

# 複合薄膜製程及多層膜感測特性分析技術

## Characterization and Analysis Technologies for Multi-layer Thin Film and Manufacturing Processes

林士欽<sup>1\*</sup>、林義鈞<sup>2</sup>、賴識翔<sup>1</sup>、梁沐旺<sup>3</sup>、王慶鈞<sup>4</sup>、唐謙仁<sup>5</sup>、田春林<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 工研院機械所 先進製造核心技術組 固態光源機械技術部 研究員

<sup>2</sup> 工研院機械所 先進製造核心技術組 固態光源機械技術部 副研究員

<sup>3</sup> 工研院機械所 先進製造核心技術組 固態光源機械技術部 經理

<sup>4</sup> 工研院機械所 先進製造核心技術組 副組長

<sup>5</sup> 逢甲大學 光電工程學系 教授

<sup>6</sup> 逢甲大學 電機工程學系 教授

**摘要：**精密系統所需之機、電、光及聲等元件規格日趨嚴格，高品質複合薄膜扮演的角色也日益重要，如使用單一的薄膜材料，無法鍍製出符合規格特性的光學濾光片，或無法使用傳統高低折射率材料之堆疊方式設計出符合規格的薄膜濾光鏡功能，因此新材料開發及可精確調控薄膜折射率的製程已是目前多層薄膜研究之重要方向。本文探討複合薄膜製程中之高品質薄膜特性問題，輔以濺鍍薄膜的技術及特性量測實驗，尋找出最佳的製程參數，使單層高、低折射率薄膜為設計基礎之多層膜光學效能提升、殘留應力有效降低，進而探討多層膜疊加後的光學效能、表面與應力行為，期使對薄膜製程及應用具有實際的功效助益。另鍍膜模擬分析方面，主要採用波茲曼方程式，用以陳述分子傳輸現象。

**Abstract :** Precision systems require more stringent specifications, including electricity, light and sound components. The role of high-quality composite films is becoming increasingly important in precision systems that single material thin films cannot fulfil the required specifications. Therefore, the development of new materials and the processes of accurately regulating the refractive index of thin films have become an important direction of multi-layer thin film research at present. In this paper, the characteristics of high quality composite thin films deposited using sputtering processes are discussed and the optimum process parameters are found so that the single layer high and low refractive index films are designed to improve the optical efficiency and residual stress. Coating simulations are also used to analyze the phenomenon of molecular transmission, which can benefit thin film manufacturing processes and applications.

**關鍵詞：**多層薄膜、薄膜應、模擬

**Keywords :** Multi-layer thin films, Stress, Simulation

### 前言

近年由於高科技的迅速發展演變，各類的機電光聲元件規格日趨嚴格，其中薄膜所扮演的角色也越來越重要，如高品質的光學介電質薄膜必須具有穩定之折射率、低吸收損耗、低散射損耗、高堆積密度 (packing density)、低殘留應力、均向

性 (homogeneous)、良好的機械附著力與硬度及高化學性穩定等功能，而使用單一的薄膜材料，常無法鍍製出符合規格的之元件，若使用傳統高低折射率材料之堆疊方式，亦無法設計出符合規格的光學濾光鏡功能，因此可精確調控多層薄膜折射率之製程及新材料開發，已是目前先進光學元件重要的研究方向。

## 複合光學薄膜相關文獻探討

以當前常用的光學材料來看，有  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiO}_2$ 、及  $\text{MgF}_2$ 、... 等，如表 1 所示，一般光學多層膜元件所使用之低折射率材料為  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgF}_2$  及  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ... 等，其中  $\text{SiO}_2$  相較於其他低折射率材料有較佳的环境穩定性與機械特性；而高折射率材料為  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{ZnO}$  及  $\text{Si}_3\text{N}_4$  等，其中  $\text{TiO}_2$  於高溫下容易失氧及產生結晶結構，使  $\text{TiO}_2$  薄膜形成柱狀結構，對折射率、吸收損耗及機械特性等造成影響，且  $\text{TiO}_2$  對製程溫度較敏感， $\text{Ta}_2\text{O}_5$  雖有前者較高的環境穩定性及較小吸收，但成本較高，而  $\text{ZnO}$  的顆粒較大易造成膜面粗糙而缺陷大；氮化物材料  $\text{Si}_3\text{N}_4$  或  $\text{AlN}$  則具有高折射率、高硬度與高環境穩定性等特性，雖然與  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  及  $\text{ZnO}$  相比其薄膜的折射率略低，但沒有失氧問題，穩定性與硬度高，並可透過控制氮氣及氧氣比例形成  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  或  $\text{AlO}_x\text{N}_y$  薄膜。 $\text{SiO}_x\text{N}_y$  或  $\text{AlO}_x\text{N}_y$  薄膜可準確的調變折射率，於設計的應用亦有良好硬度表現，可製作寬帶的抗反射膜、漸變薄膜、紅外光多層膜 ... 等 [1][2]。隨著各種鍍膜方式的進步，如電子束共蒸鍍、直流或交流磁控共濺鍍、離子束共濺鍍 ... 等 [3]-[12] 技術的改良，使具備穩定混合膜的折射率、鍍率及薄膜應力製程等控

制，期薄膜折射率有更多的選擇，使在光學薄膜設計能更精確的被實現，如表 2。

近年磁控濺鍍技術的發展，有研究使用磁控濺鍍製鍍光學多層膜或漸變折射率的濾光片，對於漸變折射率材料的控制有較佳掌握性，Zhang Jun-Chao 及 Fang Ming...etc 於 2011 年發表使用傳統的脈衝直流雙磁控濺鍍技術 [1]，調整兩個靶材之功率調變  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ - $\text{SiO}_2$  薄膜混合比例，製鍍出皺波濾光片 (Rugate filter)，2012 年 Stefan Bruns 及 Michael Vergöhl...etc，使用對稱式脈衝直流雙磁控濺鍍技術及電漿光譜監控技術，利用調整脈衝寬度之工作週期，控制  $\text{HfO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜混合比例 [2]。1989 年 C. K. Hwangbo etc. 研究單一材料不同反應氣體混合膜，使用電子束離子輔助蒸鍍法製  $\text{AlN}_x\text{O}_y$  薄膜，製備成皺波濾光片 [3]。P. V. Bulkin etc. 於 1993 年及 1997 年使用 ECR-PECVD 分別調變不同氮氧氣體分量，製  $\text{SiN}_x\text{O}_y$  薄膜 [4] 及不同氮氣比例製  $\text{SiNx}$  薄膜 [5] 而製備出皺波濾光片。R. Vernhes 於 2004 年使用 PECVD 調變射頻功率產生不同折射率之  $\text{SiN:H}$  薄膜而製備皺波濾光片 [6]。

2009 年 K. Lau etc. 使用反應性脈衝磁控濺鍍技術，製  $\text{SiN}_x\text{O}_y$  薄膜而製備皺波濾光片及抗反射膜 [7]，其中使用  $\text{AlN}_x\text{O}_y$  薄膜的折射率調變範圍為 1.65 至 1.83 (近紫外光區)，有較低之吸收，

表 1  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  的特性值 (其中殘留應力值為負值表示為壓應力，正值表示為張應力)

鍍膜材料	$\text{TiO}_2$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$	$\text{ZnO}$	$\text{SiO}_2$	$\text{Si}_3\text{N}_4$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$
折射率 (550 nm)	2.2~2.5	2~2.3	2.01	1.45~1.48	1.9~2.02	2.1~2.3
透明區 ( $\mu\text{m}$ )	0.35~12	0.35~10	0.4~2	0.16~8	0.25~9	0.32~8
蒸發溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	1900~2200	1900~2000	1975~2360	1800~2200	1850~1900	1800~1900
熱膨脹係數 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$\sim 2.57 \times 10^{-6}$	$\sim 2.42 \times 10^{-6}$	$\sim 6.5 \times 10^{-6}$	$\sim 0.38 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-6}$	$7.3 \times 10^{-6}$
熱傳導係數 (W/mk)	$\sim 0.52$	$\sim 0.37$	$\sim 0.54$	$\sim 1.1$	$\sim 27$	$\sim 53.7$
應力 (GPa)	-1.29~0.13	-0.57~0.15	-0.55~2	-1.1~-0.2	-1.5~0.64	-0.5~0.15
硬度 (GPa)	4.61~0.4	10.9~9	6~4	$\sim 9$	21~12	5.3~3.9
介電係數	35~114	25~45	8.65	3.9~4.5	3.9~7.8	25.5
能隙 (eV)	$\sim 3.47$	$\sim 4.2$	$\sim 3.37$	$\sim 9$	$\sim 5$	$\sim 3$

表 2 不同製程製鍍氮化矽薄膜之光學與機械特性

Deposition Method	Refractive index	Extinction Coefficient	Stress(GPa)	Hardness(GPa)
PECVD-RF	1.9-1.95@532nm	$5 \times 10^{-3}$ @532 nm	-0.95~0.45	13~27
Pulse dc sputtering	2.01@532nm	$6.2 \times 10^{-4}$ @532 nm	-0.38	18
Ion beam sputtering	2.04@633nm	$7 \times 10^{-4}$ @633 nm	-1.9	12~21

## 更完整的內容

詳見 | 機械工業雜誌 | · 435 期 · 108 年 6 月號

機械工業雜誌·每期 **220** 元·一年 12 期 **2200** 元

線上訂購網址：<https://www.automan.tw/magazine/orderMag.aspx>

### 付款方式

1. 郵局劃撥—戶名：財團法人工業技術研究院機械所 帳號：07188562  
請於劃撥單的通訊欄寫明：購買期數、金額等
2. 匯款資料—兆豐國際商業銀行新竹分行(代號 017)  
帳號：203-07-02288-0 戶名：財團法人工業技術研究院
3. 信用卡—請填寫信用卡 [訂購單](#)

麻煩您將 繳款收執 或 信用卡刷卡單 傳真至 (03)582-2011，我們會盡快處理您的訂單並開通權限，再次感謝您的支持與愛護。

訂書專線：03-591-9339

傳 真：03-582-2011

機械工業雜誌·官方網站：[www.automan.tw](http://www.automan.tw) 機械工業雜誌·信箱：[jmi@itri.org.tw](mailto:jmi@itri.org.tw)

## 機械工業雜誌 優惠訂購單

訂閱一年 **12** 期

**\$ 2200** / 續訂戶 \$ 2000

好禮二選一

**A** 史欽泰墨寶帆布袋

**B** 工研院機械所無人車USB (8G)

訂閱紙本+電子雜誌

**\$ 3000** 原價 \$ 4400

一年12期

贈送

**A** 史欽泰墨寶帆布袋

訂閱二年 **24** 期

**\$ 4000** / 續訂戶 \$ 3600

好禮四選二

**A** 史欽泰墨寶帆布袋

**B** 工研院機械所無人車USB (8G)

**C** 工具機叢書任一本

**D** 智慧機械人叢書任一本

### 限量專屬精品送給您



**A**



**B**



**C**



**D**