

# 複合薄膜及多層膜的應力分析技術

## Stress Analysis Technology for Multilayer Thin Films

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

<sup>1</sup> 工業技術研究院 機械所固態光源機械技術部 研究員

<sup>2</sup> 工業技術研究院 機械所固態光源機械技術部 經理

<sup>3</sup> 工業技術研究院 工研院機械所 先進機械技術組 副組長

<sup>4</sup> 工業技術研究院 逢甲大學光電工程學系 教授

<sup>5</sup> 工業技術研究院 逢甲大學電機工程學系 教授

**摘要：**光學系統所需之光學元件規格日趨嚴格，其中光學薄膜扮演的角色也日益重要，而部份應用檢測中，使用單一的薄膜材料無法鍍製出符合規格的濾光片，或無法使用傳統高低折射率材料之堆疊方式，設計出符合規格的光學薄膜濾光鏡功能，因此新的材料開發及可精確調控薄膜折射率之製程，已是目前光學多層干涉薄膜重要的研究方向。文中探討濺鍍製程中之高品質多層薄膜的應力問題，乃以硬性玻璃基板的薄膜應力理論為基礎，輔以薄膜鍍膜的技術及應力量測實驗來尋找最佳的製程參數，期使單層高、低折射率薄膜為設計基礎之多層膜殘留應力能有效降低，進而探討多層膜疊加後的應力行為。主題為多層膜應力的物理模型建置、量測與模擬分析等說明。根據彈性力學與應變不匹配等原理，從理論上建立一個包含薄膜本徵應力的薄膜殘留應力分配預測模型，以分析薄膜殘留應力提供一個輔助設計的工具，期使對薄膜製程及應用具有實際的功效助益。

**Abstract :** This work investigates multilayer thin film stress issue for the sputtering process. The theory is based on thin films deposited onto glass substrates, and using thin film deposition and stress measurement experiments to optimize process parameters. We reduced the residual stress of multilayer thin films, which include high and low refractive index layers, and further investigated the stress accumulation behavior on the stacked multilayers. The physical model of multilayer films stress was built, measured and simulated according to the principles of elasticity and strain mismatch. An intrinsic prediction model for the residual stress distribution and analysis of the films was established. The model provides computer-aided design that can benefit thin film manufacturing processes and applications.

**關鍵詞：**薄膜應力、濺鍍、多層薄膜

**Keywords :** Stress, Sputter, Multilayer thin films

### 前言

近年由於高科技的迅速發展演變，光學系統所需之光學元件規格日趨嚴格，其中光學薄膜所扮演的角色也越來越重要。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) 薄膜、良好的機械附著力與硬度及高化學性穩定等功能，在某些特

殊的條件下(高溫、高濕、強幅射照射環境、...)，部份的應用檢測中，使用單一的薄膜材料無法鍍製出符合規格的濾光片，或無法使用傳統高低折射率材料之堆疊方式，設計出符合規格的光學薄膜濾光鏡功能，因此新的材料開發及可精確調控薄膜折射率之製程，已是目前光學多層干涉薄膜重要的研究方向。當前常用的材料有 TiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub>、及 MgF<sub>2</sub>、... 等，如表 1 所示(其中殘留應力值為負值表示為壓應力，正值表示為張應力)。但要製鍍出高硬度、高附著性及良好的環境穩定性等之光學多層膜，這些常用光學薄膜材料已無法達到某些特殊的規格，因此選擇良好的材料就成為很重要的研究課題。一般光學多層膜所使用之低折射率材料為 SiO<sub>2</sub>、MgF<sub>2</sub> 及 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>... 等，其中 SiO<sub>2</sub> 相較於其他低折射率材料有較佳的環境穩定性與機械特性。高折射率材料為 TiO<sub>2</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、ZnO 及 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 等，其中 TiO<sub>2</sub> 於高溫下容易失氧及產生結晶的結構，而再結晶會使 TiO<sub>2</sub> 薄膜形成柱狀結構，會對折射

率、吸收損耗及機械特性等造成影響。且 TiO<sub>2</sub> 對製程溫度較敏感，故對於環境穩定度有較高的要求；Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 雖有前者較高的環境穩定性及較小吸收，但 Ta 含量在地殼很稀少(0.0008%)，因此成本較高。而 ZnO 的顆粒較大易造成膜面粗糙而缺陷大，Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 雖有較高折射率，但其硬度也較小。因此材料的開發與選用成為一個很重要的研究課題。一般來說良好的光學薄膜需具備高穩定性與耐久性，而氮化物材料 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 則具有高折射率、高硬度與高環境穩定性等特性，雖然與 TiO<sub>2</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 及 ZnO 相比其薄膜的折射率略低，但沒有失氧問題，穩定性高且硬度高，並可透過控制氮氣及氧氣比例形成 SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> 薄膜。綜合以上 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 及 SiO<sub>2</sub> 薄膜之優點(有良好的環境穩定性)外，亦可準確的調變折射率便於設計的應用，且預期也有良好的硬度表現。氮氧化矽多層薄膜具優異的光學特性和機械特性如表 2，較一般傳統兩種金屬材料以上的光學多層膜有許多優勢，如寬帶的抗反射膜、漸變薄膜、紅外光多層膜... 等 [1]

表 1 TiO<sub>2</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、ZnO、SiO<sub>2</sub>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的特性

鍍膜材料	TiO <sub>2</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	SiO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
折射率(550nm)	2.2~2.5	2~2.3	2.01	1.45~1.48	1.9~2.02	2.1~2.3
透明區(μm)	0.35~12	0.35~10	0.4~2	0.16~8	0.25~9	0.32~8
蒸發溫度(°C)	1900~2200	1900~2000	1975~2360	1800~2200	1850~1900	1800~1900
熱膨脹係數(°C <sup>-1</sup> )	~2.57×10 <sup>-6</sup>	~2.42×10 <sup>-6</sup>	~6.5×10 <sup>-6</sup>	~0.38×10 <sup>-6</sup>	2.3×10 <sup>-6</sup>	7.3×10 <sup>-6</sup>
熱傳導係數(W/mk)	~0.52	~0.37	~0.54	~1.1	~27	~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	~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)	~3.47	~4.2	~3.37	~9	~5	~3

表 2 不同製程製鍍氮化矽薄膜之光學特性與機械特性

Deposition Method	Refractive index	Extinction Coefficient	Stress(GPa)	Hardness(GPa)
PECVD-RF	1.9-1.95@532nm	5×10 <sup>-3</sup> @532nm	-0.95~0.45	13~27
Pulse dc sputtering	2.01@532nm	6.2×10 <sup>-4</sup> @532nm	-0.38	18
Ion beam sputtering	2.04@633nm	7×10 <sup>-4</sup> @633nm	-1.9	12~21

## 更完整的內容

詳見【機械工業雜誌】423 期・107 年 6 月號

---

機械工業雜誌・每期 220 元・一年 12 期 2200 元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9339

傳 真：03-582-2011

機械工業雜誌・官方網站：[www.automat.tw](http://www.automat.tw)

機械工業雜誌・信箱：[jmi@itri.org.tw](mailto:jmi@itri.org.tw)