

# 闭磁场非平衡磁控溅射 在光学薄膜中的应用

陈楠<sup>1</sup>, 贾克辉<sup>2</sup>, 卜轶坤<sup>3</sup>

(1. 长春税务学院, 吉林 长春 130021; 2. 梦溪贸易有限公司, 上海 201000;  
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

【摘要】介绍了一种制备高质量光学薄膜的新型闭磁场磁控溅射技术。该技术具有高束流密度和低内应力, 可以在高沉积速率条件下制备性能极佳的精密光学薄膜。采用精密的单轴圆鼓基板系统, 可显著提高批量镀膜的能力。

关键词: 闭磁场; 光学薄膜; 磁控溅射

中图分类号: TB43

## Application of Closed Field- unbalanced Magnetron Sputtering in Optical Coatings

CHEN Nan<sup>1</sup>, JIA Ke- hui<sup>2</sup>, BU Yi- kun<sup>3</sup>

(1. Changchun Taxation College, Changchun 130012, China;  
2. Meng Xi Trade Co., Ltd., Shanghai 201000, China;  
3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A new type closed field- unbalanced magnetron sputtering technology for optical coatings is described. With advantages of high ion current density and low internal stress, this new technology can prepare films with excellent and reproducible optical properties over a large surface area at high deposition rate. High throughput deposition can be achieved by single- axis round drum carrier.

Keywords: closed field magnetron; optical coatings; magnetron sputtering

## 1 引言

近年来, 随着光学多层膜在精密光学、光通信和投影光学系统中的应用, 多种新型多层膜制备技术应运而生。磁控溅射技术具有传统电子束蒸镀技术所无法比拟的优点, 溅射沉积薄膜原子的荷能比

蒸发沉积原子的荷能高 10 倍以上, 这使其在成膜方面具有更高的硬度和膜层附着力, 而且这种高能量过程适用于基底材料的室温沉积。闭磁场磁控溅射 (Closed Field Magnetron (CFM)) 的概念是 1991 年由英国学者 Teer 首次提出<sup>[1]</sup>, 其基本原理如图 1 所示。该技术的独特之处在于它是由极性相反的多组

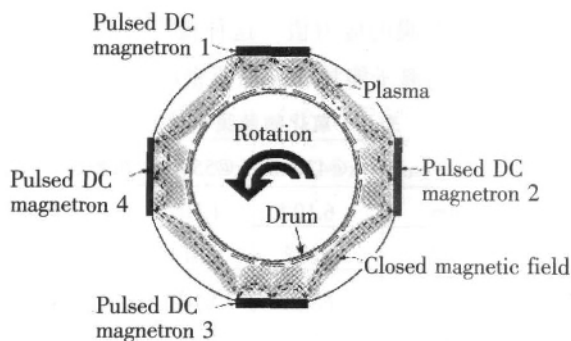


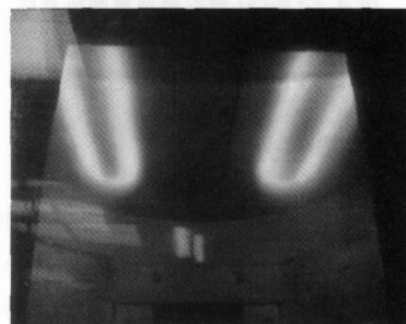
图1 闭磁场等离子体构造示意图

磁铁构成相邻的磁控管，这种构造使磁力线可以从一个磁控管直接延伸到另一个磁控管，形成封闭的磁阱。这样可以有效阻止电子逃逸，形成增强等离子体，从而提高溅射效率和离化率。该技术由 Teer 公司开发，主要用于超硬 CrTiAlN 薄膜的镀制，目的是为了在磁控溅射离子镀中增加束流密度。该技术主要利用了非平衡磁控的概念，设计中将基板包裹在由闭合磁力线所构成的磁场区域内，将磁控溅射的优点（成膜速率高、源为大平面源，有利于膜层厚度均匀）和离子镀过程的优点（能改变膜基界面的结合形式，提高膜基附着力，膜层组织致密等）结合在一起，形成了一种全新的镀膜技术。

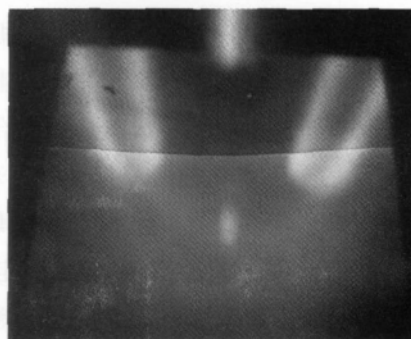
## 2 设备原理

英国 Applied Multilayers Ltd. 的 D.R. Gibson 博士利用该专利技术开发了适用于光学膜制备的环形闭合磁场反应磁控溅射镀膜机<sup>[23]</sup>。该镀膜机专用于沉积单层和多层精密光学薄膜，取得了成功，现已成为采用磁控溅射沉积制备光学薄膜的亮点。相对于传统的直流溅射沉积方式，闭磁场过程并不要求一个用于激活的独立的离子源或等离子体源，也不需要真空室通过真空泵或障板分离成沉积区和反应区。基底周围能充分氧化，不需要后期的退火处理，减少了薄膜对氧气分压的依赖。使用闭磁场非平衡磁控溅射技术创建了可延伸电子平均自由程的磁场构造，产生高束流密度。高束流密度和约 30 eV 的低能

量粒子优化了薄膜的生长状况，使生长的薄膜非常致密，光谱性能稳定，表面光滑且具有极好的光学品质。所开发的系统至少包含 2 组磁控管或是 4 组/6 组极性相反且相邻组合的磁控管，通过相邻磁控管闭合的磁力线引起等离子体增强效应，图 2 是传统开磁场系统工作和采用新的闭磁场系统工作所形成的等离子体照片。由照片可知，采用闭合磁场构造，在沉积区形成均匀的等离子区，这种设计可以使所有的镀膜样品处于相同的沉积和等离子体环境中。由于采用了环形闭合磁场构造和等离子体磁极，因此作用于基片的等离子体具有高离子流密度和强离子区域的特点，从而保证了薄膜的质量。由于采用的大矩形靶是一个面源，对于小基片来说，沉积区域能够覆盖整个基片区，加之基板系统沿中心轴进行周向转动，可以满足一般的膜厚均匀性要求，对于较大的基片，或更为严格的膜厚分布，可以在基板和靶材之间安装膜厚修正挡板，以改善基片上的膜厚均匀性。图 3 是用于光学薄膜制备的闭磁场反应磁控溅射原理。图 4 给出了 Applied Multilayers



(a) 开磁场



(b) 闭磁场

图2 采用不同磁极构造对等离子体的影响

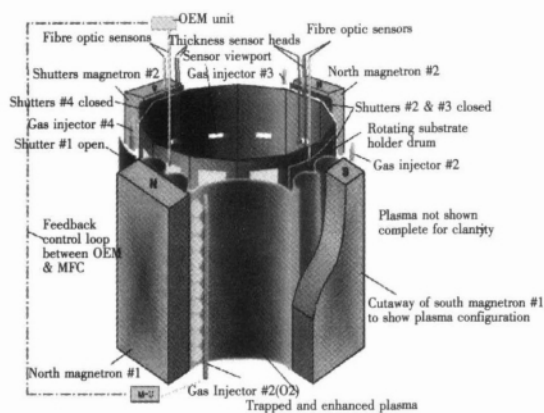


图 3 闭磁场非平衡反应溅射沉积光学薄膜示意图

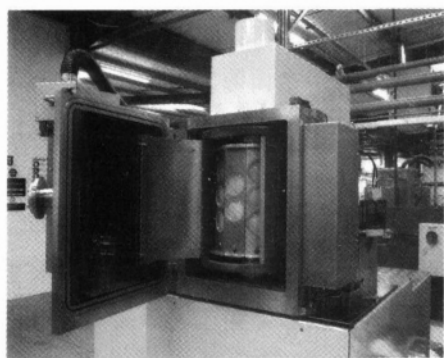


图 4 CFM450 磁控溅射镀膜机系统

Ltd.推出的 CFM450 磁控溅射镀膜机系统。

### 3 薄膜特性分析

紧凑的设计配合高功率密度可使镀膜周期变快。金属氧化物、金属氮化物、透明传导氧化物、碳化物、纯金属和合金等都可以采用纯金属靶材沉积。薄膜的光学性能具有低吸收和优化的折射率。金属氧化物和氮化物可以在高速状态下沉积。这种过程不需进行氧化独立的离子源或等离子体源，极大地简化了运转过程并降低了成本。表 1 给出了采用该系统制备的单层氧化物薄膜特性。由表可知，高能过程使氧化物薄膜的折射率接近于其块状材料，而且致密的结构也使薄膜光谱非常稳定，有效的氧化过程使薄膜的吸收也非常低。通过测量镀膜前后基板面型的变化，分析该沉积方式薄膜应力的大小，膜层所受均为压应力， $\text{SiO}_2$  为 -150 MPa,

$\text{Nb}_2\text{O}_5$  仅为 -30 MPa, 远低于采用其他溅射沉积方式制备氧化物薄膜的应力值。这种低应力值主要是由该方式较低的离子能量和高束流密度所致。

表 1 氧化物薄膜特性

材料	$n@550\text{ nm}$	$k@420\text{ nm}$	$k@550\text{ nm}$	沉积速率 ( $\text{\AA}/\text{S}$ )
$\text{ZrO}_2$	2.06	$6.10^{-4}$	$1.10^{-4}$	4.0
$\text{SiO}_2$	1.47	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$	5.0
$\text{TiO}_2$	2.45	$8.10^{-4}$	$3.10^{-4}$	5.0
$\text{Ta}_2\text{O}_5$	2.17	$5.10^{-4}$	$2.10^{-4}$	5.0
$\text{Nb}_2\text{O}_5$	2.37	$5.10^{-4}$	$2.10^{-4}$	5.0

图 5 给出了 1  $\mu\text{m}$  厚单层  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  薄膜和未镀膜基底的可见光谱透过率实测曲线。由图可知，在整个可见光谱区，薄膜具有极低的吸收特性和良好的折射率均匀性，尤其是在短波区。

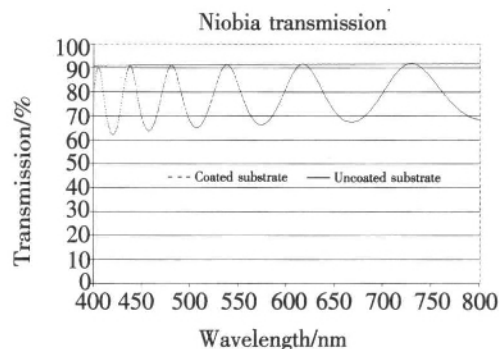


图 5 单层  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  薄膜的透射光谱

图 6 是上述  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  薄膜表面粗糙度的情况，结果显示获得了均方根表面粗糙度为 0.45 的超光滑表面。与未镀膜基底相比，表面粗糙度没有明显的增加。

### 4 多层膜制备

采用时间监控膜厚法，通过闭磁场溅射沉积制备了宽带增透、UV-IR-Cut 和窄带滤光片。图 7 是采用  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  制备的 4 层可见光波段宽带增透膜；图 8 是 36 层  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  UV-IR-Cut 实测与理论设计曲线的对比。通过采用共溅射沉积方式，可以实现变折射率材料，折射率可以在 1.45~2.35 之间变化。图 9 给出了采用  $\text{Si}/\text{SiO}_x\text{Ny}$  交替沉积的 15 层近红外窄带滤光片理论与实测光谱对比。从多层膜制备可

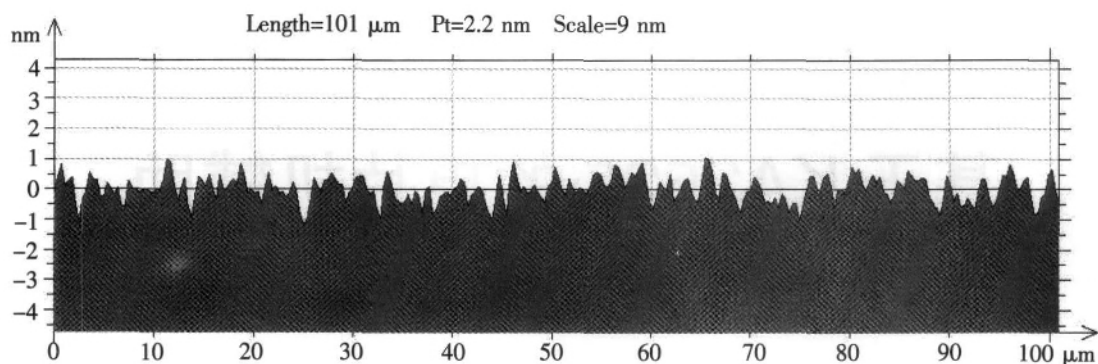


图 6 单层  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  薄膜透表面形貌

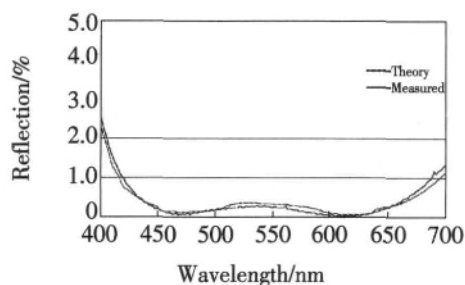


图 7 4 层  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  宽带增透膜

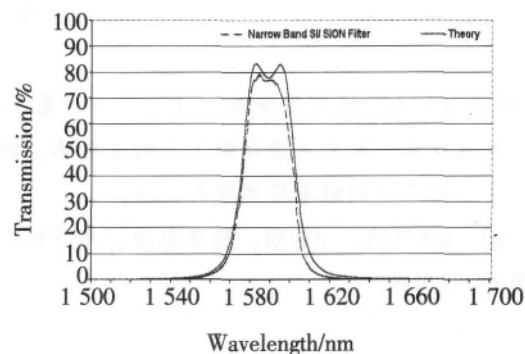


图 9  $\text{Si}/\text{SiO}_x\text{Ny}$  15 层窄带滤光片

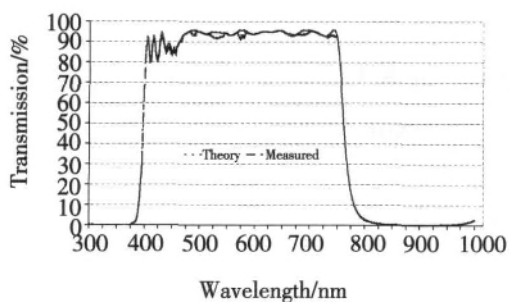


图 8 36 层  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  UV-IR-Cut

可以看出，溅射沉积速率的稳定，使时间监控膜厚法在非平整膜厚的监控中获得成功。监控简便快捷，

不需要额外的辅助控制仪器。

## 5 结 论

闭磁场非平衡磁控溅射技术克服了原有溅射沉积技术膜层应力大，沉积速率低等缺点。具有高束流密度和低内应力，可以在高沉积速率条件下制备性能极佳的精密光学薄膜，并在未来光学薄膜制备中具有广阔的应用前景。(No.2)

## 参考文献:

- [1] Teer D G, US Pat. #5,554,519, 1991
- [2] Walls J M, Gibson D R, Brinkley I, et al. SVC Proceedings, 2003
- [3] Gibson D R, Walls M, Brinkley, Teer D C, et al. SVC Proceedings, 2004