

文章编号 2095-1531(2016)03-0356-08

离子束溅射制备 GdF_3 光学薄膜 沉积速率分布特性

贺健康*, 张立超, 才玺坤, 时光, 武潇野, 梅林

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

应用光学国家重点实验室 超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要: 本文采用离子束溅射方法制备 GdF_3 薄膜, 并研究其沉积速率分布特征。首先, 采用膜厚仪测量得出 GdF_3 薄膜在行星盘平面的二维沉积速率分布图, 通过拟合模型得到二维沉积速率分布公式。其次, 分析了束流束压及靶材角度对沉积速率分布特征的影响。最后, 以二维沉积速率分布公式为基础, 通过计算机编程设计均匀性挡板, 并进行膜厚均匀性实验验证。结果表明, 沉积速率在水平方向上满足 ECS 函数分布, 在竖直方向上满足标准 Gauss 分布, 拟合公式残差为 2.05×10^{-6} 。改变离子源的束流和束压, 沉积速率分布特征保持不变。而随着靶材角度的增大, Gauss 分布的半峰宽值 ω 逐渐增大, 峰值位置 x_0 逐渐增大, 在 $\theta = 292^\circ$ 时, GdF_3 薄膜的沉积速率最大。通过挡板修调实验, 可将 270 mm 口径平面元件的膜厚均匀性调整为 97.9%。

关键词: 离子束溅射; 光学薄膜; 沉积速率; 二维拟合; 膜厚均匀性

中图分类号: O484.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20160903.0356

Deposition rate distribution of GdF_3 optical coating prepared by ion beam sputtering

HE Jian-kang*, ZHANG Li-chao, CAI Xi-kun, SHI Guang, WU Xiao-ye, MEI Lin

(*Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, State Key
Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics
and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

* *Corresponding author, E-mail: 15656579175@163.com*

Abstract: The deposition rate distribution of single GdF_3 layer deposited by ion beam sputtering (IBS) has been investigated in this paper. First, Two dimension deposition rate distribution of GdF_3 thin films are measured by an UV-film thickness measuring instrument, and the expression of two dimension deposition rate distribution are obtained by using fitting models. Second, the influence of beam current, beam voltage and the angle of target on deposition rate distribution feature is analyzed. Finally, the experiments of thickness uniformity have been carried out using designed mask, based on the expression of two dimension deposition rate. Experimental results indicate that the deposition rate in horizontal direction is satisfied with the ECS function. And in

收稿日期: 2016-01-29; 修订日期: 2016-02-23

基金项目: 国家重大科技专项(02 专项) 基金资助项目 (No. 2009ZX02205)

Supported by National Science and Technology Major Project of China (No. 2009ZX02205)

vertical direction it is satisfied with standard Gauss function. The residual error of fitting expression is 2.05×10^{-6} . The feature of deposition rate distribution remains the same when the beam current and beam voltage are changed. With the increase of the target angle, the value of peak width at half height of Gauss function are increased. The peak position is changing, and the maximum of deposition rate can be reached when the target angle is 292° . The thickness uniformity is adjusted to 97.9% for a plane element with radius of 270 mm by using mask.

Key words: ion beam sputtering; optical coating; deposition rate; two dimension fitting; coating thickness uniformity

1 引言

GdF₃材料由于其优异的光学性能,在深紫外光学薄膜中有广泛应用^[1]。以 193 nm 投影光刻为例,其系统有 30 ~ 40 个光学元件,且部分元件口径高达 400 mm,为使系统高质量成像,不仅要求制备的薄膜具有极高的透过率和良好的抗激光损伤能力,而且对膜厚均匀性控制提出了极高的要求^[2-4]。

离子束溅射 (Ion Beam Sputtering, IBS) 技术是制备高质量光学薄膜的一种重要手段,具有广阔的应用前景,其制备的薄膜具有损耗小、工艺稳定性高、可重复性好、致密度高、抗激光损伤性能好等优点^[5]。在离子束溅射镀膜的过程中,膜厚的均匀性控制是镀制高精度要求的窄带滤光片等薄膜产品的一个关键问题,特别是深紫外薄膜产品^[6]。对于传统热蒸发方法来说,蒸发源是点源,可以建立准确的数学模型计算空间任一点的沉积速率^[7-9],据此可以设计均匀挡板来精确调整薄膜的膜厚均匀性^[10]。而离子束溅射的溅射源是高能离子束发射到靶材表面形成的二次面源,在其上发生一系列复杂的物理化学效应,如溅射原子、二次电子及正负离子发射、吸附杂质解吸和分解、表面刻蚀及物质的化学反应、靶材表面的离子注入、原子的级联碰撞、晶格损伤等^[11]。因此,很难建立有效的理论模型对靶材在空间各点的溅射特性进行计算。目前,国内外关于靶材溅射特性方面进行了很多有价值的研究。Mark Gross 等人研究了离子束溅射沉积的氧化钽薄膜的膜厚分布特性,并凭经验认为其在基底平面的水平方向和竖直方向分别满足 Gaussian 分布和 Skewed

Gaussian 分布^[12]。汤雪飞等人对离子束溅射沉积光学薄膜的沉积速率分布也进行了相关研究^[13]。Akio Fujiwara 认为靶面溅射原子间相互独立,采用有限元法从理论上建立了离子束溅射沉积薄膜的数学模型^[14]。这些研究从不同侧面对离子束溅射靶材的溅射特性进行了分析,而未涉及离子束溅射薄膜沉积速率的具体分布形式。

本文研究了离子束溅射沉积 GdF₃薄膜沉积速率的二维分布特性,并对其进行直接拟合得到二维沉积速率分布公式。在此基础上,分析了离子源束流束压和靶材角度对 GdF₃薄膜沉积速率分布的影响。最后,以拟合得到的二维沉积速率公式为基础,通过计算机程序设计均匀性挡板,并进行实验验证。

2 实验

样品采用美国 VEECO 公司生产的 Spector 型离子束溅射镀膜机镀制,其中溅射源为 16 cm 的射频离子源,辅助源为 12 cm 的射频离子源,实验中只使用溅射源沉积薄膜。本底真空为 1×10^{-5} Pa,离子源工作气体为 Xe 气,NF₃作为辅助气体反应溅射,靶材为金属 Gd 靶(纯度 > 99.9%),样品架采用行星转动结构(以下简称行星盘),实验装置如图 1 所示。实验基片为 400 mm × 400 mm 的普通玻璃和 Si 片。

实验内容分为以下 3 个部分:

(1)沉积速率分布实验。将玻璃基板固定于静止不转动的行星盘平面上,采用单离子束溅射沉积,溅射离子源束流 BI = 225 mA,束压 BU = 900 V,靶材角度 $\theta = 287^\circ$,沉积时间为 1 h。将 400 mm × 400 mm 的玻璃基底划分为 10 mm ×

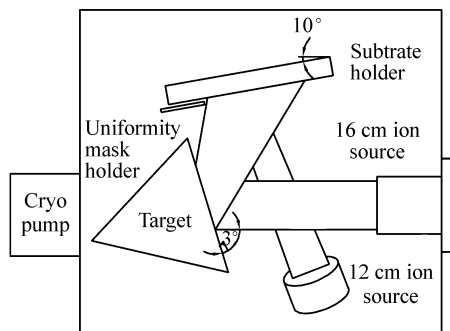


图1 离子束溅射系统装置图

Fig. 1 Block diagram of ion beam sputtering system

10 mm网格,采用 FILMETRICS 公司生产的 F20-UV 型膜厚测量仪测量每个网格点沉积薄膜的膜厚,进而可得玻璃基板上沉积薄膜的二维沉积速率分布图。

(2) 工艺相关性实验。在保持真空度、气体流量等实验条件不变的情况下,通过改变溅射源的束流(150 ~ 275 mA)、束压(500 ~ 1 200 V)以及靶材角度(280° ~ 296°),测量这些条件下的沉积速率分布。

(3) 均匀性挡板实验。实验保持行星盘转动,将 Si 片沿径向贴于 270 mm 口径的行星盘平面上。将挡板竖直置于行星盘平面底部,挡板平面紧贴行星盘平面。实验中,离子源束流为 BI = 225 mA,束压为 BU = 900 V,靶材角度为 $\theta = 287^\circ$,薄膜沉积时间为 30 min,采用膜厚仪测量其膜厚分布。

3 结果与分析

3.1 沉积速率分布

玻璃基板上沉积 GdF₃ 薄膜的二维沉积速率分布如图 2 所示,其中 X 方向为行星盘平面的水平方向(与溅射离子源发射离子的方向一致),Y 方向为行星盘平面的竖直方向。从图中可以看出,行星盘平面上的沉积速率呈现明显的不均匀性,中心点附近的沉积速率高达 0.7 nm/s,而靠近边缘的沉积速率明显减少,个别区域甚至低于 0.2 nm/s。通常情况下,在离子束溅射靶材原子沉积到基板平面的过程中,若靶材表面绝对光滑,质量分布绝对均匀,溅射过程不改变靶面结构时,

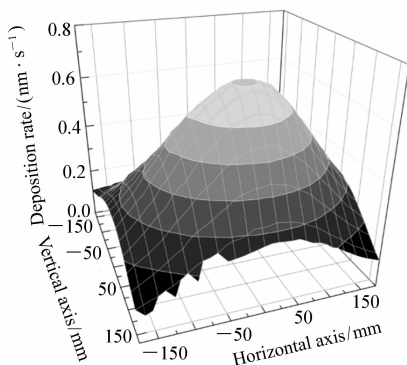


图2 行星盘平面沉积速率分布图

Fig. 2 Deposition rate distribution diagram of planetary plane

靶材表面的溅射原子通量分布满足余弦角分布^[15]。此时,溅射原子沉积在基板表面形成的沉积速率分布,满足随机变量的 Gauss 分布特征。而实际上,离子束的入射角、离子能量、靶材种类及结构、靶面温度、基板与靶面夹角、工艺气体种类和气体工作压强等工艺参数都会影响溅射原子(即沉积速率)的分布。因此,在实际应用过程中,沉积速率的分布会与标准余弦角分布有一定偏差。根据统计理论中的中心极限定理可知^[16],当独立随机变量的个数 n 趋于无穷大时,随机变量的分布接近于正态分布;当 n 不十分大时,Charlier 证明,随机变量的分布函数可用正态分布函数和它的各阶导数的级数(又称为 Hermite 多项式)形式来表示^[17],即:

$$f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i \alpha_i(x) =$$

$$c_0 \alpha_0(x) + c_1 \alpha_1(x) + \dots, \quad (1)$$

式中, c_i 是常数, $\alpha_0(x)$ 是标准化后的标准正态分布函数,即:

$$\alpha_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}, \quad (2)$$

$\alpha_i(x)$ 是该正态分布函数的第 i 阶导数,即:

$$\alpha_i(x) = \frac{d^i}{dx^i} \alpha_0(x) = H_i(x) \alpha_0(x), \quad (3)$$

称 $H_i(x)$ 为第 i 阶 Hermite 多项式。

在实际离子束溅射沉积薄膜时,若将影响沉积速率分布的这些因子看作是 n 个独立随机变量,则 n 的值是有限的,因此,离子束溅射沉积薄膜的沉积速率分布可以用正态分布函数的级数展

开式来表示。

进一步分析图 2 中的实验数据,当 X (或 Y) 取定值时,可得一系列 Y 方向 (或 X 方向) 的一维沉积速率分布曲线。利用 Gauss 分布函数的 Hermite 级数展开式,采用 Origin 软件对这些曲线进行拟合。图 3(a) 为 $Y=0$ 时沿 X 方向的速率分布和 $X=0$ 时沿 Y 方向的速率分布图及采用 Gauss 函数的 Hermite 级数展开式拟合的结果。图 3(b) 为 $Y=65$ 时沿 X 方向的速率分布和 $X=65$ 时沿 Y 方向的速率分布图及采用 Gauss 函数的 Hermite 级数展开式拟合的结果。

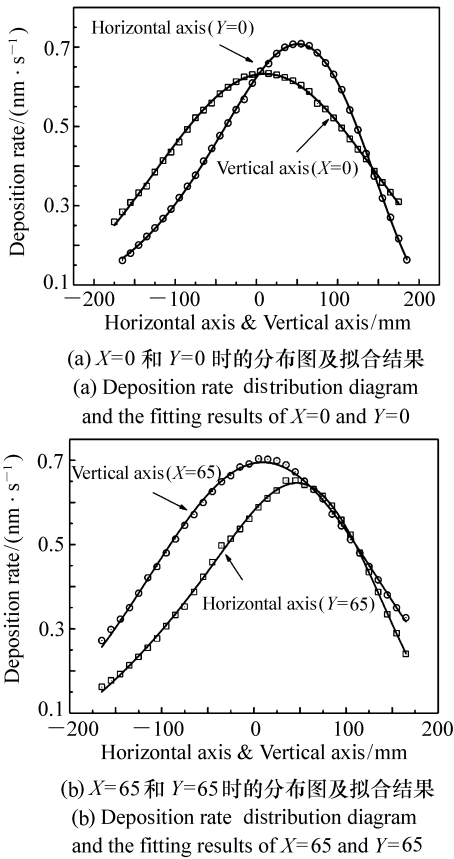


图 3 不同 X 和 Y 值的沉积速率分布图及拟合结果
Fig. 3 Deposition rate distribution diagram and the fitting results with different values of X and Y

从图中可以看出,采用 Gauss 函数的 Hermite 级数展开式可对不同 X 和 Y 值的沉积速率分布曲线进行很好的拟合。对比不同位置沉积速率曲线的拟合结果及采用不同阶数函数的拟合残差可得,所有 X 方向的曲线满足 ECS 函数分布,而所有 Y 方向的曲线均满足标准 Gauss 分布。从图 2 也可以看出,基板平面上沉积速率的最大值点在水平方向上偏离坐标系中心,而在垂直方向上未发生偏离。这说明在离子束溅射沉积薄膜的过程中,沉积速率分布偏离标准正态分布主要体现在 X 方向。

进一步研究二维沉积速率分布的具体表达形式,采用标准 Gauss 函数,分别对所有分立的 Y 方向的一维沉积速率曲线进行拟合,然后整理所有 Gauss 函数的拟合参数 A 、 ω 和 y_c ,发现 A 随 X 值的变化关系与 ECS 函数相吻合,而 ω 随 X 的函数关系呈非线性变化, y_c 为常数。因此,采用 ECS 函数对 A 值进行拟合得到 $A(x)$,采用 4 次多项式对 ω 值进行拟合得到 $\omega(x)$,拟合结果良好,拟合参数如表 1 所示。这样,就得到了二维沉积速率分布关系式,如下:

$$\text{Depositionrate}(x, y) =$$

$$\frac{A(x)}{\omega(x)\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp \left[-2 \left(\frac{y - y_c}{\omega(x)} \right)^2 \right], \quad (4)$$

$$A(x) = \frac{A}{\omega \times \sqrt{2\pi}} e^{-0.5z^2} (1 + H_3 + H_4 + H_6), \quad (5)$$

$$\omega(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4, \quad (6)$$

$$H_3 = \frac{a_3}{3!} z(z^2 - 3), \quad (7)$$

$$H_4 = \frac{a_4}{4!} (z^4 - 6z^2 + 3), \quad (8)$$

$$H_6 = \frac{10a_6^2}{6!} (z^6 - 15z^4 + 45z^2 - 15). \quad (9)$$

$$z = \frac{x - x_c}{\omega}. \quad (10)$$

表 1 沉积速率分布公式拟合参数

Tab. 1 Parameters of fitting expression for deposition rate

$A(x)$	x_c	A	ω	a_3	a_4
	268.137	411 977.62	172.314	-2.524 5	3.841 9
$\omega(x)$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
	277.133	-0.503 05	9.24×10^{-4}	-3.507×10^{-7}	3.498×10^{-8}

为验证二维沉积速率分布公式的有效性,将采用拟合公式的计算结果与实验数据相减,得到二维沉积速率分布公式的拟合残差图,如图4。对拟合残差的定义,可以表示为^[16]:

$$\text{Residual} = \frac{1}{n} \sum_{x,j} | f(x_i, y_j) - z(x_i, y_j) |^2, \quad (11)$$

式中, $f(x_i, y_j)$ 为拟合函数, $z(x_i, y_j)$ 为实验结果, n 表示参与拟合的数据点个数。计算可得,二维沉积速率拟合公式的残差低至 2.05×10^{-6} 。因此,可以用该公式来表示离子束溅射沉积薄膜的二维沉积速率分布。该公式可以帮助我们进一步了解离子源的溅射机理以及靶材的溅射特性,为均匀性挡板的设计提供理论支持。

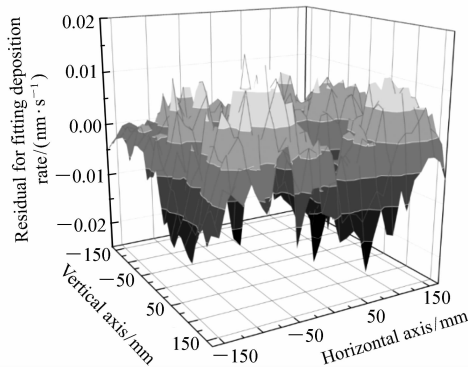


图4 二维沉积速率拟合公式的计算结果与实验数据的残差图

Fig. 4 Residual error between calculation and experiment results of fitting expression for two dimension deposition rate

3.2 束流束压对沉积速率分布的影响

在此基础上,分析了离子源参数对沉积速率分布的影响。束流(BI)和束压(BU)是离子源的主要参数,决定离子源发射离子流能量的大小。束压越大,发射到靶材表面的离子能量越大,束流越大,发射到靶材表面的离子流密度越大。这样,沉积到基底的溅射原子就会变多,即沉积速率变大。图6为 $Y=0$ 时,不同束流作用下的沉积速率沿 X 方向的分布曲线。由图可知,随着离子束束流的增大,沉积速率增大,且沉积速率分布均满足变形高斯分布特征。

对图6中的曲线相对其各自的峰值点做归一化处理,可得水平方向下的相对沉积速率分布结

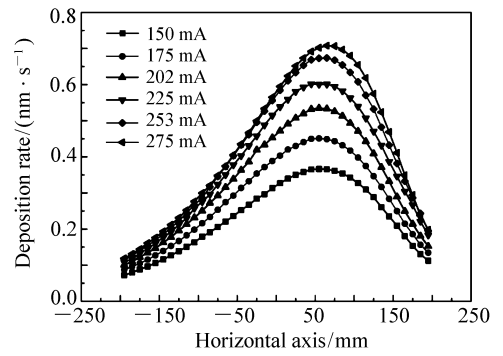


图5 不同束流作用时沉积速率沿水平方向($Y=0$)的分布图

Fig. 5 Deposition rate distribution along horizontal axis ($Y=0$) in different beam current

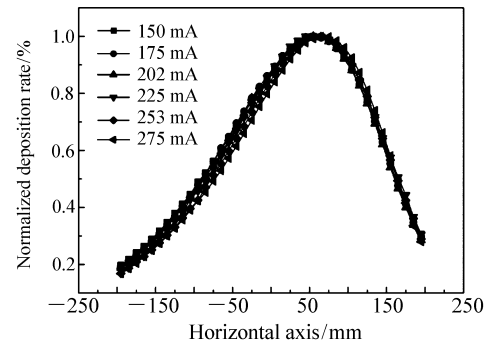


图6 不同束流作用时沉积速率沿水平方向($Y=0$)的归一化分布图

Fig. 6 Normalized deposition rate distribution along horizontal axis ($Y=0$) in different beam current

果,如图7所示。归一化后,所有曲线基本重合,这说明离子源束流的改变只改变水平方向下沉积速率的绝对值,而不改变沉积速率的相对分布。

图7和图8分别是不同束流作用时沉积速率沿垂直方向的分布图以及归一化沉积速率分布图。由图中可知,离子源束流的改变只改变垂直方向下沉积速率的绝对值,而不改变沉积速率的相对分布。同理,测量不同离子源束压作用下的沉积速率分布结果,可得同样的结论。

由此可知,束流束压的改变不会影响沉积速率的分布特征,因此,可以将膜厚均匀性修调与离子源参数调整分离,这对薄膜工艺的开发及均匀性调整均有重要意义。

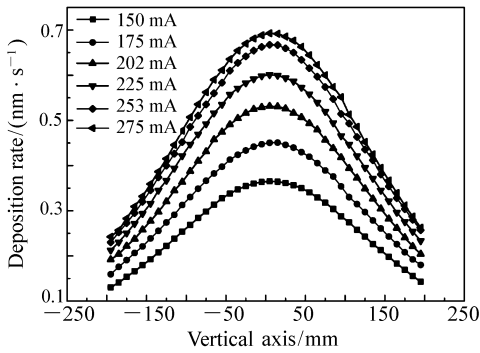


图7 不同束流作用时沉积速率沿竖直方向($X=0$)的分布图

Fig. 7 Deposition rate distribution along vertical axis ($X=0$) in different beam current

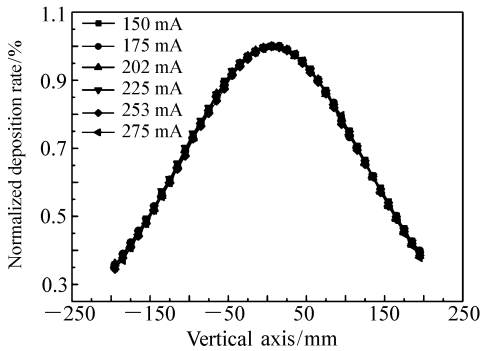


图8 不同束流作用时沉积速率沿竖直方向($X=0$)时的归一化分布图

Fig. 8 Normalized deposition rate distribution along vertical axis ($X=0$) in different beam current

3.3 靶材角度对沉积速率分布的影响

同时我们分析了靶材角度对沉积速率分布的影响,靶材角度是离子束溅射镀膜过程中另一个关键参数,靶材角度主要影响离子束的入射角、溅射角以及溅射原子的能量,进而影响沉积速率的分布及大小。

图9是水平方向下沉积速率与靶材角度的关系图。从图中可以看出,不同靶材角度下, GdF_3 材料在行星盘平面上的沉积速率分布沿着水平方向满足ECS函数分布特征,随着靶材角度的增大,高斯分布的半峰宽 ω 值逐渐增大,峰值沉积速率逐渐增大,且位置逐渐右移。在远靶材端的沉积速率保持不变,而在近靶材端,沉积速率逐渐增大。图10是峰值沉积速率与靶材角度的关系

图。从图中可知,峰值沉积速率随着靶材角度的增大而增大,在 $\theta=292^\circ$ 时, GdF_3 薄膜的沉积速率最大,此后,沉积速率逐渐减小。由此可见,靶材角度会严重影响沉积速率分布特征。

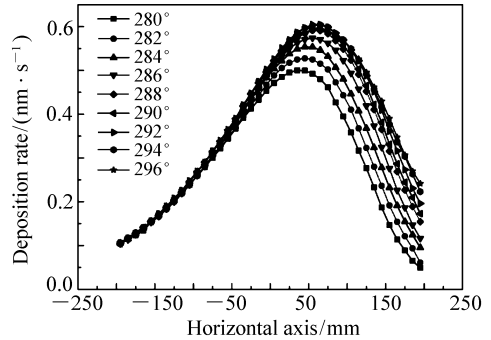


图9 靶材角度与水平方向($Y=0$)沉积速率分布的关系图

Fig. 9 Deposition rate distribution along horizontal axis with the target angle

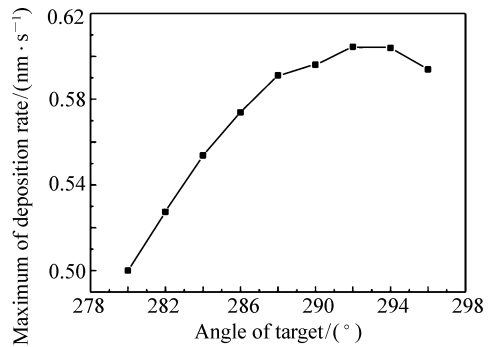


图10 靶材角度与最大沉积速率的关系图

Fig. 10 Maximum deposition rate with the target angle

3.4 挡板均匀性实验

以拟合得到的二维沉积速率分布公式为基础,采用Virtual Basic程序语言设计编写了平面均匀性挡板程序,计算得到膜厚均匀性挡板。以行星盘中心点处的膜厚值为基准进行归一化,可得沿径向的归一化膜厚分布图,如图11所示。图中3条曲线分布表示实验测得的不加挡板时的自然膜厚分布(方块)、程序计算得到的不加挡板时的膜厚分布(圆点)和加挡板修调后的膜厚分布(三角)。从图中可以看出,在径向270 mm范围内,平面元件的自然膜厚均匀性为93.9%,程序计算结果与实验结果基本一致。加挡板修调后

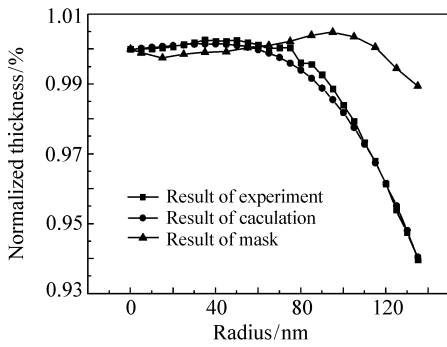


图 11 计算挡板的膜厚均匀性调整结果

Fig. 11 Result for thickness uniformity of calculation mask

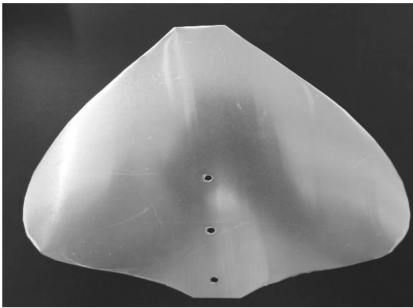


图 12 均匀性挡板实物图

Fig. 12 True picture of uniformity mask

(如图 12 所示),膜厚均匀性变为 97.9%,不均匀

性显著改善。

4 结 论

采用离子束溅射方法沉积单层 GdF_3 薄膜,研究了薄膜在行星盘平面的二维沉积速率分布特性,以及离子源束流束压和靶材角度对薄膜沉积速率分布特性的影响,并设计挡板进行均匀性验证实验。结果表明, GdF_3 在行星盘平面上的沉积速率分布与标准 Gauss 分布有一定差异。采用 Gauss 函数的 Hermite 级数展开式可以对水平方向和竖直方向的沉积速率分布进行最佳拟合,其在水平方向满足 ECS 函数分布,而在竖直方向满足标准 Gauss 分布,并据此得出了 GdF_3 薄膜二维沉积速率分布公式,拟合残差为 2.05×10^{-6} 。离子源束流和束压的变化只改变沉积速率绝对值的大小,并不会改变沉积速率的分布特征。而靶材角度对沉积速率在水平方向的分布特征有明显影响,靶材角度为 $\theta = 292^\circ$ 时,薄膜沉积速率最大。加挡板修调后,270 mm 口径平面元件的膜厚均匀性从 93.9% 调整为 97.9%,不均匀性显著改善。今后我们将进一步研究沉积速率的空间分布特征,建立三维沉积速率分布公式,直接计算复杂曲面元件的膜厚均匀性挡板。

参考文献:

- [1] 薛春荣,范正修,邵建达.真空紫外光学薄膜及薄膜材料[J].激光与光电子学进展,2008,45(1):57-64.
XUE CH R,FAN ZH X,SHAO J D. Vacuum ultraviolet optical coatings and film materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2008,45(1):57-64. (in Chinese)
- [2] 张立超,才玺坤,时光.深紫外光刻光学薄膜[J].中国光学,2015,8(2):.
ZHANG L CH,CAI X K,SHI G. Optical coating for DUV lithography[J]. *Chinese Optics*,2015,8(2):. (in Chinese)
- [3] 张立超,高劲松.长春光机所深紫外光学薄膜技术研究进展[J].光学精密工程,2012,20(11):2395-2401.
ZHANG L CH,GAO J S. Developments of DUV coating technologies in CIOMP[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(11):2395-2401. (in Chinese)
- [4] 才玺坤,张立超,梅林,等.热蒸发和离子束溅射制备 LaF_3 薄膜的光学特性[J].中国光学,2014,.
CAI X K,ZHANG L CH,MEI L, et al. . Optical properties of LaF_3 thin films prepared by thermalevaporation and ion beam sputtering[J]. *Chinese Optics*,2014,.
- [5] DETLEV R. Ion beam sputter coating for laser technology[J]. *SPIE*,2005,5963:1-12.
- [6] SVETLANA D,MARK G,ANATOLI C. Ultra-low-reflectance, high-uniformity, multilayer-antireflection coatings on large substrates deposited using a ion-beam sputtering system with a customized planetary rotation stage[J]. *SPIE*,2011,8168:1-8

- [7] 唐晋法,顾培夫,刘旭,等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 董磊,赵元安,易葵,等. 不同类型蒸发源对平面夹具薄膜均匀性的影响[J]. 强激光与粒子束,2005,17(10):1515-1522.
DONG L, ZHAO Y A, YI K, *et al.*. Influence of different kinds of evaporation sources on films uniformity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1515-1522. (in Chinese)
- [9] 潘栋梁,熊胜明,张云洞,等. 行星夹具膜厚均匀性计算[J]. 强激光与粒子束,2000,12(3):277-280.
PAN D L, XIONG SH M, ZHANG Y D, *et al.*. Film uniformity calculation of large caliber coating machine[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(3): 277-280. (in Chinese)
- [10] 张立超,高劲松. 基于遮挡矩阵的膜厚修正挡板的设计[J]. 光学精密工程,2013,21(11):2757-2763.
ZHANG L CH, GAO J S. Design of uniformity correction masks based on shadow matrix[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 3676: 724-734. (in Chinese)
- [11] 张以忱,等. 真空镀膜技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
ZHANG Y SH, *et al.*. *Vacuum Coating Technology*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [12] GROSS M, DLIGATCH S, CHTANOV A. Optimization of coating uniformity in an ion beam sputtering system using a modified planetary rotation method[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(9): C316-C320.
- [13] 汤雪飞,范修正,王之江. 离子束溅射沉积光学薄膜速率分布[J]. 中国激光,1992, A20(5):345-348.
TANG X F, FAN ZH X, WANG ZH J. Optical coating deposition rate distribution by ion beam sputtering[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, A20(5): 345-348. (in Chinese)
- [14] AKIO F. Calculation of thickness distribution for ion beam sputter deposition[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, A 9(1): 141.
- [15] 刘金声. 离子束沉积薄膜技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
LIU J SH. *Ion Beam Deposition Film Technology and Application*[M]. Beijing: National Defence of Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [16] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2005.
SHENG ZH, XIE SH Q, PAN CH Y, *et al.*. *Probability Theory & Mathematical Statistics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. (in Chinese)
- [17] 邹斯勤,靖大为. 累计量算法原理及应用[J]. 华北电力技术,1985.
ZOU S Q, JING D W. Cumulant algorithm principle and application[J]. *North China Electric Power*, 1985, 3(3): 1-12 (in Chinese)

作者简介:



贺健康(1989—),男,陕西榆林人,硕士,研究实习员,2014年于西北工业大学获硕士学位,主要从事深紫外光学薄膜方面的研究。E-mail:15656579175@163.com