

## 寬波域抗反射鍍膜設計與製造之研究

江政忠<sup>1\*</sup> 林書勤<sup>1</sup> 陳威翰<sup>1</sup> 楊凱斌<sup>1</sup> 彭宥鈞<sup>1</sup> 陳炳茂<sup>1</sup> 陳邦旭<sup>2</sup> 李憶興<sup>1</sup>

1：明新科技大學光電工程系 地址：30401 新竹縣新豐鄉新興路 1 號

2：明新科技大學化學工程與材料科技系 地址：30401 新竹縣新豐鄉新興路 1 號

### 摘要

本研究使用五氧化二鉬薄膜和氟化鎂薄膜的多層薄膜組合與五氧化二鉬薄膜和二氧化矽薄膜的多層薄膜組合，分別以電子槍蒸鍍法完成製鍍抗反射波長範圍為 350 nm 至 950 nm 且平均穿透率分別達到 99.1%與 98.7%的鍍膜，其抗反射效果已從可見光區域延伸至近紅外線區域。研究中使用不同通氧量蒸鍍五氧化二鉬薄膜，量測並分析五氧化二鉬薄膜的穿透率光譜、折射率與消光係數，獲得蒸鍍五氧化二鉬薄膜的最佳製程參數為通氧量 7 sccm 製鍍五氧化二鉬薄膜，並使用 Essential Macleod 光學薄膜軟體進行擴大拓寬層波長範圍與優化薄膜膜層厚度。薄膜的穿透率光譜、折射率與消光係數經由穿透式光譜儀與橢圓偏光儀量測獲得。

**關鍵字：**寬波域抗反射鍍膜，五氧化二鉬，氟化鎂，二氧化矽

## Design and Fabrication of Broadband Antireflection Coating

Cheng-Chung Jaing<sup>1\*</sup> Shu-Chin Lin<sup>1</sup> Wei-Han Chen<sup>1</sup> Kai-Pin Yang<sup>1</sup> Yu-Chun Peng<sup>1</sup>

Bing-Mau Chen<sup>1</sup> Pang-Shiu Chen<sup>2</sup> Yih-Shing Lee<sup>1</sup>

1：Department of Electro-Optical Engineering, Minghsin University of Science and Technology, Hsin-Chu, 304, Taiwan

2：Department of Chemical and Materials Engineering, Minghsin University of Science and Technology, Hsin-Chu, 304, Taiwan

### Abstract

In this study, broadband antireflection coatings with an average transmittance of 99.1% and 98.7% in the wavelength range from 350 to 950nm, composed of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films and MgF<sub>2</sub> films or SiO<sub>2</sub> films, have been designed and fabricated. The antireflection effect has extended from the visible region to the near-infrared region, and these films were prepared by electron-beam evaporation at a substrate temperature of 200 °C. In order to obtain an optimal deposition of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films, the Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films were deposited with different oxygen content, and the transmittance spectrum, refractive index, extinction coefficient of these films were measured and analyzed. The optimal deposition of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films was 7 sccm oxygen introduced during the deposition. The broadband antireflection coatings were designed using the Essential Macleod thin-film software to expand the transmittance wavelength

\* 通訊作者：江政忠(明新科技大學光電工程系教授) 地址：新竹縣新豐鄉新興路 1 號 Tel：(03)5593142 轉 3385 E-mail：ccjaing@must.edu.tw

and optimize the film thickness. The transmittance spectra of thin films were measured using a spectrophotometer. The refractive indices, extinction coefficients, and thicknesses of thin films were determined using a varied angle of incidence spectroscopic ellipsometer.

**Keywords: Broadband antireflection coating, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>**

## 一、前言

近年來，隨著科技日新月異及日漸普及，物聯網技術已逐漸進入人類生活中，改善人類生活品質，物聯網技術使得實體世界的萬物具備感知能力與智慧，並以網路全面互聯互通[1-4]。從智慧家庭的物聯網硬體設備為例，必須具備辨識、監控與防盜功能，因此產品必須結合可見光與近紅外線，波長範圍從 350nm 至 950nm，可見光範圍為人類視覺所用，而近紅外線則由硬體設備提供並接收與判斷，作為辨識、監控與防盜功能。

抗反射鍍膜(antireflection coatings)是世界上最廣泛應用與使用量最多的一種光學薄膜，常見於各種光學及光電系統中，因此當產品結合可見光波段與近紅外線區域時，包含可見光與近紅外線區域的抗反射薄膜就成為必須具備的要求與製程的挑戰。抗反射鍍膜利用入射光與反射光，破壞性干涉的抵消作用來減少元件表面光線的反射損失，增加玻璃或透明基板的穿透率，一般應用於照相機、望遠鏡、顯微鏡、眼鏡、顯示器、太陽能電池、二極體、雷射...等，可消除系統中在各元件界面間來回多重反射所產生的眩光、眩光及鬼影，提高光學系統影像的對比度與明晰度，以及增強穿過光學系統的能量[5-6]。

可見光區抗反射鍍膜以波長區分，可分為單波長、雙波長與多波長[7-12]，單波長抗反射鍍膜設計簡單、層數少與製造容易，相反地多波長抗反射鍍膜就顯得困難許多，需要第三種鍍膜材料充當波長拓寬層，但從光學製造角度來看，材料超過兩種將大幅提高製程困難度以及降低鍍膜良率，因此一般還是使用兩種鍍膜材料，只是增加鍍膜層數。當抗反射鍍膜波長從可見光區拓寬至近紅外線區，也就是波長範圍從 350nm 至 950nm，光譜範圍擴大，鍍膜材料的選用、拓寬層的設計以及薄膜層的安排都必須重新考量。

光學薄膜的兩種鍍膜材料，一般分為高折射率材料與低折射率材料[13-16]。高折射率材料的定義為折射率高於基板折射率，二氧化鈦(TiO<sub>2</sub>)的折射率高、機械強度好，在可見光到紅外光都是透明的，因此是最常用來與二氧化矽(SiO<sub>2</sub>)搭配鍍多層膜濾光片的材料，但因二氧化鈦在 350nm 至 450nm 區域有微量吸收，將影響多層膜濾光片在該區域的穿透率[17-18]。因此本研究使用五氧化二鉬(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)為高折射率材料，雖然折射率略小於二氧化鈦的折射率，但在 350nm 至 450nm 區域沒有吸收，散射也比較小，非常適

合本研究使用為高折射率材料。至於低折射率材料的定義為折射率小於基板折射率，一般都使用二氧化矽材料為低折射率材料，二氧化矽不易分解，吸收與散射很小，在 160nm 到 8 $\mu$ m 有良好的透明度，因此是製鍍多層膜濾光片最佳的低折射率材料。不過本研究除使用二氧化矽為本研究的低折射率材料之外，也使用氟化鎂(MgF<sub>2</sub>)為本研究的低折射率材料，因為氟化鎂的折射率更低，只有 1.38，為最常用之氟化物，透光區為 140nm 到 10 $\mu$ m，其缺點為比較容易潮解怕水、使用壽命較短。

由於蒸鍍五氧化二鉬薄膜時，通氣量的控制是非常重要的，因此本研究使用不同通氣量蒸鍍五氧化二鉬薄膜，量測並分析五氧化二鉬薄膜的穿透率光譜、折射率與消光係數，以獲得蒸鍍五氧化二鉬薄膜的最佳製程參數。再利用此最佳製程薄膜參數結合二氧化矽薄膜或氟化鎂薄膜的製程薄膜參數，使用 Essential Macleod 光學薄膜軟體進行擴大拓寬層波長範圍與優化薄膜膜層厚度，設計寬波域抗反射薄膜，並使用電子槍蒸鍍法製鍍寬波域抗反射薄膜，在五氧化二鉬薄膜和氟化鎂薄膜的多層薄膜組合與五氧化二鉬薄膜和二氧化矽薄膜的多層薄膜組合，波長範圍 350nm 至 950nm 平均穿透率達到 99.1% 與 98.7%，薄膜的穿透率光譜、折射率與消光係數經由穿透式光譜儀與橢圓偏光儀量測獲得[19-20]。

## 二、實驗部份

本研究使用的電子槍蒸鍍系統為亮傑科技公司所生產，型號為 LJ-450E，包含真空系統及一個單電源的電子槍蒸鍍系統與一個石英監控系統，先將 B270 玻璃基板以清潔劑以及去離子水進行清洗，隨後以氮氣吹乾，將純度 99.99% 的五氧化二鉬、二氧化矽與氟化鎂材料置入坩鍋中，再將 B270 玻璃基板置入真空腔體內，啟動機械幫浦，抽氣至  $2 \times 10^{-2}$  torr。隨後啟動渦輪分子幫浦，待真空腔體真空度達  $3.2 \times 10^{-5}$  torr 後，基板溫度到達 200 $^{\circ}$ C 後，以電子槍蒸鍍法進行預鍍 4 分鐘，通氣之後，移開檔板開始沉積薄膜。鍍膜後對薄膜進行光學性質測量及分析，薄膜樣品穿透率光譜經由 PerkinElmer 所生產的 Lambda 900 UV/Visible/NIR 光譜儀量測，波長量測範圍為 350 至 950nm，薄膜樣品折射率、消光係數及薄膜厚度經由 J. A. Woollam 公司所生產 M-2000U 型號橢圓偏光儀判讀，波長量測範圍為 350 至 1000 nm，量測角度從 45 至 75 度，量測停留時間為 5sec。

## 三、結果與討論

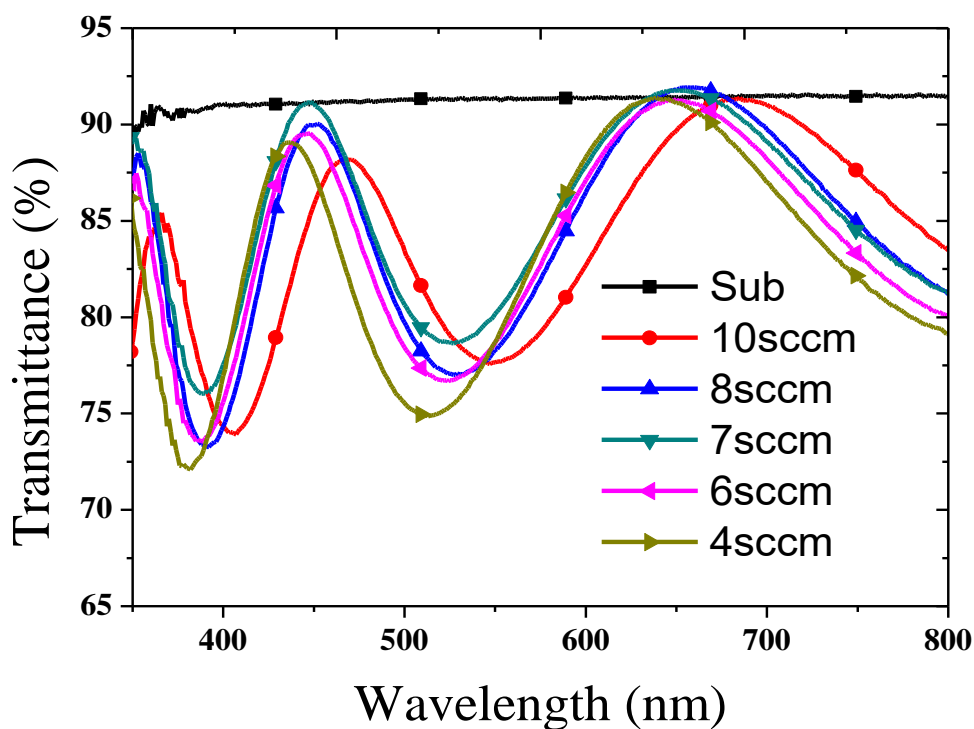
圖一為不同通氣量下 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜穿透率光譜圖，Sub 為裸基板，透過圖一穿透率光譜圖之比較，由於通氣量 7 sccm 在短波長的最大穿透率可到達裸基板的穿透率，得知通

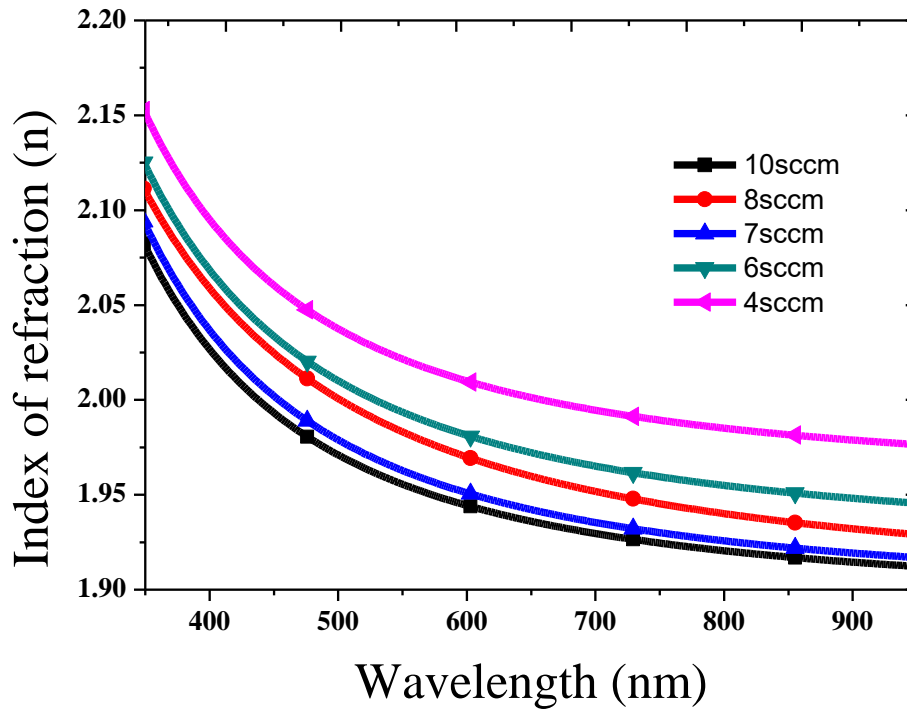
氧量 7 sccm 在穿透光譜圖中消光係數最小。圖二與圖三為使用橢圓偏光儀量測，配合橢圓偏光儀模擬軟體(Complete EASE)分析獲得不同通氧量下  $Ta_2O_5$  薄膜的折射率與消光係數，從圖三可得知通氧量 7 sccm 的  $Ta_2O_5$  薄膜具有最小消光係數，這與從圖一穿透率圖分析獲得的結論一致，那就是通氧量 7 sccm 的消光係數最小，而從圖二折射率圖可得知消光係數較大， $Ta_2O_5$  薄膜折射率也較大。因通氧量 7 sccm  $Ta_2O_5$  薄膜的消光係數最小，因此通氧量為 7 sccm 最適合做為寬波域抗反射鍍膜的製程設計參數。圖四為不同薄膜厚度下  $SiO_2$  薄膜的穿透率圖，圖五為圖四  $SiO_2$  薄膜的折射率圖，圖六為不同薄膜厚度下  $MgF_2$  薄膜的穿透率圖，圖七為圖六  $MgF_2$  薄膜的折射率圖，從圖五與圖七得知不同薄膜厚度的  $SiO_2$  薄膜與  $MgF_2$  薄膜，其折射率不一樣，因此將不同薄膜厚度  $SiO_2$  薄膜與  $MgF_2$  薄膜的折射率應用於寬波域抗反射薄膜的設計。而圖四不同厚度的  $SiO_2$  薄膜具有不同的穿透率曲線，是因為  $SiO_2$  薄膜的厚度與折射率不一樣所造成的。同樣地，圖六不同厚度的  $MgF_2$  薄膜具有不同的穿透率曲線，是因為  $MgF_2$  薄膜的厚度與折射率不一樣所造成的。

將圖二通氧量 7sccm  $Ta_2O_5$  薄膜的折射率、圖三通氧量 7 sccm  $Ta_2O_5$  薄膜的消光係數、圖五各種厚度的  $SiO_2$  薄膜折射率與圖七各種厚度的  $MgF_2$  薄膜折射率輸入 Essential Macleod 光學薄膜軟體，設計多層寬波域抗反射薄膜，進行擴大拓寬層波長範圍與優化薄膜膜層厚度，獲得波長 350 至 950 nm 高穿透率光譜圖， $Ta_2O_5$  與  $SiO_2$  8 層薄膜設計為  $Ta_2O_5(14nm)/SiO_2(33nm)/Ta_2O_5(36nm)/SiO_2(13nm)/Ta_2O_5(83nm)/SiO_2(15nm)/Ta_2O_5(31nm)/SiO_2(92nm)$ ， $Ta_2O_5$  與  $MgF_2$  11 層薄膜設計為  $MgF_2(36nm)/Ta_2O_5(5nm)/MgF_2(168nm)/Ta_2O_5(8nm)/MgF_2(48nm)/Ta_2O_5(29nm)/MgF_2(20nm)/Ta_2O_5(79nm)/MgF_2(16nm)/Ta_2O_5(33nm)/MgF_2(84nm)$ ，表一為不同抗反射薄膜設計與實際製鍍穿透率之平均值，圖八為不同抗反射薄膜設計與實際製鍍之穿透率圖，從表一與圖八可看出，在波長範圍 350nm 至 950nm，實際製鍍  $Ta_2O_5$  與  $MgF_2$  11 層寬波域抗反射薄膜的平均穿透率為 99.1%，而實際製鍍  $Ta_2O_5$  與  $SiO_2$  8 層寬波域抗反射薄膜的平均穿透率為 98.7%， $Ta_2O_5$  與  $MgF_2$  11 層寬波域抗反射薄膜優於  $Ta_2O_5$  與  $SiO_2$  8 層寬波域抗反射薄膜。

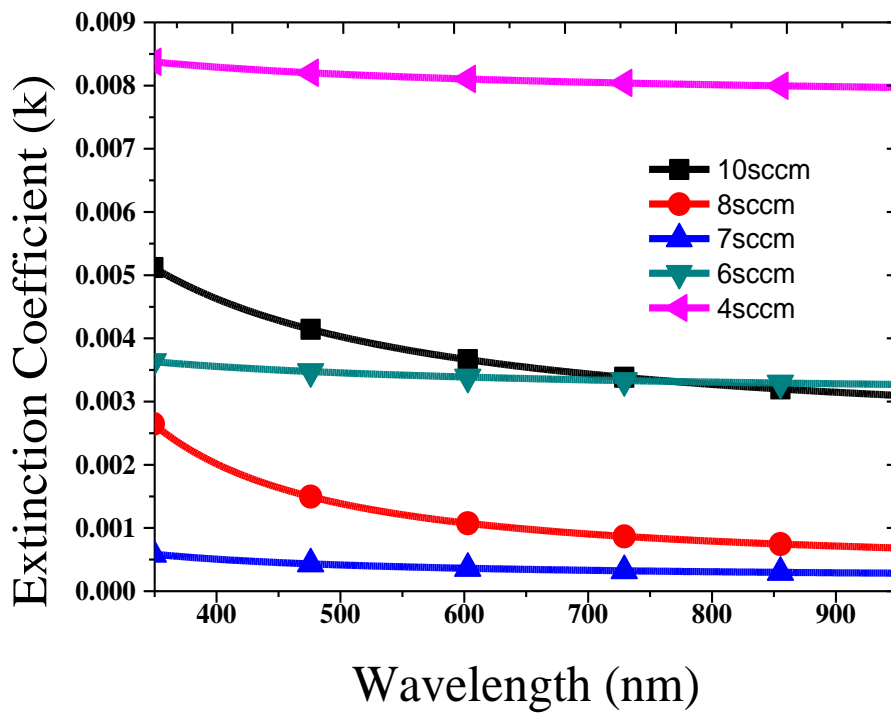
表一 不同抗反射薄膜設計與實際製鍍穿透率之平均值。

試片編號	350-950 nm 波域穿透率平均值(%)
Design-AR-Coating-Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub>	98.4
Design-AR-Coating-Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /MgF <sub>2</sub>	98.7
Single-sided AR-Coating-Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub>	98.7
Single-sided AR-Coating-Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /MgF <sub>2</sub>	99.1

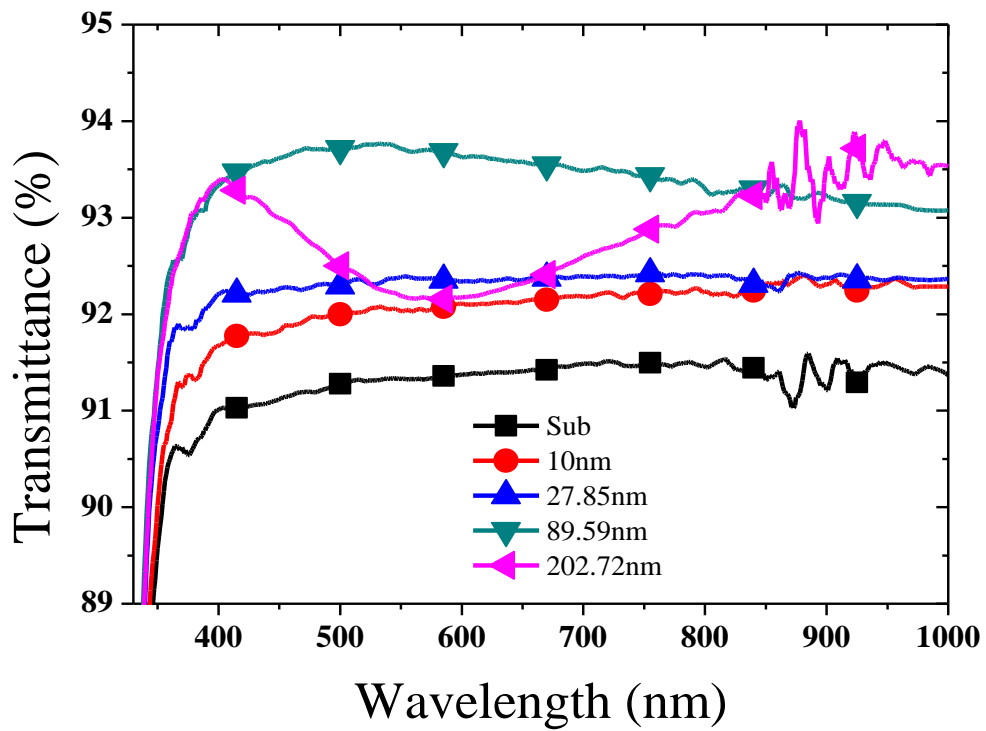
圖一 不同通氣量下 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜穿透率圖，Sub 為裸基板。



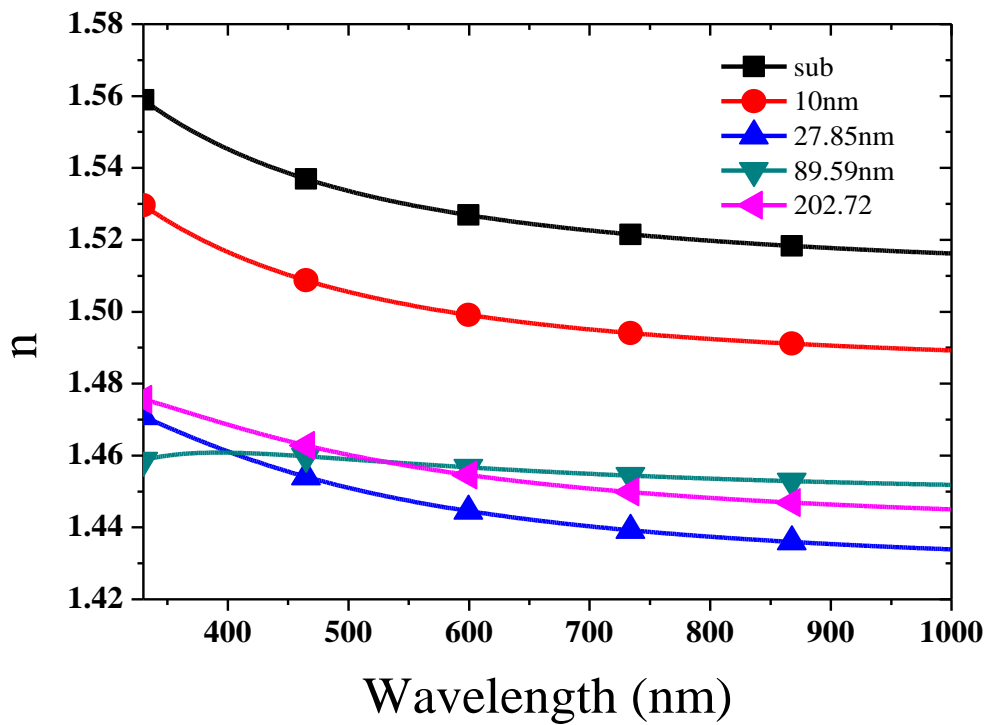
圖二 不同通氧量下 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜折射率圖。



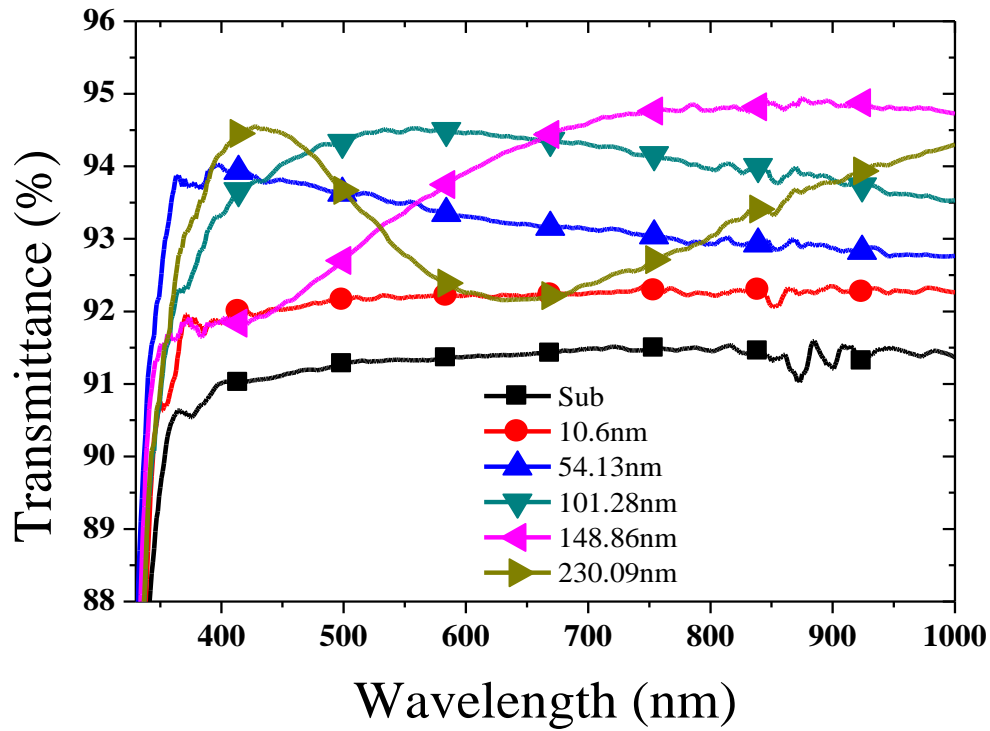
圖三 不同通氧量下 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜消光係數圖。



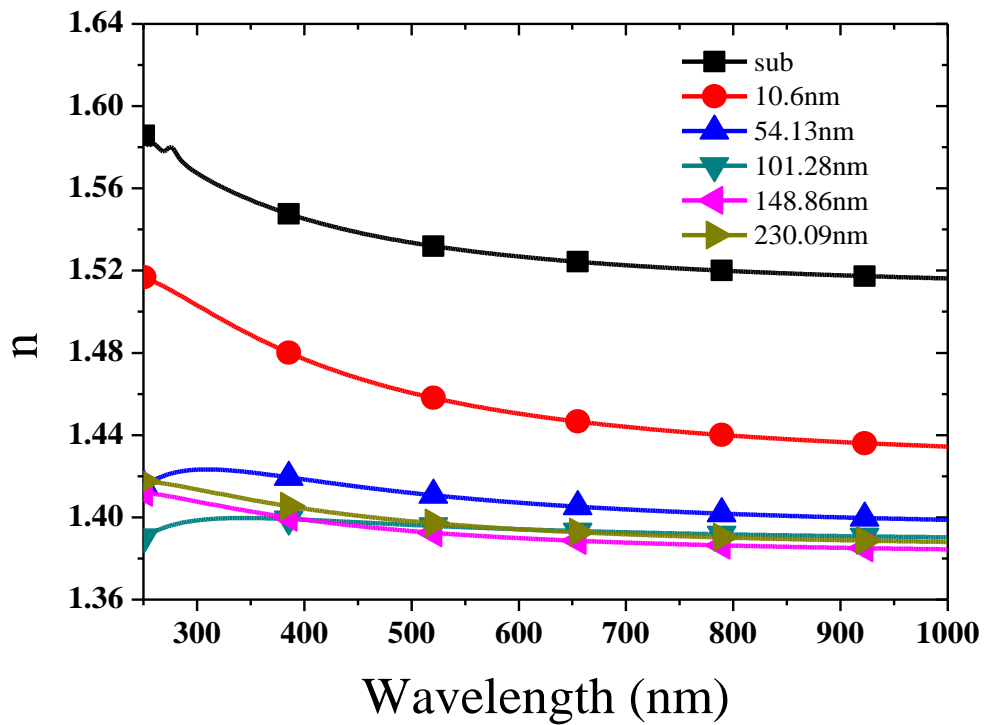
圖四 不同薄膜厚度下 SiO<sub>2</sub> 薄膜穿透率圖，Sub 為裸基板。



圖五 不同薄膜厚度下 SiO<sub>2</sub> 薄膜折射率圖，Sub 為裸基板。

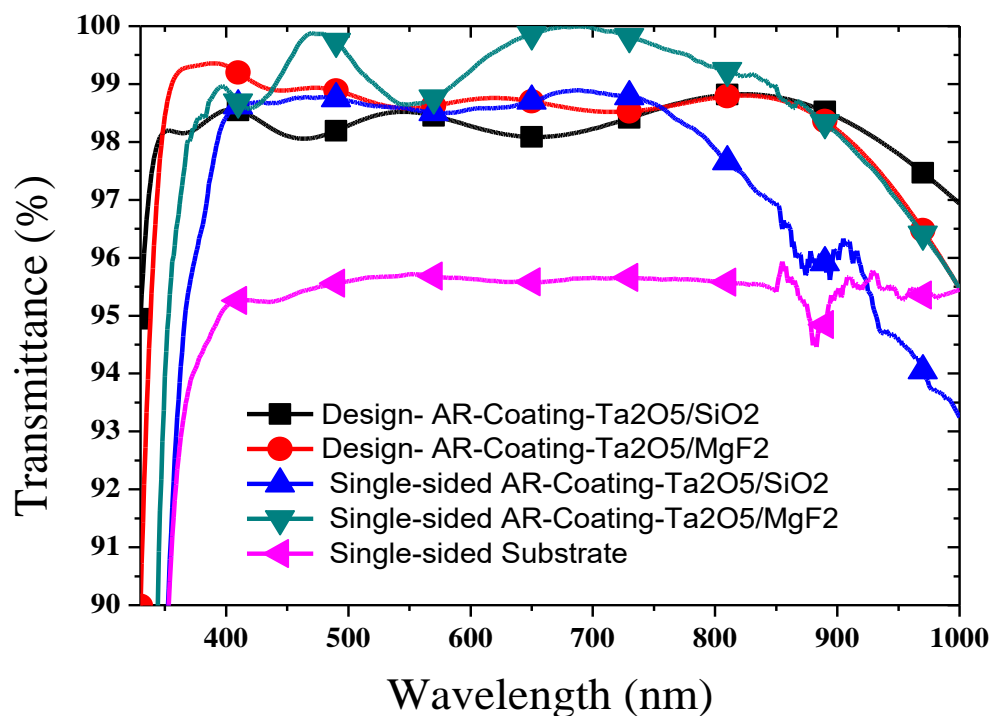


圖六 不同薄膜厚度下 MgF<sub>2</sub> 薄膜穿透率圖，Sub 為裸基板。



圖七 不同薄膜厚度下 MgF<sub>2</sub> 薄膜折射率圖，Sub 為裸基板。





圖八 不同抗反射薄膜設計與實際製鍍之穿透率圖。

#### 四、結論

本研究已使用電子槍蒸鍍法分別製作多層五氧化二鉬薄膜和氟化鎂薄膜以及五氧化二鉬薄膜和二氧化矽薄膜的兩種薄膜組合，成功地完成製鍍波長範圍 350nm 至 950nm 平均穿透率達到 99.1% 與 98.7% 的寬波域抗反射鍍膜，其抗反射效果已從可見光區域延伸至近紅外線區域，並使用穿透式光譜儀與橢圓偏光儀量測薄膜的穿透率光譜、折射率與消光係數。使用不同通氧量蒸鍍五氧化二鉬薄膜，量測並分析五氧化二鉬薄膜的穿透率光譜、折射率與消光係數，成功地獲得蒸鍍五氧化二鉬薄膜的最佳製程參數為通氧量 7 sccm 製鍍五氧化二鉬薄膜。再利用此最佳製程薄膜參數與光學常數，結合氟化鎂薄膜或二氧化矽薄膜的製程薄膜參數與光學常數，使用 Essential Macleod 光學薄膜軟體模擬計算多層薄膜的穿透率與反射率，進行擴大拓寬層波長範圍與優化薄膜膜層厚度，成功地設計寬波域抗反射薄膜。

## 五、參考文獻

1. Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: a survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805.
2. Kadam, M. R., Mahamuni, M. P., & Parikh, M. Y. (2015). Smart home system. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 2(1), 81-86.
3. Weber, R. H. (2011). Accountability in the internet of things. *Computer Law & Security Review*, 27(2), 133-138.
4. Weber, R. H. (2010). Internet of things – new security and privacy challenges. *Computer Law & Security Review*, 26(1), 23-30.
5. Macleod, H. A. (2017). *Thin-film optical filters* (5th ed). Boca Raton, FL: CRC Press.
6. 李正中 (民108)。 *薄膜光學與鍍膜技術* (9版)。新北市：藝軒。
7. Liou, Y. Y., Chang, E. W., Kuo, L. H., & Jaing, C. C. (2013). Design and implementation of wide-angular universal broadband visible antireflection coating for various substrates. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52(4R), 042502.
8. Liou, Y. Y., Kuo, L. H., Yan, J. Y., & Jaing, C. C. (2012). Implementation of universal broadband visible antireflection coating for various glass substrates using ion-assisted deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, 51(4R), 042501.
9. Honciuc, G. H., & Singurel, G. H. (2004). Antireflection optical coatings for the spectral range 400-700 nm, 400-900 nm and 800-1600 nm. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 6(4), 1199-1205.
10. Liou, Y. Y. (2004). Minimizing search method for wideband visible or wideband infrared antireflection coating design. *Japanese Journal of Applied Physics*, 43(4R), 1343-1347.
11. Rastello, M. L., & Premoli, A. (1992). Continuation method for synthesizing antireflection coatings. *Applied Optics*, 31(31), 6741-6746.
12. Premoli, A., & Rasrello, M. L. (1994). Minimax refining of wideband antireflection coatings for wide angular incidence. *Applied Optics*, 33(10), 2018-2021.
13. Dobrowolski, J. A., & Kemp, R. A. (1990). Refinement of optical multilayer systems with different optimization procedures. *Applied Optics*, 29(19), 2876-2893.
14. Baumeister, P. (1995). Starting designs for the computer optimization of optical coatings. *Applied Optics*, 34(22), 4835-4843.
15. Premoli, A., & Rasrello, M. L. (1992). Minimax refining of optical multilayer systems. *Applied Optics*, 31(10), 1597-1602.
16. Zycha, H. (1973). Refining algorithm for the design of multilayer filters. *Applied Optics*, 12(5), 979-983.
17. Selhofer, H., Ritter, E., & Linsbod, R. (2002). Properties of titanium dioxide films prepared by reactive electron-beam evaporation from various starting materials. *Applied Optics*, 41(4), 756-762.

18. Taralli, E., Portesi, C., Ricciardi, C., Tresso, E., & Rajteri, M. (2006). Improvement of titanium film absorption with antireflection coatings. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 559(2), 757-759.
19. Manificier, J. C., Gasiot, J., & Fillard, J. P. (1976). A simple method for the determination of the optical constant  $n$ ,  $k$  and the thickness of a weakly absorbing thin film. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 9(11), 1002-1004.
20. Liou, Y. Y., Lee, C. C., Jaing, C. C., Chu, C. W., & Hsu, J. C. (1995). Determination of the optical constant profiles of thin weakly absorbing inhomogeneous films. *Japanese Journal of Applied Physics*, 34(4R), 1952-1957.