



高功率雷射鍍膜技術開發

Optical Coating for High Power Laser

黃國隆

統新光訊股份有限公司
研發部
副理

魏敬易

統新光訊股份有限公司
業務部
副總經理

關鍵詞(Keywords)

- 物理氣相沉積 Physic Vapor Deposition
- 光學薄膜 Optical Thin Film
- 雷射鏡 Laser Mirror

摘要(Abstract)

為提高雷射系統的光學品質，光學薄膜技術普遍應用在其光學元件上，而要達到理想的光學薄膜，一般而言都是在真空中用物理氣相沉積(physical vapor deposition, PVD)較易完成。其中薄膜的膜質關係到系統的穩定性與可靠性，故本分析報告測試不同之鍍膜參數，藉由原子力顯微鏡(atom force microscope, AFM)與掃描式電子顯微

鏡(scanning electron microscope, SEM)等檢測儀器進行比對分析。而將較佳的成膜條件導入光學元件之薄膜設計，製造 1. 光入射角 0 degree，波長範圍 800 ~ 1100 nm，反射率 $R(\%) < 1\%$ ；2. 光入射角 45 degree，波長範圍 1064 ± 10 nm，穿透率 $T(\%) > 99\%$ ；波長範圍 808 ± 10 nm，反射率 $R(\%) > 99.9\%$ ；3. 光入射角 45 degree，波長範圍 800 ~ 1100 nm，反射率 $R(\%) > 99\%$ 的光學薄膜濾光片，並經高功率雷射測試，損害閾值可承受 10 kW/cm^2 的強度。

In order to advance the optical quality in the laser system, it would be applied to various devices by optical thin film technology. It could be processed easily by PVD (Physical Vapor Deposition) in normal cases. Because the quality of thin film will be the point of laser system, it would be tested in



different parameters of coating. And then the quality of films could be analyzed by AFM (Atom Force Microscope) and SEM (Scanning Electron Microscope), the best setting of parameters would be used for optical thin film of devices. The AR coating AOI 0 degree 800 ~ 1100 nm, R(%) < 0.1%, Edge filter AOI 45 degree 1064 ± 10 nm, T(%) > 99% ; 808 ± 10 nm R(%) > 99.9%, High reflector AOI 45 degree 800 ~ 1100 nm R(%) > 99.9% would be fabricated to combine the coating conditions and optical designs. For the high power testing, the films could be stood in the background of Damage Threshold 10 kW/cm².

1. 前言

一般的光學鏡片，有很多種材料或製程可以選擇，而在雷射鏡片的選擇上，因雷射光源屬於能量較強的光源，故其系統內所使用的鏡組，對於膜質的緊密性，膜層的平整性，與薄膜的光學特性都有一定的要求[1-3]。

假如膜質緊密性不夠高，該膜層易受環境水氣所侵入，導致膜層光學厚度增加，造成光學干涉結果有所變易，該原件的光學特性為因此而有所改變，對於須要精準度的雷射鏡組而言，此現象為一大致命傷。

假如膜層的平整性不夠高，膜層的表面就會有凹凸不平的現象，此一現象會造成光經過該光學元件後，除了幾何光學的穿透與反射外，還有一個散射的因素，如此一來會有能量損耗的問

題，如應用在高功率的雷射系統中，散射所產生的損耗亦須考慮，經文獻得知，單一面鏡片其散射損耗與鏡片表面粗糙度與鏡片反射率之關係式如(1)所示，

$$S = R \left(\frac{4\pi}{\lambda} \sigma \right)^2 \quad (1)$$

其中 S 為散射損耗率，R 為鏡片反射率，σ 為鏡片之表面粗糙度，λ 為光源波長。故如欲製作一 1064 nm R > 99.9% 以上的雷射鏡，在僅考慮散射損耗的情況下，則該鏡片的 σ 必須小於 2.6 nm 才有辦法達到。

因雷射系統中的光學薄膜設計，都是使用介電質當作薄膜材料進行設計，然而介電質材料主要的光學特性為折射率(refractive index)與消光系數(extinction coefficient)，當消光系數過高時，光經過此薄膜，都會有部份光能量被此薄膜吸收，故在高功率的雷射系統中，一來能量的損耗會增加系統負擔，二來損失的能量累積在膜層中，易損壞膜層，造成光學元件失效，如此一來，鏡組的汰換亦會造成雷射系統的維修成本上升。經文獻資料得知，因膜質不佳所導致的吸收損耗與其光學常數的關係式如(2)所示，

$$A = \frac{2\pi n_0 (k_H + k_L)}{n_H^2 - n_L^2} \quad (2)$$

其中 A 為吸收損耗率，n₀ 為入射介質折射率，n 為材料折射率，k 為材料消光系數，故當高折射率材料 n=2.13，低折射率材料 n=1.45，欲製作一 1064 nm R > 99.99% 以上的雷射鏡，在僅考慮吸收損耗



的情況下，則兩個介電質材料(k_H+k_L)比須小於 3.8×10^{-5} 才有辦法達到。

故欲提高雷射系統的使用效能，光學元件為一不可或缺的基礎，然而鍍膜技術更是提高光學元件效能的重要技術之一，而介電質的鍍膜方法有很多種，經文獻分析結果，Dual E-gun with ion assisted deposition(雙電子槍輔以離子助鍍沉積)與 Ion beam sputter deposition(離子束濺鍍沉積)的鍍膜方式較符合本實驗所需求的鍍膜系統。

2. 光學薄膜分析方法

本實驗中的光學薄膜蒸鍍方法，主要是用 Dual E-gun with ion assisted deposition(雙電子槍輔以離子助鍍沉積)與 Ion beam sputter deposition(離子束濺鍍沉積)，在光學元件表面鍍上 Ta_2O_5 、 Nb_2O_5 、 TiO_2 、 MgF_2 、 SiO_2 等光學材料，再利用光學干涉方法，得到各式各樣的光學效果，然而光學薄膜的光學特性，會因為不同的生產設備與不同的製程條件，而有不同的光學常數，反之如固定所有的製程條件，其所得的光學特性會有一樣的結果，故在作光學薄膜的設計模

擬之前，必須對所選用的光學薄膜材料進行光學特性的分析。

本實驗所使用的光學薄膜量測分析法為光度法，其中光度法又分為三種方法[4]：

1. Abeles 法: 利用特定波長 λ 的 P 偏極光(磁場方向垂直的光)照在基板上，基板一半有鍍光學材料，一半沒有鍍，再利用入射角如是光學材料的 Brewster 角時，有鍍膜的那一邊是沒有反射光的，即可得到 $n(\lambda)=\tan\theta_B$ 。
2. ATR (Attenuated total reflection) (全反射受挫) 法：利用在一種金屬材料上，與同一金屬材料上鍍上一層光學材料薄膜，分析突然下降之反射曲率之極小值 R_{min} 及半高寬 $\Delta\theta_h$ 之差異而可得到薄膜之 n (材料折射率)與 d (材料物理厚度)。
3. 包絡法：利用光譜量測儀器，可以光學薄膜在特定波長的 T(穿透率)與 R(反射率)的光譜，以及前後級數的極大值 T_M 及極小值 T_m ，再利用已之基板的折射率 n_s ，即可利用

$$n^2 = \frac{\frac{4}{T_m} n_s - 1 - n_s^2 \pm \sqrt{\left(1 + n_s^2 - \frac{4}{T_m} n_s\right)^2 - 4n_s^2}}{2}$$

得到光學薄膜的 n 值，如圖 1 與表 1 所示。

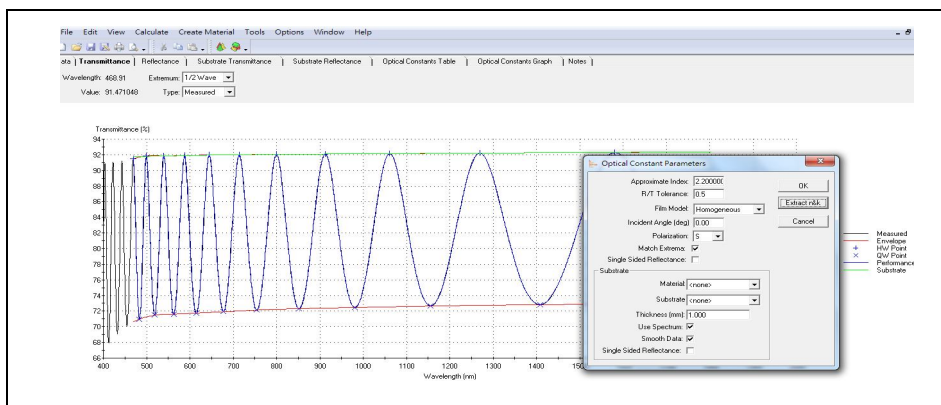


圖 1
Essential Macleod 軟體
透過薄膜光譜圖與包絡
法演算光學常數



表 1 利用包絡法分析所得之光學常數

Material	SiO ₂		Material	Ta ₂ O ₅		Material	Nb ₂ O ₅	
Wavelength	Refractive Index	Extinction Coefficient	Wavelength	Refractive Index	Extinction Coefficient	Wavelength	Refractive Index	Extinction Coefficient
302	1.48719	0	300	2.8	0.0008	361.2	2.73	0.0012
467	1.46429	0	350	2.4	0.0006	400.6	2.544	0.0009
546	1.46008	0	400	2.3	0.0001	500.8	2.357	0.0002
656	1.45637	0	450	2.21	0.0001	610.5	2.287	0.0001
706	1.45515	0	500	2.17	0	715	2.258	0
852	1.45248	0	800	2.14	0	800	2.25	0
1128	1.44888	0	1100	2.12855	0	1000	2.25	0
1362	1.44621	0	1240	2.12299	0	1255	2.245	0
1469	1.44497	0	1415	2.11924	0	1420	2.243	0
1529	1.44427	0	1645	2.11275	0	1654	2.241	0
1660	1.44267	0	1981	2.1108	0	1972	2.395	0

本實驗主要也是利用 Essential Macleod 軟體使用包絡法分析光學材料的光學常數，而所挑選的材料亦是選用物理特性較佳的 Ta₂O₅ 及 Nb₂O₅ 作為高(相較於基板)折射率材料，SiO₂ 作為低(相較於基板)折射率材料。

3. 實驗設計

為符合 808 nm Laser 激發 1064 nm 的雷射光學系統[5]，本實驗進行下列三種光學濾光片的鍍膜，並驗證適當的鍍膜條件，搭配適當的鍍膜設計，可以得到預期的鍍膜效果。

1. AR coating AOI 0 degree 800 ~ 1100 nm, R < 1%
2. Edge filter AOI 45 degree 1064 ± 10 nm, T >

99% ; 808 ± 10 nm R > 99.9%

3. High reflector AOI 45 degree 800 ~ 1100 nm R > 99%

在本實驗中所選擇的方法，是採用真空電子槍熱蒸鍍法，加上離子輔助蒸鍍，而欲分析該方法所鍍出來的膜質好壞，是將該材料，用固定的鍍膜條件，先以光度法量測該材料度於基板上的穿透與反射光譜，並用 SEM(掃描式電子顯微鏡)量測厚度，推算該膜層的 n(折射率)，k(消光系數)，d(物理厚度)。再用 AFM(原子力顯微鏡)分析該材料於鍍膜後的表面粗糙度，確認表面粗糙度會不會對產品的鍍膜光譜規格造成太大的損耗。

而在損害閾值的檢測架構如圖 2 所示。

針對高功率雷射鍍膜的光學測試系統架構規劃如圖 2 以所示，首先選擇高功率雷射源作為測試光源，足夠的功率才能達成高光強度照射，並



以半波片(half-wave plate, HWP)搭配極化分光器 (polarization beam splitter, PBS)作為調制雷射功率

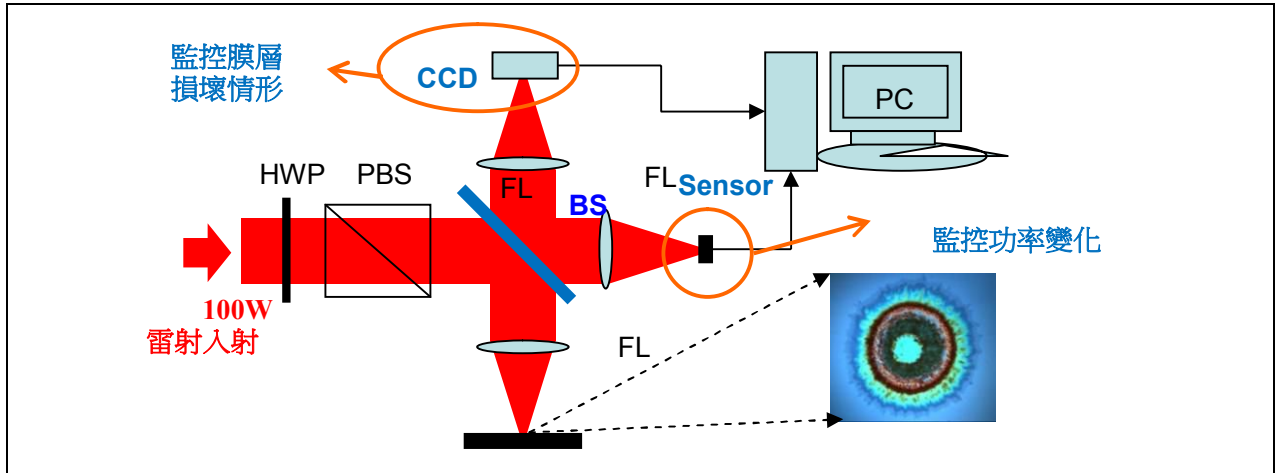


圖 2 高功率雷射鍍膜之光學測試系統架構

之機制，雷射光經一高反射比例之分光鏡(beam splitter, BS)將雷射光反射後，利用一聚焦鏡(focal lens, FL)聚焦於試片上，聚焦鏡之焦距則需選擇可以聚焦達到足夠光強度之光斑尺寸，以達成測試目的。另外會有一小部分雷射能量穿透分光鏡，於後端使用一聚焦鏡收集光源後入射一光功率偵測器，可以反推得到入射光之功率，並可以監控雷射功率之變化。而鍍膜測試片之上方則架設一成像光路，以確定雷射光斑所照射之位置，若鍍膜產生損壞也可以即時觀察[6, 7]。

料，使該鍍膜材料，擁有較高的能量可以緊密排列，又因離子帶電性，改變加速電壓，離子所受到的加速力道亦有所不同，如果離子數目增加的話，能量會有所累積，所以也會有相同的效果，故在這個系統中，離子的加速電壓與電流密度，都是鍍膜條件的關鍵指標。

本研究改變不同的：1. 材料蒸鍍速率，2. 離子加速電壓，3. 離子電流，以期調整出能鍍製低表面粗糙度的最佳參數，如表 2 所示。

表 2 不同蒸鍍條件，表面粗糙度與堆積密度對照表

材料蒸鍍速率	離子加速電壓	離子電流	表面粗糙度	材料堆積密度
Ta ₂ O ₅ 4 A/s	500 V	500 mA	0.82 nm	1.010
Ta ₂ O ₅ 4 A/s	500 V	1000 mA	0.78 nm	1.012
Ta ₂ O ₅ 4 A/s	1000 V	500 mA	0.54 nm	1.014
Ta ₂ O ₅ 4 A/s	1000 V	1000 mA	0.23 nm	1.019
Ta ₂ O ₅ 8 A/s	500 V	500 mA	1.12 nm	1.002
Ta ₂ O ₅ 8 A/s	500 V	1000 mA	1.03 nm	1.003

4. 實驗結果與討論

由於在高能雷射的系統中，對於光學薄膜的表面粗糙度要求較高，故本實驗所選用的鍍膜方法，是電子槍熱蒸鍍加上離子輔助，因離子輔助蒸鍍的原理，是利用離子受電性加速，成為高能的氣體分子，撞向汽化後沉積在基板上的鍍膜材



Ta ₂ O ₅ 8 A/s	1000 V	500 mA	1.05 nm	1.004
Ta ₂ O ₅ 8 A/s	1000 V	1000 mA	0.97 nm	1.005

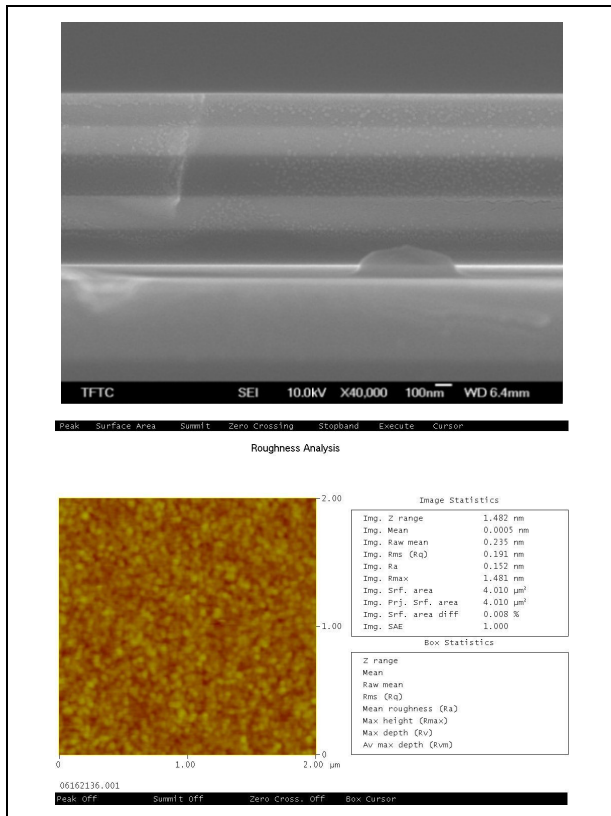


圖 3 4 A/s 1000 V 1000 mA 蒸鍍條件所鍍之膜層 SEM 與 AFM 圖

而測試結果顯示，當 Ta₂O₅ 鍍率為 4 A/s，離子加速電壓 1000 V，離子電流 1000 mA 時，表面粗糙度為最低的 0.23 nm，而在 AFM 和 SEM 的圖像分析中，亦可確認膜層的均勻度平整，不同膜層間的介面沒有缺陷，如圖 3 所示。故本研究就以此作為製程鍍製的參數。

而在濾光片設計的部分，因為一般的光學元件，主要是用光學玻璃所製成，而光亦是一種電磁波，故光從大氣($\eta_0=1$)到光學元件($\eta_s=1.52$)的這

一過程中，會有部分光被反射的物理現象，其反射率(R)的公式為 $R = \left(\frac{\eta_0 - \eta_s}{\eta_0 + \eta_s} \right)^2$ ，從光學導納圖來看，因為空氣跟基板的導納位置屬於不同點，如

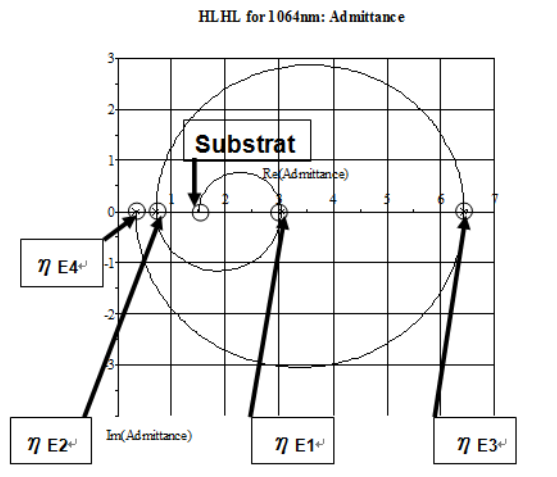


圖 4 HLHL for 1064 nm 光學導納示意圖

要作到抗反射的效果，就是要利用光學薄膜鍍在基板上，會改變導納位置的特性，將基板加上光學薄膜的等效導納 η_E 改變到距離 Air 比較近的位置，也就是 $\eta_E \approx \eta_0$ ，如此一來，套入上述 R 的計算公式，即可得到 $R \sim 0$ 的效果，如圖 4 所示。

而根據導納軌跡的設計概念，本研究製作光入射角 0 degree，波長範圍 800 ~ 1100 nm 抗反射鏡，根據單面反射光譜結果分析，0 % ~ 0.4 %，取最大值為 0.4 %，如圖 5 所示。

接著將光入射角 45 degree，波長 808 nm 高反射，波長 1064 nm 高穿透的光學薄膜設計，鍍在平板光學玻璃上，可以得到 1064 ± 10 nm 的範圍內 T(%) = 99.6 %，808 ± 10 nm 的範圍內 T(%) 都 0 %，又因 T+R+A+S=1，其中 A(%) + S(%) 大約為 0.05 %，故可推斷該波段的 R(%) = 99.95 %，如圖 6 所示。

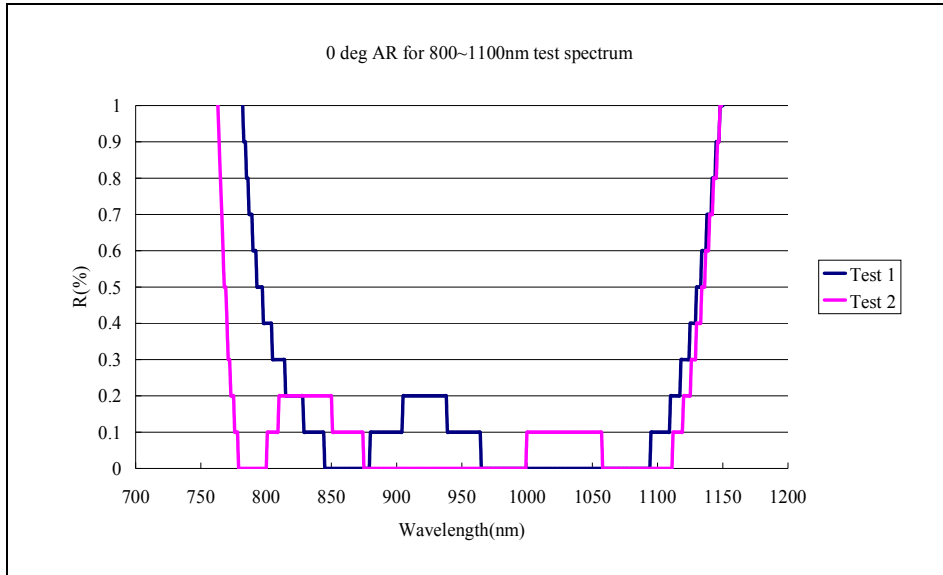


圖 5
0 degree AR for 800 ~
1100 nm 平板基板單面
反射測試光譜圖

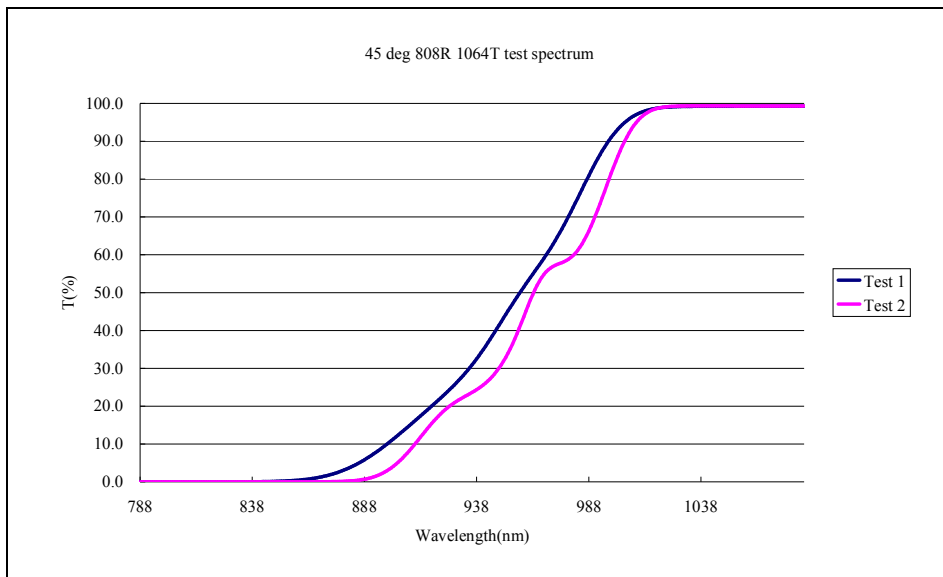


圖 6
45 degree 808 nm R
1064 nm T 光學濾光片
測試光譜圖

最後是光入射角 45 degree，波長範圍 800 ~ 1100 nm 為高反射的光學薄膜設計，因 45 degree 的量測架構，穿透式比反射式誤差較小，故此設計採穿透式量測，再利用穿透光譜計算反射光譜，量測穿透光譜的結果，800~1100 nm 最大不超過 0.5%，因 $T+R+A+S=1$ ，其中 $A(\%)+S(\%)$ 大約為 0.05%，並考慮量測設備的解析度，800 ~ 1100 nm 反射皆達到了 99.45%，如圖 7 所示。

利用前述的鍍膜條件，加上鍍膜設計的調整，所得到的光學濾光片效果，均可達到研究的預期，成品的膜層品質，AFM 檢測結果大約是 0.172 ~ 0.293 nm 之間。

而高功率雷射的損害閥值測試，其實際結構如圖 8 所示，量測系統架設完成後，需確認系統之光束聚焦光斑特性，以確認入射至試片上之光斑光強度。可以依此調整試片離焦距離，選擇適

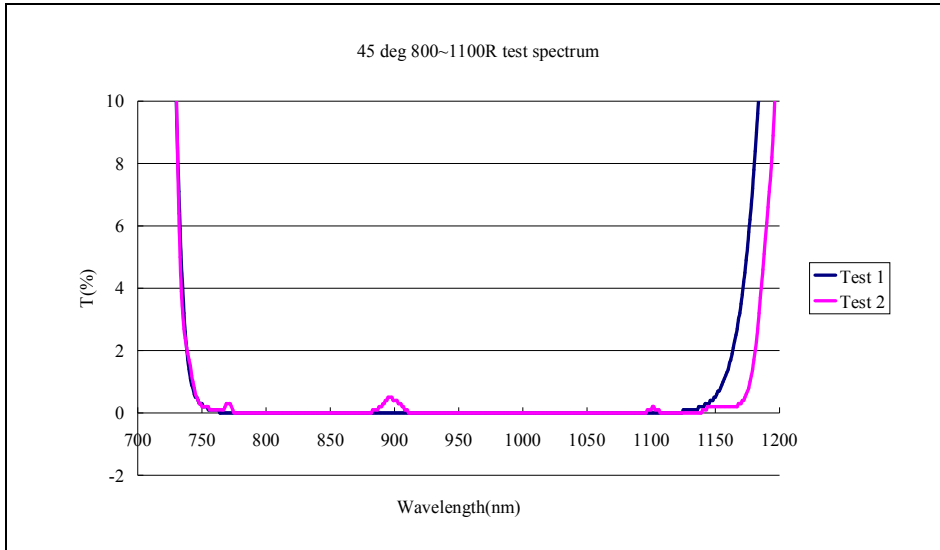


圖 7
45 degree 800 ~ 1100
nmR 光學濾光片測試光
譜圖

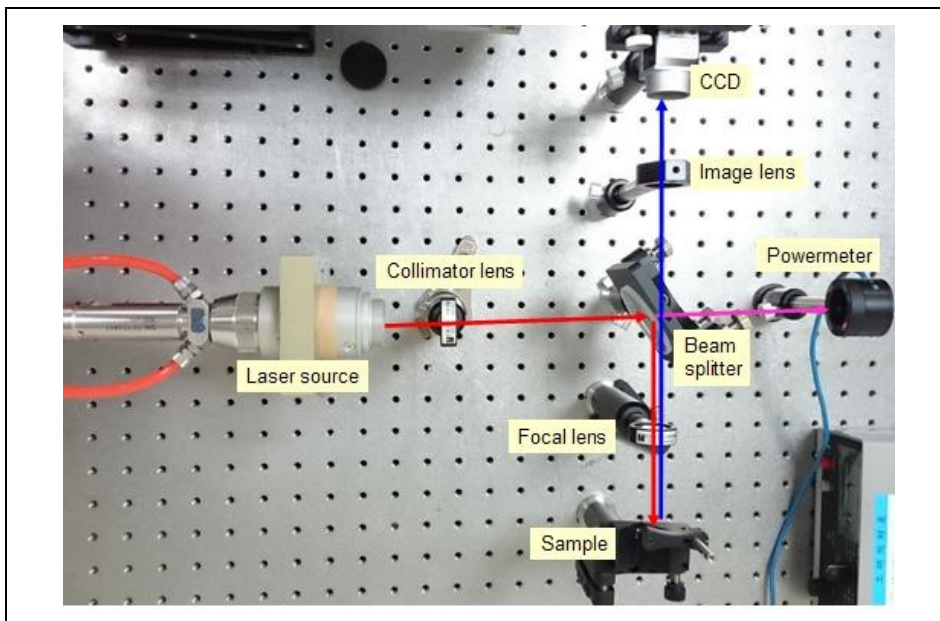


圖 8
光學鍍膜損害閾值之量
測架構

當的光斑尺寸和雷射能量，以獲得實驗所需之光強度，以上述之雷射光強度入射光學鍍膜試片，即時觀測光學鍍膜試片表面的外觀情形，若有外觀上的變化即表示膜層損壞，結果三種試片的穿透或反射雷射功率皆維持一穩定數值，顯示光學鍍膜試片 a, b, c 在光強度 11.26 kW/cm^2 照射之下，光學特性皆無改變，取下試片以光學顯微鏡

觀察，亦無損壞的情形，因此三種試片的光學損害閾值為 $> 11.26 \text{ kW/cm}^2$ ，符合技術規格之要求。

5. 結論

在考慮量產性與膜層品質的前提下所選用的鍍膜方法，電子槍加上離子輔助沉積蒸鍍法，其



中光學常數的消光係數($kH + kL$) $\sim 3 \times 10^{-5}$ ，其所造成的吸收損耗約為 0.008%，而膜層表面粗糙度約為 0.8 nm，其所造成的散射損耗約為 0.009%，兩者加總的損耗約為 0.017%，故在此鍍膜條件下，可用於生產 99.9%高反射或高穿透的雷射鏡片，最終本研究設計了 AR coating AOI 0 degree 800 ~ 1100 nm, $R < 1\%$, Edge filter AOI 45 degree 1064 ± 10 nm, $T > 99\%$ ； 808 ± 10 nm $R > 99.9\%$, High reflector AOI 45 degree 800 ~ 1100 nm $R > 99\%$ 三種濾光片設計，其高反射區皆超過了 99.45%，高穿透區超過 99.6%，而在高功率雷射(1064 nm)的環境下，其 Damage Threshold > 11.26 kW/cm²，故本研究證明了，有好的鍍膜條件與方法，搭配正確的膜層設計，即可生產低損耗，高強度的光學鏡組[8]。

誌謝

感謝經濟部技術處業界科專計劃(101-EC-17-A-05-I1-0014 Low-k 矽晶圓皮秒雷射開槽技術開發計畫)與台南市政府經濟發展局 SBIR 計畫(102SBIR-精機 01 100W 高功率雷射鍍膜技術開發)支持，以及工研院雷射與積層製造科技中心的技術支援，讓統新光訊可以順利發展高功率雷射鏡片。

參考文獻

- [1] R. M. Wood, *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, Adam Hilger, Bristol (UK) (1986)
- [2] M. J. Weber, ed., *Handbook of Laser Science and Technology*, Vol. III: Optical Materials, Part 1: Nonlinear Optical Properties/Radiation Damage, CRC, Boca Raton, FL (1986)
- [3] M. R. Kozlowski, *Damage-Resistant Laser Coatings, in Thin Films for Optical Systems*, F. Flory, ed., Marcel Dekker, New York, 521-549 (1995).
- [4] 李正中，*薄膜光學與鍍膜技術*，藝軒圖書出版社，第七版，95-118 (2012)。
- [5] C. J. Stolz and F. Y. Génin, *Laser Resistant Coatings, in Optical Interference Coatings*, N. Kaiser and H. Pulker, eds., Springer-Verlag, Berlin, 310-333 (2003).
- [6] M. Mero, J. Liu, J. Zeller, W. Rudolph, K. Starke, and D. Ristau, “Femtosecond pulse damage behaviour of oxide dielectric thin films” in *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2003*, G. J. Exarhos, A. H. Guenther, N. Kaiser, K. Lewis, M. J. Soileau, and C. J. Stolz, eds. Volume 5273 - Proceedings of SPIE - SPIE Digital Library. 8–16 (2003).
- [7] Jean-François Bisson, et al. “Laser Damage Threshold of Ceramic YAG” *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 42 (2003) pp. L 1025–L1027, Part 2, No. 8B, 15 August 2003
- [8] Kozlowski M. R., *Book of Thin Films for Optical systems*, Chap17, ed. By Flory F.R., Marcel Dekker Inc, 1995.