合成固態雷射系統後的體積也比傳統的雷射系統小很多。

光學薄膜對皮秒雷射加工機之影響性

圖3為皮秒雷射加工機光學系統之架構示意圖，圖中光學系統包含了光學透鏡組、擴束鏡模組、偏振調控模組與微聚焦模組等子系統，甚至功率調整模組也可使用薄膜濾光片方式來設計製作，上述模組內也使用到了各式濾光鏡片與透鏡組，這些光學鏡片都必須鍍上抗反射膜或功能性薄膜，其中抗反射膜之目的在於減少雷射光入射於空氣與基板界面上之損耗，功能性鍍膜部分則依據模組特性搭配光學設計後的規格來製作，幾乎整個雷射光學系統都會使用到光學薄膜，優質的薄膜也就成了必備的條件，如何定義優質之薄膜？可由應用端來評判，舉一放大倍率5倍的擴束鏡模組為例，內部至少需要三片透鏡，三片透鏡一共有六個面，為減少每個面造成約4%反射損耗，鍍上抗反射的光學薄膜是必要的，薄膜部分

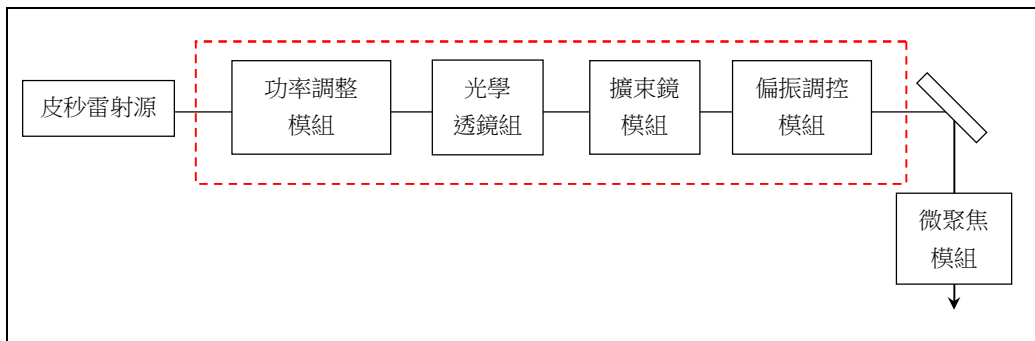


圖 3
皮秒雷射加工機光學
系統主要架構示意圖

除了基本光學特性要能滿足高穿透率外，另外還需要考慮基板的材質與表面粗糙平整度，基板材料在該雷射波段必須是低吸收材質，避免因吸收雷射能量產生高熱而破裂，表面平整則是希望能減少雷射光散射產生，最後要定義透鏡元件所能承受雷射能量的能力，這部分稱為雷射損害閾值（Laser Induced Damage Threshold, LIDT，亦稱做 LDT）^{5,6}，單位面積所能承受的雷射光能量，單位為 焦耳/平方釐米 (J/cm^2) 或瓦特/平方釐米 (W/cm^2)，此為一種破壞性測試，將高能量雷射直接打在鏡片上，直到鏡片損毀時所測得的能量值，此種方式所測得之值參考性較高，LIDT，可利用下述公式 (1) 來計算：

$$LIDT(Y) = LIDT(X) \times (Y/X)^{1/2} \quad (1)$$

其中 X 代表第一種連續脈衝的時間條件，Y 代表第二種連續脈衝的時間條件，舉例來說：1ns 脈衝雷射所測得之 LIDT 為 $6J/cm^2$ 時，10ns 脈衝雷射 LIDT 可推算成：

$$LIDT(Y) = (6J/cm^2) \times (10ns/1ns)^{1/2} = 18.97J/cm^2 \quad (2)$$

雷射加工機的故障有部分來自於光學系統，以光學鏡片被高能量雷射所損傷最常見，尤

其是在使用高功率雷射及深紫外光雷射，隨著雷射的峰值功率和脈衝能量提升，如何提高光學薄膜的 LIDT 值變得越來越重要，兩個造成光學薄膜的 LIDT 值的機制為熱吸收 (thermal absorption) 及介電崩潰 (dielectric breakdown)，熱吸收來自於缺陷及鍍膜材料，可藉由選擇無吸收的介質來避免，但許多局部的吸收來自於夾雜於膜層或在表面上的污染物。在超快雷射損傷的首要原因通常與瞬間強度有關，而不是總脈衝能量，利用設計將峰值電場遠離易受傷的膜層界面。

介電崩潰大多來自於表面的缺陷，缺陷是由研磨和拋光過程中造成的刮痕以及清潔不當所造成，利用拋光將表面粗糙度降到 1 \AA 以下，可提高 LIDT 值，此外在鍍膜過程前必須小心地做清潔與表面處理，清潔主要是要去除表面的微粒子及有機物，利用有機溶劑、洗滌劑和超音波技術來去除研磨拋光的殘留物、灰塵、人體的手汗及油脂和有機清洗劑等。如何設計與製造出優質的薄膜鏡片。

材料選擇與薄膜設計

設計時首先應注意鍍膜材料選用，如果是紫外光雷射一般會選用氧化鈦 (HfO_2) 搭配氟化物



或二氧化矽 (SiO_2) 來當鍍材，也有人使用氧化鋁 (Al_2O_3)，基板材質也都選用低吸收材質，例如高純度的熔融石英 (Fused silicon)，純度高的熔融石英可使用 X-ray 光譜分析儀來測試內含雜質比例，又細分為波長分散方式 (WDS-XRF) 與能量分散方式 (EDS-XRF) 不同量測方式，不同方式可測得不同元素與濃度範圍，另一簡單的方法

是從紫外線光譜來比較，圖 4 為熔融石英的模擬光譜，藍線為吸收值 0 時的光譜，紅線為 250nm 吸收值 0.0002 的譜線，藉由紫外線光譜也可看出石英的相對純度，原理是熔融石英若摻雜到雜質，大部分的雜質元素在深紫外線區都有強烈的吸收值，雜質越多，紫外線區所測得穿透率光譜就越低。

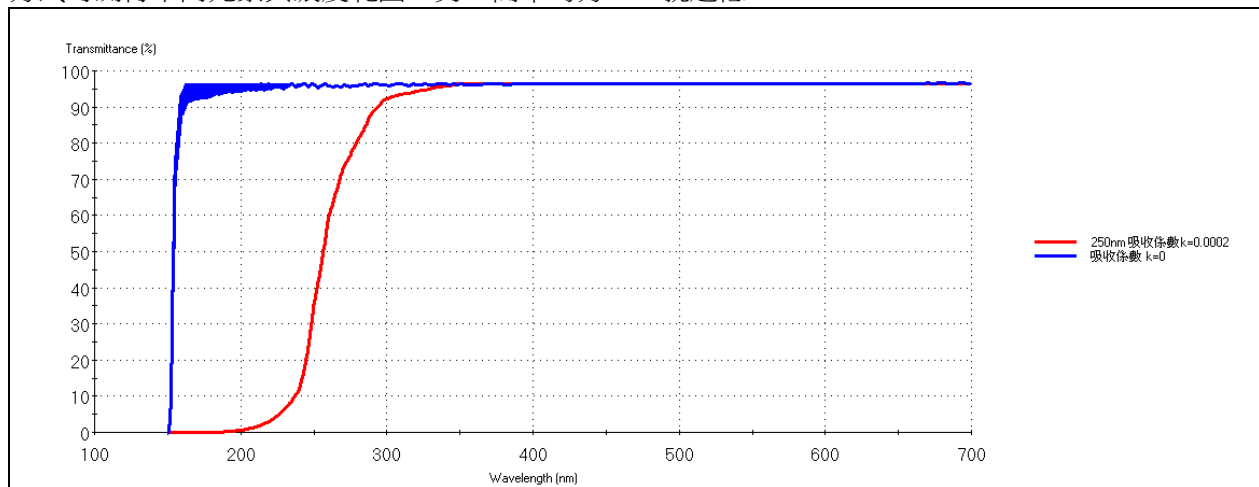


圖 4 熔融石英於波長 250nm 處吸收值 0 與萬分之二光譜比較圖

薄膜設計時也必須同時考慮避免膜層界面上有高電場值，也就是說電場峰值盡量遠離膜層界面，防止強大的電場震盪破壞了分子結構。另外在鍍膜材料使用上，為減少入射角度偏移造成光譜飄移量，通常會使用較多之高折射率材料，相對也有壞處，高折率材料因鍍膜製程參數不同，通常較易有微吸收，設計者再依據需求來取捨材料設計比例。

目前，高損傷閾值的鍍膜使用各種沉積過程，包括離子輔助沉積 (IAD)、離子束濺射 (IBS)、濺射法及各種蒸發技術⁸。使用 IBS 是因為其可成長完全緻密的薄膜，較不易產生污染物的吸收且相對較少的內部缺陷的膜。因此其膜層一般不容

易破壞。但是由於其高的內應力，一旦遭到破壞就會非常嚴重；相比之下，蒸發技術生產的薄膜較為寬鬆，內應力低，當損傷產生時期增長的速度比在高密度膜慢，但這種孔隙也造成微粒污染、水或揮發性有機物進入。此外，在蒸發過程本身中，材料有可能無法達到最佳的化學匹配比，因此也容易產生吸收。

通常是依據材料特性來選較適合的方式來製鍍，實際使用電子槍離子輔助蒸鍍法，選用 BK7 基板搭配上 Ta_2O_5 與 SiO_2 材料製鍍 808nm 與 1064nm 雷射用 45 度分光片，經 LIDT 測試結果大於 $20\text{J}/\text{cm}^2$ ，測試條件為入射角 45 度，1064-nm，4-ns pulse。也有國外廠商使用離子輔助濺鍍方式



製鍍深紫外光的窄帶濾光片，但是受限材料吸收特性，濾片都有些微吸收，因此光學系統設計上，必須搭配避免雷射光聚焦於任何界面上，當能量上升時，才不會損毀內部鏡片。熱阻舟可蒸鍍金屬材料或是氟化物，常用雷射鏡鍍膜材料的氟化物有 AlF_3 、 GdF_3 、 MgF_2 、 NaF 與 NdF_3 ...等⁹，合適的製程搭配適合的材料才是最重要的。

鏡片經過鍍膜加工完成後，為確保薄膜內微孔隙內無雜質與水氣殘留，通常會再經過退火處理，退火方式有紫外光照射、雷射退火¹⁰與熱退火，利用退火方式除去內部微量的雜質與水氣，鏡片所能承受更高的能量，目前大部分的雷射鏡片製造商，於製造過程中都有這一道製程。

面較不易分辨，且孔隙較多，使用離子輔助蒸鍍之膜層界面對比清晰，也無發現較大孔隙，以此薄膜應用於雷射加工機光學鏡片則較為合適，測試 LIDT 也會得到較高之數值。

薄膜表面的分析則可透過原子力顯微鏡 (Atom Force Microscope, AFM) 做定量輔助分析，AFM 可量測得基板與薄膜表面粗糙程度，粗糙度過大易造成散射產生，為避免散射造成損耗，首先基板表面必須先精密拋光，測試得好的粗糙度，經過鍍膜後再測一次，經此程序可確保表面品質好壞。圖 6 為原子力顯微鏡測試離子輔助蒸鍍於熔融石英基材樣品之量測結果，測試結果其粗糙程度為 0.898nm。

膜質檢測與分析

膜質檢測方式很多，不外乎遵守 Bellcore、MIL-STD、EIA/TIA 與 JIS 等環境測試規範，此部分有文獻詳細規範，在此不做探討，雷射用鏡片除應符合上述環境測試條件外，也可使用電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 來觀測薄膜結構¹¹，此為定性分析，圖 5 利用 SEM 測得兩種不同方式蒸鍍之薄膜結構，圖 5 之左圖為有離子輔助之電子槍蒸鍍膜層截面圖，圖 5 之右圖為無離子輔助電子槍蒸鍍之薄膜，明顯看出右圖無助鍍之薄膜結構較為鬆散，膜層與膜層中界

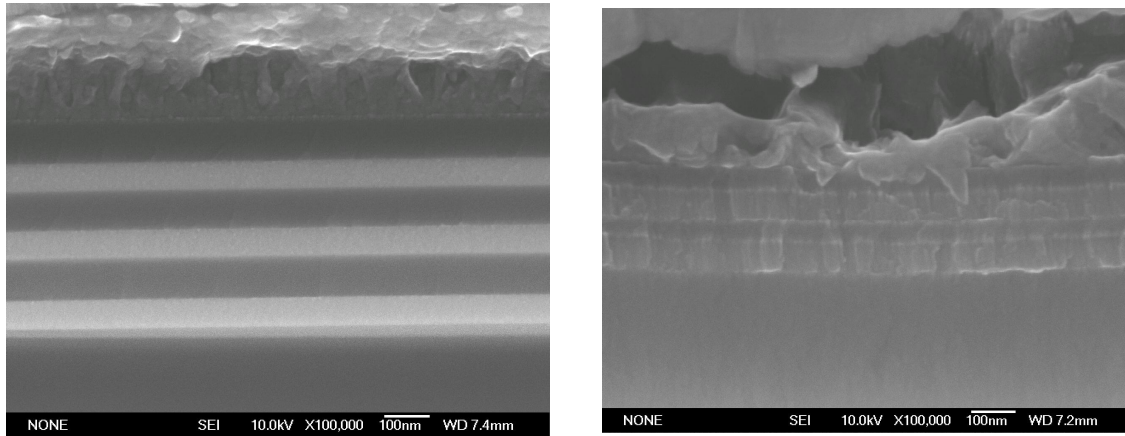


圖 5 以 SEM 拍攝膜層十萬倍的截面圖，左右圖為有無離子輔助蒸鍍之樣品比較

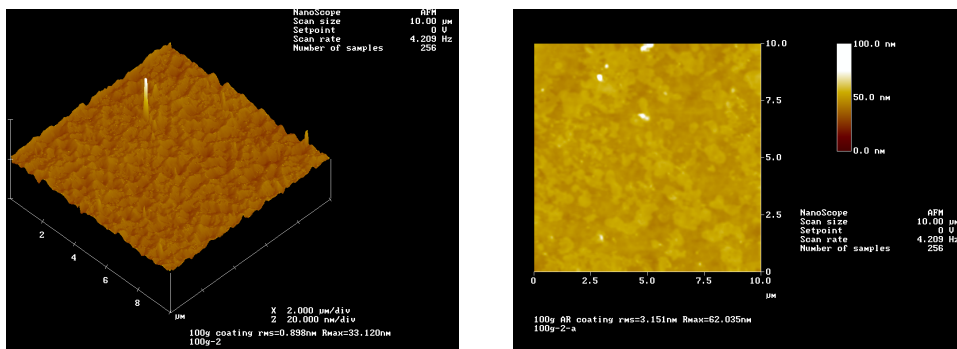


圖 6 以 AFM 測量使用離子輔助蒸鍍於熔融石英之薄膜表面

除了透過精密的儀器檢驗膜質好壞，也有一些簡易的非正式檢測方式，比方說將製鍍好的樣品，先量測好光譜，再放進純水浸泡數天，取出經光譜儀檢驗光譜，做差異性比較，若有些微變化而非量測差異，代表薄膜內的微孔隙吸收水氣，產生折射率微變化及光譜變化，這也是一種粗略又經濟的檢驗方式，或利用坊間販賣的高壓高溫鍋炊煮，也可加快水氣吸收。

結論

選擇適當的材料與合適的製程有助於雷射鏡片壽命增加及降低成本，光學薄膜的良窳亦透過

儀器做定性與定量的檢驗，當製作成元件時，使用 LIDT 做破壞性抽樣測試，確保元件品質性能，而非只能到機台上測試，一旦元件品質有問題，有時還會連帶損壞其它元件，造成更大損失，透過本文對薄膜之瞭解，希能對雷射產業有所助益。

致謝

感謝中央大學光電所陳昇暉副教授與能源所郭倩丞助理教授提供光學薄膜干涉相關理論與薄膜量測方式指導。工業技術研究院南分院雷射應用科技中心技術推廣部同仁協助指導雷射光學設計等相關資料。



參考文獻

- [1] 李正中著,“薄膜光學與鍍膜技術第四版,第 13.9 章”,藝軒圖書出版社,2004.
- [2] 陳智禮、黃健銘、張耀文,“皮秒光纖雷射與雷射加工”,機械工業雜誌 335 期,2011.
- [3] http://www.disco.co.jp/cn_t/products/laser/index.html
- [4] 2010 光電應用暨產業發展年鑑,PIDA,2010
- [5] Jean-François Bisson, et al. “Laser Damage Threshold of Ceramic YAG” Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42 (2003) pp. L1025–L1027, Part 2, No. 8B, 15 August 2003
- [6] L. Gallais, J.Y. Natoli and C. Amra, “Statistical study of single and multiple pulse laser-induced damage in glasses”, Optics
- [7] Helmut Kessler, “Laser Damage Thresholds of Optical Coatings, UV-NIR”, CVI Technical Reference Document #20041108, CVI Technical Optics Ltd.,Nov.,2004.
- [8] 白木靖寬、吉田貞史著,王建義譯,薄膜工程學第二版第 2 章,全華科技圖書股份有限公司,2006
- [9] 李正中著,“薄膜光學與鍍膜技術第四版,附錄一”,藝軒圖書出版社,2004
- [10]Kozlowski M. R., Book of Thin Films for Optical systems, Chap17,ed. By Flory F.R., Marcel Dekker Inc,1995.
- [11]唐晋發、顧培夫、劉旭、李海峰著,現代光學薄膜技術第二版第 5 章,浙江大學出版社,2007