

## 基于孪生靶的磁控溅射系统薄膜厚度均匀性的研究

魏博洋<sup>1\*</sup>, 刘冬梅<sup>1</sup>, 付秀华<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 汪洋<sup>2</sup>, 耿煜<sup>2</sup><sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup> 光驰科技(上海)有限公司, 上海 200444

**摘要** 磁控溅射系统中薄膜厚度的均匀性是关键指标之一。通过分析磁场强度、靶材与基板的距离和气体压强对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  两种薄膜厚度均匀性的影响, 借助 Langmuir 探针分析等离子体的密度, 并采用二进制阶梯式充气方式调整纵向的均匀性。通过对靶材加载正弦半波电压并使用 MATLAB 软件确定振幅及相位参数, 从而调整横向的均匀性。实验结果表明, 对于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜层, 其在横向上、中和下的均匀性分别为  $\pm 1.27\%$ 、 $\pm 0.62\%$  和  $\pm 1.33\%$ , 纵向的均匀性为  $\pm 0.33\%$ ; 对于  $\text{SiO}_2$  膜层, 其在横向上、中和下的均匀性分别为  $\pm 1.12\%$ 、 $\pm 0.42\%$  和  $\pm 1.23\%$ , 纵向的均匀性为  $\pm 0.25\%$ 。

**关键词** 薄膜; 厚度均匀性; 磁控溅射; 孪生靶; 等离子体密度; 二进制梯度充气方式; 正弦半波

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0731001

## Study on Film Thickness Uniformity of Magnetron Sputtering System Based on Twin Target

Wei Boyang<sup>1\*</sup>, Liu Dongmei<sup>1</sup>, Fu Xiuhua<sup>1</sup>, Zhang Jing<sup>1</sup>, Wang Yang<sup>1</sup>, Geng Yu<sup>2</sup><sup>1</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,

Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Optorun (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200444, China

**Abstract** Film thickness uniformity in a magnetron sputtering system is one of the key indicators. The effects of magnetic field intensity, distance between target and substrate and gas pressure on the thickness uniformity of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{SiO}_2$  films are analyzed. The plasma density is analyzed by using Langmuir probe, and the longitudinal uniformity is adjusted by binary gradient inflation mode. By loading sine half-wave voltage to the target and using MATLAB software to determine the amplitude and phase parameters, so as to adjust the uniformity of the transverse. The experiment results show that for the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  film, the transverse uniformity is  $\pm 1.27\%$ ,  $\pm 0.62\%$ , and  $\pm 1.33\%$  respectively at the top, middle, and bottom, and the longitudinal uniformity is  $\pm 0.33\%$ . For the  $\text{SiO}_2$  film, the transverse uniformity is  $\pm 1.12\%$ ,  $\pm 0.42\%$ , and  $\pm 1.23\%$  respectively at the top, middle, and bottom, and the longitudinal uniformity is  $\pm 0.25\%$ .

**Key words** thin films; thickness uniformity; magnetron sputtering; twin target; plasma density; binary gradient inflation mode; sine half-wave

**OCIS codes** 310.1860; 310.6860; 310.4165; 310.6805

## 1 引言

现代真空镀膜技术中,磁控溅射作为最重要的

物理气相沉积技术之一,因其具有制备的薄膜聚集密度大<sup>[1-2]</sup>、结合力好和沉积速率快<sup>[3]</sup>的特点,已被广泛应用于光学、半导体和机械等领域,其中薄膜厚

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-10-29; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20190302095GX)

\* E-mail: sjx8811@sohu.com

度的均匀性是衡量光学薄膜质量的重要指标之一。对于批量生产的光学元件,在保证薄膜厚度均匀性的情况下,能够有效提高薄膜批量生产的效率<sup>[4-5]</sup>,这也是评价磁控溅射机的重要指标之一。

影响磁控溅射沉积薄膜厚度均匀性的因素有很多,如靶材磁场强度、靶材与基板的距离、气体压强和基片的运动方式<sup>[6-8]</sup>等。2010 年,于贺等<sup>[9]</sup>通过调整自转系统转速比的方法来改善薄膜厚度的均匀性,当转速比为 0.5 时,薄膜的厚度偏差为 0.018。2011 年,朱亚丹等<sup>[10]</sup>采用了基底公转速度变速法来制备厚度为 200 nm 的 Mo 层,其不均匀性从 20.6%修正到 1.1%,Si 层的不均匀性从 27.0%修正到 1.6%。2016 年,张向秀等<sup>[11]</sup>通过分析基片的运动方式在直径为 200 mm 的基片上,将薄膜的非均匀性减小到 1%以下。2019 年,冯时等<sup>[12]</sup>在直径为 300~600 mm 的大口径光学元件上均匀镀膜,薄膜的均匀性达到 0.4%。

针对目前磁控溅射沉积薄膜厚度均匀性差的问题,本文将  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  两种材料作为研究对象,分析影响圆柱孪生靶磁控溅射沉积薄膜厚度的因素,借助 Langmuir 探针分析等离子体的密度,通过改变充气方式来调整纵向的均匀性,通过加载靶材电压为正弦半波来修正横向的均匀性。

## 2 理论分析及讨论

磁控溅射沉积的光学薄膜主要应用于可见或红外波段,沉积的薄膜材料主要有氧化物和氢化物。为了提高薄膜的沉积效率,使靶材处于正交的电磁场中。根据左手定则,电子受到洛伦兹力的作用而绕靶面进行螺旋运动。运动的过程中,增大了电子撞击工作气体的几率,致使气体电离产生离子,而离

子不断加速轰击靶材,溅射出的靶原子(或分子)与电感耦合(ICP)离化的离子结合,结合后沉积在基板的表面上形成光学薄膜。若获得均匀的薄膜,需要确保电场和工作气体的均匀性。在忽略溅射粒子与溅射气体分子相互碰撞的情况下,膜厚的均匀性呈余弦分布,孪生靶材磁控溅射沉积薄膜厚度的原理如图 1 所示,其中 TG 为靶材。由孟秀清等<sup>[13]</sup>推导的膜厚分布关系式为

$$Q = cwF(b)\cos\delta \frac{\cos\beta \cdot ae}{(a^2 + e^2)(a^2 + e^2)^{\frac{1}{2}}} dx, \quad (1)$$

式中: $c$  为成正比常数,与靶材的种类、溅射粒子的能量、溅射粒子和基板的附着系数有关; $w$  为靶刻蚀的宽度; $\delta$  为衬底面元线与衬底面元法线之间的夹角; $\beta$  为刻蚀点径向的线角度; $b$  为衬底面元到刻蚀点的长度; $a$  为刻蚀点与 X 轴的距离; $e$  为刻蚀点垂线与 X 轴的交点到衬底面元  $dx$  的长度; $F(b)$  为衬底面元到刻蚀点的长度函数。对波长进行归一化处理,给出薄膜厚度在上、中和下位置处的横向均匀性分布曲线,如图 2 所示。

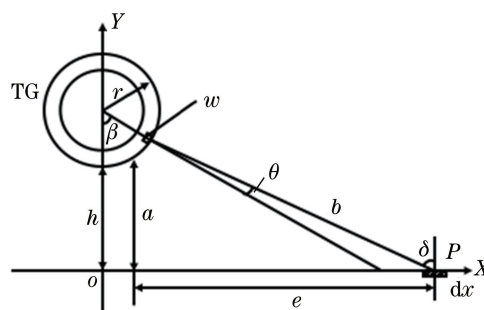


图 1 孪生靶材磁控溅射沉积薄膜厚度的原理示意图

Fig. 1 Schematic of film thickness deposited by twin target magnetron sputtering

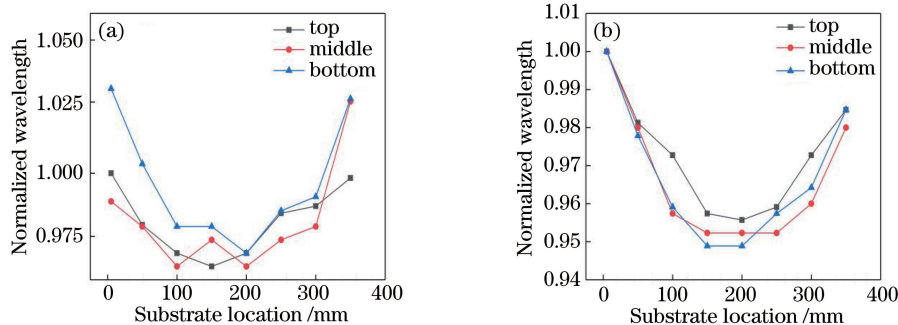


图 2 不同材料的薄膜厚度的横向均匀性分布曲线。(a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (b)  $\text{SiO}_2$

Fig. 2 Horizontal uniformity distribution curves of film thickness of different materials. (a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (b)  $\text{SiO}_2$

### 2.1 磁场不均匀对薄膜厚度的影响

使用高斯计来测量孪生靶的磁场强度分布,将

靶材分为 10 个测量点位,测量间隔为 50 mm,与之相对应的是薄膜厚度的测量位置。使用射频孪生靶

磁控溅射镀膜装置,可以得到靶磁场均匀性和薄膜厚度均匀性的对应关系,如图 3 所示。

从图 3 可以看到,磁场强度和薄膜厚度偏差有一定的对应关系;磁场强的位置所对应的薄膜厚度

相对较厚,磁场弱的位置所对应的薄膜厚度相对较薄。原因在于磁场强的位置,能够束缚更多的电子,电离的氩离子越多所溅射出的靶材原子就越多,薄膜沉积的厚度就越厚。

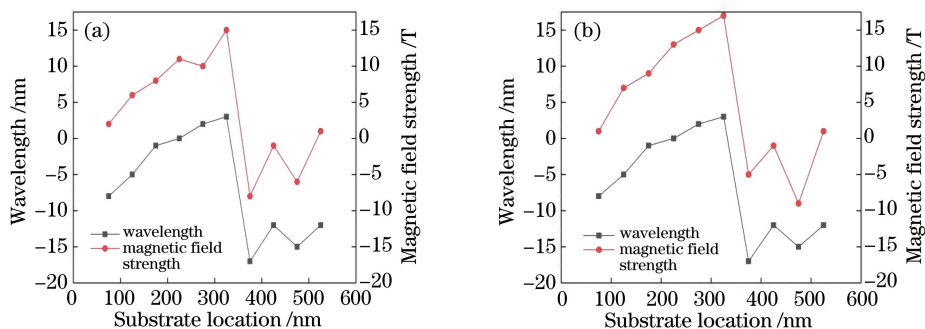


图 3 靶磁场均匀性和薄膜厚度均匀性在不同材料下的对应关系。(a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (b)  $\text{SiO}_2$

Fig. 3 Corresponding relationship between target magnetic field uniformity and film thickness uniformity under different materials. (a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (b)  $\text{SiO}_2$

磁场相对均匀性的计算公式为

$$B_{\text{average}} = (B_i - B_a) / B_a, \quad (2)$$

式中:  $B_i$  为各点的实际磁场强度;  $B_a$  为实际测量所有  $B_i$  的平均值。使用美国安捷伦公司生产型号为 Carry7000 的分光光度计对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  单层膜的光谱进行测量,通过比较波长的偏差来反映薄膜厚度的相对偏差,表达式为

$$\lambda_{\text{average}} = (\lambda_d - \lambda_o) / \lambda_o, \quad (3)$$

式中:  $\lambda_o$  为干涉级次  $K=2$  的参考波长;  $\lambda_d$  为实际测量干涉级次  $K=2$  的波长。

## 2.2 靶基距和气压对薄膜厚度的影响

靶基距是靶材到基板的距离,也是影响磁控溅

射沉积薄膜厚度均匀性的重要工艺参数之一。薄膜厚度的均匀性会在一定范围内随着靶基距的增大有提高的趋势<sup>[14]</sup>,因为增大靶基距是增加靶上一点对应基板上的面积。溅射工作气压也会影响薄膜厚度的均匀性,但是这种膜厚的均匀性并不是呈线性关系,原因在于增加工作气压是增加粒子散射。显然,对于增加靶基距,通过多充入气体来获得更好的膜厚均匀性是不可取的。原因在于靶基距增大,则工作气压增大,分子的平均自由程增大,粒子的能量降低而不能有效地迁移运动,膜层的聚集密度降低,变得疏松多孔,导致折射率降低,不能满足相应的设计需求,两种材料的折射率随靶基距的变化曲线如图 4 所示。

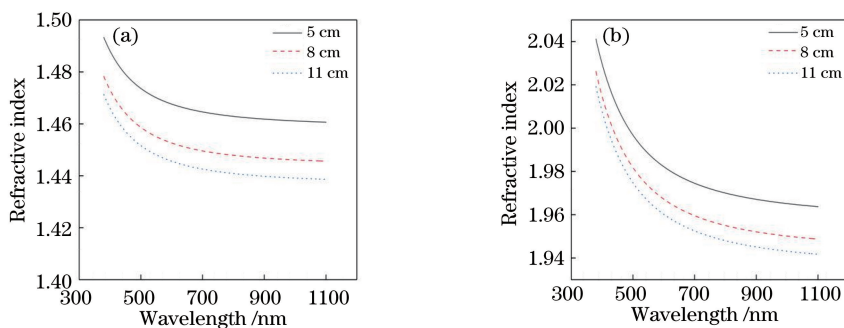


图 4 不同材料的靶基距对折射率的影响曲线。(a)  $\text{SiO}_2$ ; (b)  $\text{Si}_3\text{N}_4$

Fig. 4 Influence curves of target base distance of different materials on refractive index. (a)  $\text{SiO}_2$ ; (b)  $\text{Si}_3\text{N}_4$

实验过程中,使用 Langmuir 探针来测量孪生靶材在溅射过程中等离子体的密度,结果如图 5 所示。从图 5 可以看到,孪生靶材在溅射过程中,等离子体的密度分布不均匀。原因在于送气不均匀,孪生靶磁控溅射机是通过气体流量控制(MFC)计来控制气体流量,并不能通过设定的压强来控制气体

流量,且在充气过程中,铜管末端的气压减小,进而导致 Ar 流量降低;抽气不均匀,在孪生靶磁控溅射机的配置上,分子泵在靶材下端,靶材上端无分子泵抽气,氩气充入腔体还未发生电离,就有一部分气体被分子泵抽走。由 Langmuir 探针测量等离子体的密度也可证实分析结果是正确的。

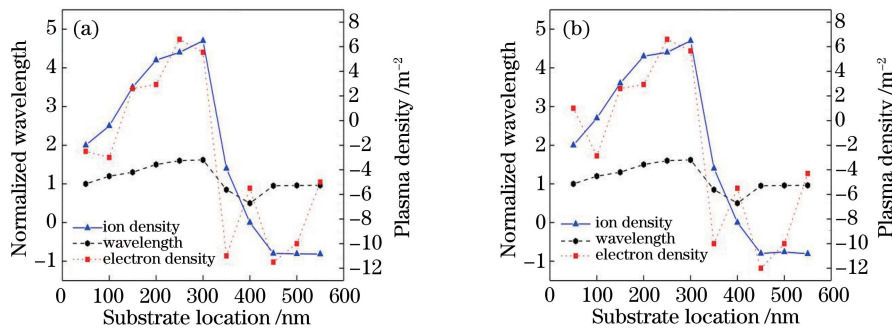


图 5 不同材料的等离子体密度与薄膜厚度的对应关系。(a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (b)  $\text{SiO}_2$

Fig. 5 Relationship between plasma density and film thickness of different materials. (a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (b)  $\text{SiO}_2$

### 3 实验结果

对于孪生靶材磁控溅射沉积薄膜厚度的均匀性,包含横向和纵向的均匀性,并分别对其进行调整,将横向分为上、中和下三个部分进行讨论,如图 6 所示。通过分析靶材与基板的距离、工作气压和磁场强度对磁控溅射沉积膜厚均匀性的影响,尽管靶基距的增大会提高膜厚的均匀性,但是由于粒子的散射,也会造成薄膜的折射率降低<sup>[9]</sup>。

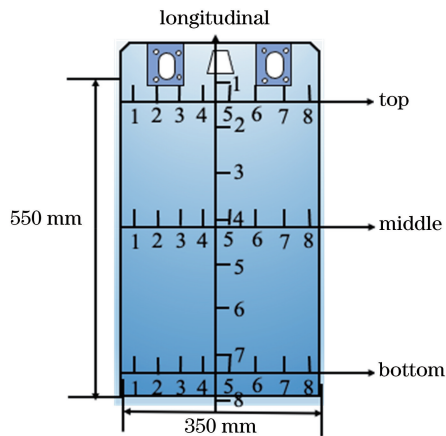


图 6 横向和纵向薄膜厚度的均匀性分布

Fig. 6 Uniformity distribution of transverse and longitudinal film thickness

#### 3.1 薄膜厚度的纵向均匀性

磁场强度和工作气压的本质是影响等离子体的密度,使用 Langmuir 探针来测量靶材的等离子体密度,等离子体的密度分布不均匀会造成薄膜在纵向上的厚度偏差较大,这与之前的实验结果相符。为此,提出二进制梯度充气方式来改变等离子体的密度,将充气方式改为二进制梯度充气方式,可以调整纵向的均匀性。工作流程如图 7 所示,最终确定靶材的充气速率分别为 35, 45, 55, 65 mL/min。两种材料的纵向均匀性如图 8 所示。从图 8 可以看

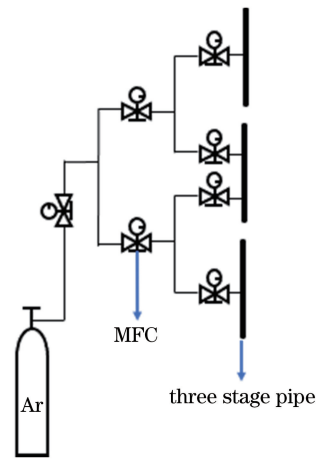


图 7 二进制梯度充气方式

Fig. 7 Binary gradient inflation mode

到,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的纵向均匀性为  $\pm 0.33\%$ ,  $\text{SiO}_2$  的纵向均匀性为  $\pm 0.25\%$ 。

#### 3.2 薄膜厚度横向均匀性

对于薄膜厚度的横向均匀性,主要由于靶材相对于基片的膜厚均匀性呈余弦分布,两种材料膜厚的均匀性均呈余弦半波分布,为此对靶材加载正弦半波电压。公转机构的公转速度为 60 r/min,且由于公转机构是 12 分割,相当于 1 s 内要加载 12 个正弦波,为确保 1 s 内产生的 12 个加载波能够均匀分布在 12 个护板上,通过 MATLAB 模拟正弦半波,表达式为

$$V = A \sin[(ft) + \varphi], \quad (4)$$

式中:  $V$  为电压;  $A$  为振幅;  $f$  为正弦半波电压的频率;  $t$  为时间;  $\varphi$  为相位。首先确定  $f$  值为 12, 使用 MATLAB 软件来模拟不同的振幅和相位,从而导出正弦电压分布情况,不同的振幅和相位对膜厚的影响曲线如图 9 所示。从图 9 可以看到,当振幅为 8 mm 和相位为  $20^\circ$  时,横向的均匀性最好。最终确定的正弦半波电压函数为

$$V = 8 \sin[(12t) + 20]. \quad (5)$$



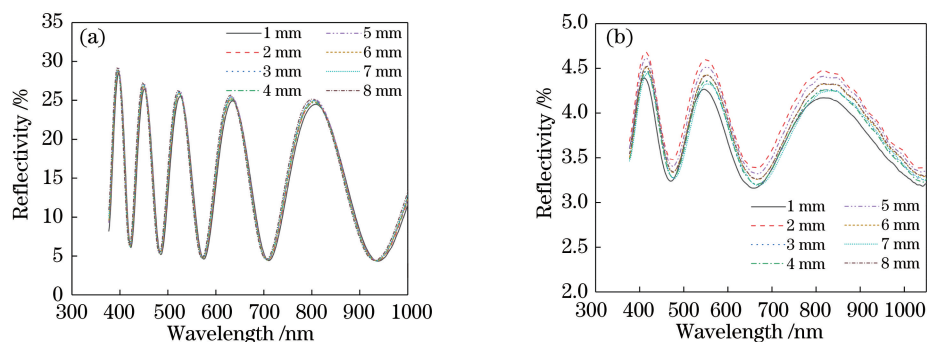


图 8 不同材料的薄膜厚度纵向均匀性曲线。(a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (b)  $\text{SiO}_2$

Fig. 8 Longitudinal uniformity curves of film thickness of different materials. (a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (b)  $\text{SiO}_2$

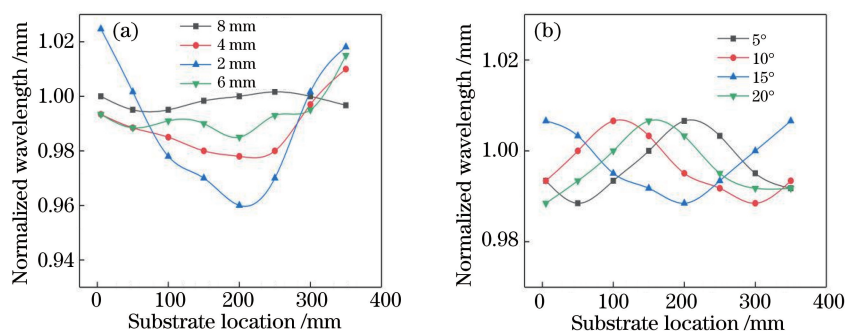


图 9 薄膜厚度均匀性在不同情况下的影响曲线。(a) 振幅; (b) 相位

Fig. 9 Influence curves of film thickness homogeneity under different conditions. (a) Amplitude; (b) phase

加载正弦半波电压后,靶材的电压曲线如图 10 所示。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  两种材料在加载正弦半波电压后,单层膜光谱在横向上的分布曲线如图 11 和 12 所示。膜厚的均匀性结果如表 1 所示。从图 8 和表 1 可以看到,对于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  材料,其在横向上、中和下的均匀性分别为  $\pm 1.27\%$ 、 $\pm 0.62\%$  和  $\pm 1.33\%$ ,纵向的均匀性为  $\pm 0.33\%$ ;对于  $\text{SiO}_2$  材料,其在横向上、中和下的均匀性分别为  $\pm 1.12\%$ 、 $\pm 0.42\%$  和  $\pm 1.23\%$ ,纵向的均匀性  $\pm 0.25\%$ 。

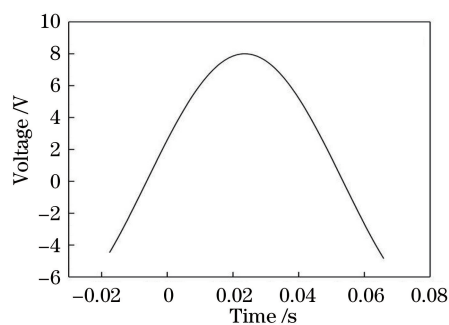


图 10 靶材在加载正弦半波电压后的电压变化曲线

Fig. 10 Voltage change curve of target material after loading sinusoidal half wave voltage

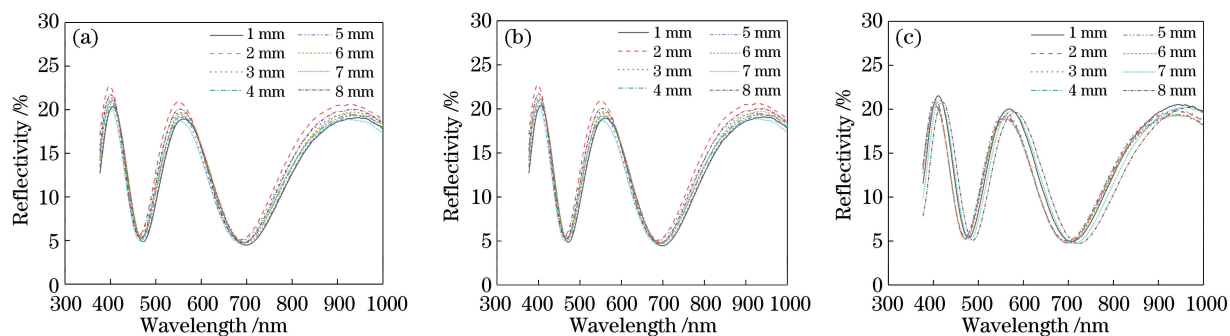


图 11  $\text{Si}_3\text{N}_4$  单层膜光谱的横向分布曲线。(a) 上; (b) 中; (c) 下

Fig. 11 Transverse distribution curves of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  monolayer film spectrum. (a) Top; (b) middle; (c) bottom

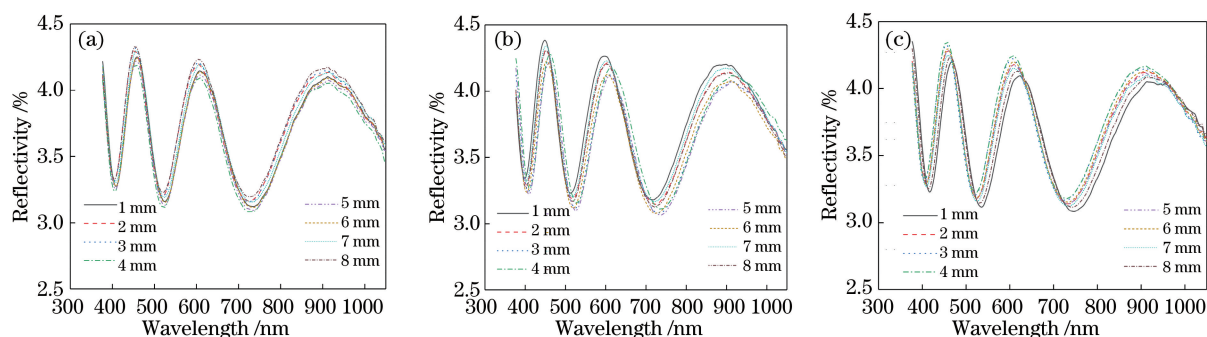
图 12  $\text{SiO}_2$  单层膜光谱的横向分布曲线。(a)上;(b)中;(c)下Fig. 12 Transverse distribution curves of  $\text{SiO}_2$  monolayer film spectrum. (a) Top; (b) middle; (c) bottom

表 1 两种材料的横向均匀性结果

Table 1 Transverse uniformity results of two materials

Material	Transverse uniformity / %		
	Top	Middle	Bottom
$\text{Si}_3\text{N}_4$	$\pm 1.27$	$\pm 0.62$	$\pm 1.33$
$\text{SiO}_2$	$\pm 1.12$	$\pm 0.42$	$\pm 1.23$

### 3.3 大面积基板的纵向和横向均匀性

增透膜广泛应用于手机及数码产品面板、摄像头和平面显示器件。为大面积平面显示设备镀制

增透膜,需要考虑薄膜厚度的横向和纵向均匀性,因为薄膜厚度不均匀,则会给显示设备的表面带来异色,影响观看体验。为此,采用二进制梯度充气方式和加载正弦半波电压分别调整薄膜厚度的横向和纵向均匀性,以  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  为薄膜材料<sup>[15-17]</sup>,在宽度为 320 mm 和长度为 420 mm 的玻璃基板上,制备的硬质增透膜在横向上的均匀性为  $\pm 0.56\%$ ,在纵向上的均匀性为  $\pm 0.15\%$ 。光谱如图 13 所示。

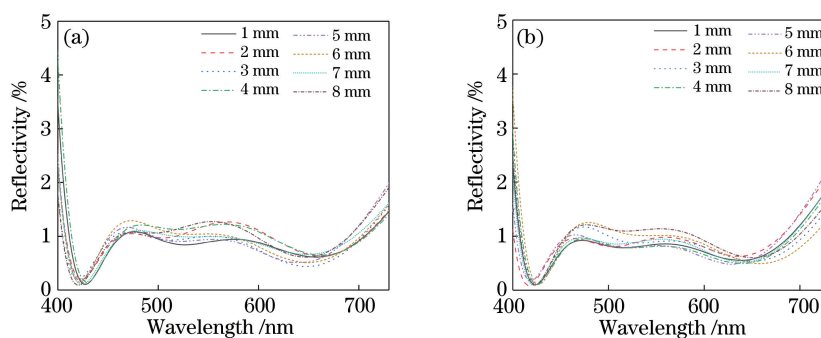


图 13 硬质增透膜在不同方向上的光谱分布曲线。(a)横向;(b)纵向

Fig. 13 Spectral distribution curves of hard antireflection film in different directions. (a) Transversal; (b) longitudinal

## 4 结 论

通过分析靶基距、磁场强度和气体压强对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度均匀性的影响,使用 Langmuir 探针来测量等离子体的密度分布,将充气方式调整为二进制梯度方式以调整纵向的均匀性。针对孪生靶材磁控溅射沉积膜厚的均匀性呈余弦分布,且夹具在旋转过程中,分子的平均自由程呈先增大后减小再增大的趋势,为此对靶材加载正弦半波电压来调整横向的均匀性。对于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  材料,其在横向上、中和下的均匀性分别为  $\pm 1.27\%$ 、 $\pm 0.62\%$  和  $\pm 1.33\%$ ,纵向的均匀性为  $\pm 0.33\%$ ;对于  $\text{SiO}_2$  材料,其在横向上、中和下的均匀性分别为  $\pm 1.12\%$ 、 $\pm 0.42\%$  和  $\pm 1.23\%$ ,纵向的均匀性

$\pm 0.25\%$ 。获得更小的薄膜厚度偏差是下一步研究的重点方向。

## 参 考 文 献

- [1] Motohiro T. Applications of Monte Carlo simulation in the analysis of a sputter-deposition process [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1986, 4(2): 189-195.
- [2] Billard A, Frantz C. Attempted modelling of thickness and chemical heterogeneity in coatings prepared by d.c. reactive magnetron sputtering [J]. Surface and Coatings Technology, 1993, 59(1/2/3): 41-47.
- [3] Fan Q H, Chen X H, Zhang Y. Computer simulation of film thickness distribution in symmetrical magnet

- magnetron sputtering [J]. Vacuum, 1995, 46(3): 229-232.
- [4] Ai W J, Xiong S M. Analysis of film thickness uniformity for large aperture coater of 3.6 m in diameter[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(11): 73-78.  
艾万君, 熊胜明. 3.6 m 大口径镀膜机膜厚均匀性分析[J]. 光电工程, 2011, 38(11): 73-78.
- [5] Guo C, Kong M D, Liu C D, et al. Shadowing masks for thickness uniformity in a plane planetary system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0231002.  
郭春, 孔明东, 柳存定, 等. 平面行星系统修正挡板校正膜厚均匀性[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0231002.
- [6] Shishkov M, Popov D. Thickness uniformity of thin films deposited on a flat substrate by sputtering of a target with rotational symmetry[J]. Vacuum, 1991, 42(15): 1005-1008.
- [7] Mahieu S, Buyle G, Depla D, et al. Monte Carlo simulation of the transport of atoms in DC magnetron sputtering[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2006, 243(2): 313-319.
- [8] Tan X D, Ma Z, Cai B W. Simulating uniformity of film thickness with finite-elements method[J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 480-483.  
谭旭东, 马孜, 蔡邦维. 薄膜均匀性的有限元算法[J]. 激光技术, 2003, 27(5): 480-483.
- [9] Yu H, Wang T, Wu Z M, et al. Influence of rotation-revolution on time evolution of growth uniformity of magnetron sputtered films[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2010, 30(2): 149-153.  
于贺, 王涛, 吴志明, 等. 公-自转磁控溅射镀膜系统薄膜沉积均匀性的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30(2): 149-153.
- [10] Zhu Y D, Fang M, Yi K. Precise control of thickness uniformity in Mo/Si soft X-ray multilayer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1131001.  
朱亚丹, 方明, 易葵. Mo/Si 软 X 射线多层膜中厚度均匀性的精细控制[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1131001.
- [11] Zhang X X, Zhang P F, Zhao J Z, et al. The influence of substrate movement modes on the film thickness uniformity prepared by magnetron sputtering with a rectangle target [J]. Vacuum, 2016, 53(4): 1-5.  
张向秀, 张鹏飞, 赵瑾珠, 等. 基片的运动方式对磁控溅射矩形靶镀膜均匀性的影响[J]. 真空, 2016, 53(4): 1-5.
- [12] Feng S, Fu X H, Wang D S, et al. Study on planarization layer uniformity of large-aperture optical elements based on ion beam sputtering [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 0131002.  
冯时, 付秀华, 王大森, 等. 基于离子束溅射大口径光学元件平坦化层均匀性研究[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0131002.
- [13] Meng X Q, Wang S, Shang H, et al. Distribution of deposition rate by magnetron sputtering from rotating cylindrical target[J]. Vacuum, 2010, 47(3): 16-19.  
孟秀清, 王双, 尚航, 等. 旋转圆柱靶磁控溅射沉积产额分布[J]. 真空, 2010, 47(3): 16-19.
- [14] Dong L J. Research of film uniformity on small circular plane target by magnetron sputtering [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.  
董连俊. 小圆平面靶磁控溅射镀膜均匀性的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [15] Qiao N, Yan F P, Wang W, et al. Dual-band terahertz metamaterial antireflection coating based on multilayered structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614031.  
乔楠, 延凤平, 王伟, 等. 基于层叠结构的双波段太赫兹超材料增透膜设计[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614031.
- [16] Li H J, Zhang Y. Transmission spectrum of multilayer AlGaIn thin film on sapphire substrate[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1931002.  
李浩杰, 张燕. 蓝宝石衬底多层 AlGaIn 薄膜透射谱研究[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1931002.
- [17] Liu D M, Yue P F, Fu X H, et al. Preparation of  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2$  hard antireflection film in visible light band[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 153101.  
刘冬梅, 岳鹏飞, 付秀华, 等. 可见光波段  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2$  硬质增透膜的研制[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 153101.