

平面行星系统修正挡板校正膜厚均匀性

郭 春^{1,2} 孔明东¹ 柳存定¹ 李斌成¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 分别建立了真空镀膜机行星系统中平面光学元件薄膜厚度模型和修正挡板校正薄膜厚度非均匀性模型,并运用数值计算方法完成修正挡板优化设计;研究了使用修正挡板校正薄膜厚度分布时平面行星夹具上热蒸发薄膜材料的沉积效率。实验结果表明:依据修正挡板校正薄膜厚度非均匀性模型优化设计的修正挡板能使口径为 310 mm、无倾斜放置的平面行星夹具上,由电子束热蒸发工艺制备的 MgF₂ 薄膜厚度均匀性优于 99.6%,并且热蒸发 MgF₂ 薄膜材料的沉积效率高于 87.4%。

关键词 薄膜;光学镀膜;厚度均匀性;修正挡板;行星系统

中图分类号 O484.41 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0231002

Shadowing Masks for Thickness Uniformity in a Plane Planetary System

Guo Chun^{1,2} Kong Mingdong¹ Liu Cunding¹ Li Bincheng¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In a deposition system containing a planar planetary substrate holder, models for film thickness distribution without and with shadowing mask are developed. The shadowing mask optimized by numerical computation method is applied to achieve good thickness uniformity, while the deposition efficiency of the evaporated material is taken into consideration in the optimization. Experimentally, the theoretically designed shadowing mask is used to control the thickness distribution of the MgF₂ coatings deposited by electron beam evaporation on a flat substrate with a planar planetary system. Uniformity measurements based on the reflection spectra of single layer MgF₂ films demonstrate that uniformities is better than 99.6%, while the deposition efficiency of the evaporated material is higher than 87.4%.

Key words thin films; optical coating; thickness uniformity; shadowing mask; planetary system

OCIS codes 310.1620; 310.1860; 310.6860

1 引 言

随着光学技术的发展,光学系统设计日益精密和复杂。为满足系统性能指标,光学系统中使用的平面光学元件口径越来越大。通常需要在平面光学元件表面镀制光学薄膜,提高平面光学元件光谱性能来满足系统需求。一般在不采取薄膜厚度分布控制的情况下,膜料沉积在平面光学元件上形成的薄

膜厚度为非均匀分布^[1~4]。这种非均匀薄膜厚度分布不仅导致平面光学薄膜元件光谱波前变差,而且影响光学系统的透过率和透射光均匀性。因此,必须严格控制平面光学元件薄膜厚度分布。

传统的平面光学元件上未使用修正挡板时的薄膜厚度分布模型是基于 Knudsen 法则,主要考虑薄膜材料蒸发特性和真空镀膜机配置对薄膜厚度分布

收稿日期: 2012-09-04; 收到修改稿日期: 2012-10-03

作者简介: 郭 春(1986—),男,博士研究生,主要从事真空紫外光学薄膜制备和性能检测等方面的研究。

E-mail: guochunyouxiang@126.com

导师简介: 李斌成(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事光热技术和光学薄膜技术等方面的研究。

E-mail: bcli@ioe.ac.cn(通信联系人)

的影响,运用蒸发源与平面光学元件间几何关系计算光学元件的薄膜厚度分布^[5~7]。1999年, Villa等^[8]提出用坐标形式刻画平面光学元件上未使用修正挡板时薄膜厚度分布模型,结合矢量运算,使得薄膜厚度分布计算更直观、简便。

目前,控制真空镀膜机行星系统中平面光学元件的薄膜厚度分布主要采用位置固定或者运动的修正挡板技术^[1~4,9]。尽管单轴陀螺旋转系统和适用于离子束溅射镀膜工艺的双驱动行星旋转系统在不使用修正挡板的情况下都可能实现大尺寸平面光学元件薄膜厚度分布的控制^[10,11],但是当采用单轴陀螺旋转系统制备光学薄膜元件时,必须考虑由平面光学元件大幅度摆动引起的膜料沉积角增大对光学薄膜性能的影响,以及光学元件夹具设计等问题;而双驱动行星旋转系统仅在溅射源尺寸足够大时可能不需要修正挡板控制薄膜厚度分布。总之,目前用于大尺寸平面光学薄膜元件制备的夹具系统首选依然是传统的行星旋转系统。但是,由于真空镀膜机中行星系统公转、自转的灵活调节,放置在真空镀膜机行星夹具上的平面光学元件具有很好的位置随机性,导致修正挡板设计很难有解析解。传统的修正挡板设计主要凭借镀膜经验,通过大量工艺实验来优化修正挡板设计实现平面光学元件的薄膜厚度分布控制。

本文分别建立了未使用和使用修正挡板时真空镀膜机行星系统中平面光学元件薄膜厚度分布模型,采用数值计算方法完成修正挡板优化设计,并研究了使用修正挡板后被蒸发薄膜材料的沉积效率。通过平面行星夹具上电子束热蒸发工艺制备的MgF₂薄膜厚度均匀性实验,证实了薄膜厚度模型的可靠性以及数值计算方法设计修正挡板校正薄膜厚度非均匀性效果。

2 理论分析

2.1 平面行星系统

根据 Knudsen 定律^[1, 8],对于小平面蒸发源,在未使用修正挡板时真空镀膜机行星系统中平面光学

元件运动到任意位置,其上坐标点 (x_1, y_1, z_1) 沉积的薄膜物理厚度可以表述为

$$d = \frac{A \cos \varphi \cos^j \theta}{\pi \mu r_2^2} \quad (1)$$

式中 A 和 μ 分别为被蒸发薄膜材料质量和密度; φ 为光学元件上坐标点 $P(x_1, y_1, z_1)$ 处的单位法线 \mathbf{p} 与矢量 \mathbf{r}_2 间的夹角,如图 1 所示。也是被蒸发薄膜材料在坐标点 $P(x_1, y_1, z_1)$ 的沉积角; 矢量 \mathbf{r}_2 为光学元件上坐标点 $P(x_1, y_1, z_1)$ 和蒸发源上坐标点 $S(x, y, z)$ 的连线; θ 为蒸发源坐标点 $S(x, y, z)$ 处的单位法线 \mathbf{s} 与矢量 \mathbf{r}_2 间的夹角; j 是用于描述热蒸发源蒸气分布的参数,该参数由理论薄膜厚度分布与实验测量结果拟合确定; r_2 为膜料沉积点 $P(x_1, y_1, z_1)$ 与蒸发源上 $S(x, y, z)$ 点之间的距离,即 $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|$ 。

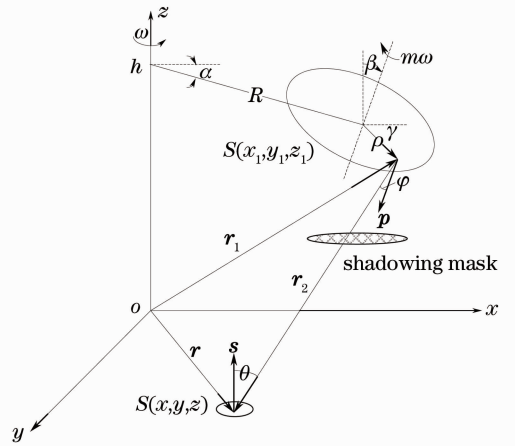


图 1 蒸发源-光学元件系统示意图

Fig. 1 Diagram of evaporator source-optical device system

采用矢量运算, (1)式可改写为

$$d(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \frac{A}{\pi \mu} \frac{u(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) v^j(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|^{j+3}} \quad (2)$$

定义 $v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \mathbf{s} \cdot (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r})$ 为蒸发源函数, $u(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \mathbf{p} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)$ 为平面光学元件函数。采用坐标形式表述蒸发源函数和平面光学元件函数,将简化(2)式的计算。对于常见的蒸发源配置, Villa等^[8]已做全面的报道。这里假定小尺寸平面蒸发源放置于 (x, y, z) 点,倾斜放置的行星夹具上的平面光学元件上坐标点 (x_1, y_1, z_1) 的运动轨迹可以描述为

$$\begin{cases} x_1 = R \cos \alpha + \rho \cos \beta \cos \alpha \cos[(m+1)\alpha + \gamma] + \rho \sin \alpha \sin[(m+1)\alpha + \gamma] \\ y_1 = R \sin \alpha + \rho \cos \beta \sin \alpha \cos[(m+1)\alpha + \gamma] - \rho \cos \alpha \sin[(m+1)\alpha + \gamma], \\ z_1 = h + \rho \sin \beta \cos[(m+1)\alpha + \gamma] \end{cases} \quad (3)$$

式中 R 为平面行星夹具的公转半径; α 为平面行星夹具公转角度; β 为平面行星夹具的倾斜角度; ρ 和 γ 分别为平面光学元件上坐标点 (x_1, y_1, z_1) 沿光学元件表面的径向坐标和角坐标; m 为平面行星旋转系统的公转

与自转轮齿比； h 为平面行星夹具中心和蒸发源沿 z 轴方向的高度差。那么，平面光学元件函数、蒸发源函数以及平面光学元件上 (x_1, y_1, z_1) 点与蒸发源 (x, y, z) 的距离可以分别表示为

$$\begin{cases} u(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = (x - x_1) \sin \beta \cos \alpha + (y - y_1) \sin \beta \sin \alpha - (z - z_1) \cos \beta \\ v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = z_1 \\ |\mathbf{r} - \mathbf{r}_1| = [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2]^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

给定真空镀膜机配置， (x, y, z) 、 R 、 β 、 h 和 m 均是已知参数，一旦确定热蒸发特性参数 j ，按(2)~(4)式可计算平面光学元件在真空镀膜室内运动到任意位置处沉积的薄膜厚度。通常，做行星运动的平面光学元件其上任意一点的轨迹多为摆线^[2]，为理论计算整个真空镀膜过程中平面光学元件上径向半径 ρ 、角坐标 γ 点累积沉积薄膜的厚度，只需对行星系统公转角度 α 做积分即可，可表示为

$$d[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma)] = \int_0^B d[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)] d\alpha, \quad (5)$$

式中 B 为真空镀膜过程中行星系统公转总角度。

2.2 挡板优化设计

在真空镀膜过程中，修正挡板校正平面光学元件的薄膜厚度分布模型可以描述为

$$\int_0^B d[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)] M[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)] d\alpha = d_0, \quad (6)$$

式中 $M[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)]$ 为修正挡板遮挡函数，其值由蒸发源-修正挡板-光学元件三者间的位置关系确定。定义：在真空镀膜过程中，平面光学元件上 (x_1, y_1, z_1) 点运动到任意位置，当修正挡板遮挡被蒸发薄膜材料，使其不能沉积到光学元件上 (x_1, y_1, z_1) 点时，如图 1 所示， $M[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)]$ 取 0；当修正挡板对被蒸发薄膜材料无遮挡时， $M[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)]$ 取 1； d_0 为一个厚度常数。由于平面光学元件做行星运动，整个镀膜过程中蒸发源-修正挡板-光学元件三者间的位置关系非常复杂， $M[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)]$ 非恒定值。为理论分析整个镀膜过程中修正挡板对光学元件上薄膜厚度的控制，可通过数值方法实现。按(2)~(4)式计算平面光学元件上 (x_1, y_1, z_1) 点的运动轨迹上各点沉积的薄膜厚度，并判断对应轨迹上各点处 $M[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)]$ 的取值，随后两者相乘并求和，即获得使用修正挡板后整个镀膜过程中光学元件上 (x_1, y_1, z_1) 点累积薄膜厚度。最后使用数值算法优化修正挡板设计，使得修正挡板校正后平面光学元件上薄膜厚度具有均匀分布。

2.3 薄膜材料沉积效率

定义薄膜材料沉积效率为使用修正挡板校正后

平面光学元件的薄膜厚度与未使用修正挡板校正的薄膜厚度比值，表示为

$$\eta = \frac{\int_0^B d[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)] M[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)] d\alpha}{\int_0^B d[\mathbf{r}, \mathbf{r}_1(\rho, \gamma, \alpha)] d\alpha} \quad (7)$$

很明显，沉积效率越高，修正挡板对薄膜材料的蒸发束流的影响越小。

3 结果与讨论

实验采用电子束热蒸发技术制备 MgF_2 单层薄膜，薄膜沉积时镀膜室的真空度高于 3.5×10^{-4} Pa，基底温度为 250°C ， MgF_2 薄膜的沉积速率和厚度均由石英晶振片监控，分别取为 0.2 nm/s 和 200 nm 。薄膜原材料采用 Merck 公司的氟化镁颗粒。 MgF_2 薄膜制备前，8 片硅基底（直径 25.4 mm ，厚度 2 mm ，原子力显微镜测得均方根表面粗糙度为 0.5 nm ）采用酒精与乙醚的混合液清洗。硅基底放置在口径为 310 mm 的无倾斜平面行星夹具上，与夹具中心的距离分别为 $0, 34.6, 53.9, 74.7, 95.4, 115.2, 134.7, 154.8 \text{ mm}$ 的位置。 MgF_2 薄膜样品制备后，使用 PE Lambda1050 分光光谱仪测量薄膜在 $300 \sim 800 \text{ nm}$ 波段的反射光谱。依据实测 MgF_2 薄膜反射光谱，运用光度法拟合确定 MgF_2 薄膜的物理厚度。如图 2 所示，由实测反射光谱通过理论拟合确定 MgF_2 单层薄膜的物理厚度为 177.3 nm ，图中实测反射光谱与理论拟合结果非常吻合。

利用光度法依次确定平面行星夹具上不同位置处沉积 MgF_2 单层膜的物理厚度，并对获得的薄膜厚度做归一化处理，结果如图 3 中的方形点所示。未使用修正挡板时，口径为 310 mm 的平面行星夹具上 MgF_2 单层膜的厚度均匀性为 95.8% 。为了计算平面基底的光学薄膜厚度分布以及完成修正挡板优化设计实现平面光学元件的薄膜厚度非均匀性控制，首先必须确定电子束热蒸发 MgF_2 薄膜材料的蒸气分布参数。这里依据未使用修正挡板时薄膜厚度模型和实测平面光学元件上的均一化薄膜厚度

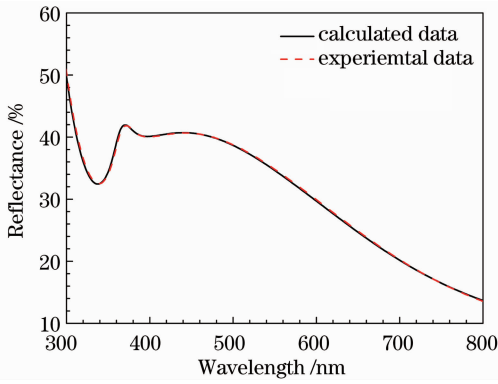


图 2 单层 MgF_2 薄膜的理论拟合反射光谱和实测数据
Fig. 2 Fitted reflection spectra and experimental data of a single layer MgF_2 film deposited on silicon substrate

分布,利用最小二乘法拟合确定电子束热蒸发 MgF_2 薄膜材料的蒸气分布参数。实验确定本工艺条件下电子束热蒸发 MgF_2 薄膜材料的蒸气分布参数 j 为 1.76 ± 0.02 。热蒸发特性参数主要用于描述热蒸发镀膜过程中薄膜材料的蒸气分布。常规的点 and 面蒸发源,热蒸发特性参数取值分别为 0 和 1。但由于电子束蒸发过程中存在挖坑效应,相应的热蒸发特性参数取值范围一般在 $1 \sim 3$ 。对热蒸发特性的描述已有大量文献报道^[1,8,9],相应地,未使用修正挡板时理论计算平面光学元件上的薄膜厚度均一化分布如图 3 中实线所示。

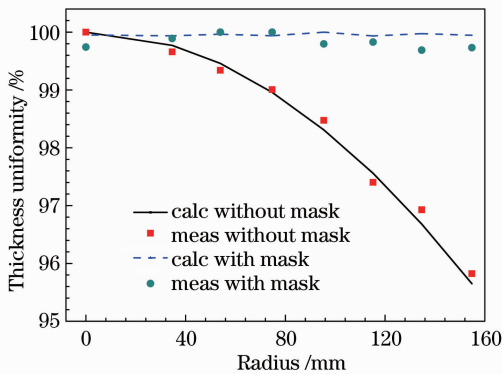


图 3 使用挡板前后光学元件上膜厚分布
Fig. 3 Thickness profiles without and with shadowing mask

采用数值计算方法进行修正挡板优化设计。理论计算得到使用修正挡板时口径 310 mm 的平面行星夹具上沿径向薄膜厚度分布如图 3 中虚线所示,理论薄膜厚度均匀性优于 99.9%。使用数值计算方法优化设计的修正挡板后,实验得到平面行星夹具上 MgF_2 薄膜厚度分布如图 3 中圆形点所示,相应的 MgF_2 薄膜厚度均匀性优于 99.6%。实验结

果表明计算机辅助优化设计的修正挡板能很好地实现平面行星夹具上薄膜厚度非均匀性控制。采用数值计算方法优化设计的挡板形状和尺寸如图 4 所示,其放置于平面行星夹具正下方,与热蒸发源间的垂直距离为 700 mm。该挡板的实物照片如图 4 中插图所示。

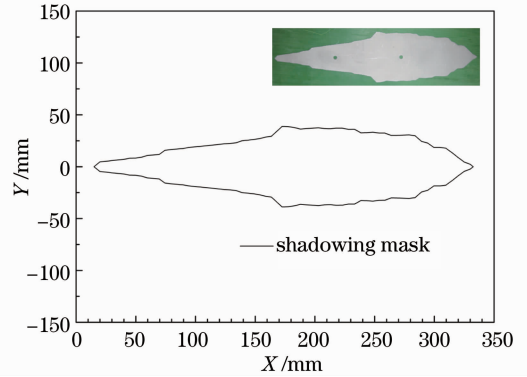


图 4 设计的膜厚均匀性控制挡板

Fig. 4 Designed shadowing mask for thickness uniformity

使用修正挡板校正薄膜厚度分布后,理论计算和实测的平面行星夹具上 MgF_2 薄膜厚度分布之间的偏差小于 0.3%。导致这一偏差的原因可能是真空镀膜过程中电子枪热蒸发 MgF_2 薄膜材料的蒸发特性变化。据文献[9]报道,电子枪热蒸发薄膜材料特性主要取决于真空镀膜过程中电子束作用于薄膜材料所形成的凹坑,即便相同工艺条件所形成的凹坑形状也会存在一定差异,因此真空镀膜过程中热蒸发薄膜材料的蒸发特性存在一定的不确定性。另外使用修正挡板校正薄膜厚度非均匀性时,蒸发源和平面光学元件的相对位置、行星系统的旋转速度和公转圈数,修正挡板的形状和尺寸,以及修正挡板装配情况等因素都将直接影响修正挡板的校正效果。

图 3 显示未使用修正挡板时平面行星夹具上 MgF_2 薄膜厚度从夹具中心到边缘逐渐递减。因此,为了校正平面光学元件上薄膜厚度非均匀性,修正挡板设计应满足薄膜沉积效率由中心到边缘的逐渐递增。采用修正挡板校正 MgF_2 薄膜厚度非均匀性后实测和理论的 MgF_2 薄膜材料沉积效率如图 5 所示。在平面行星夹具边缘和中心处实测 MgF_2 薄膜材料的沉积效率分别为 91.2% 和 87.4%。证明了计算机辅助设计是一种有效的修正挡板设计途径。

另外,实验发现平面行星夹具上实测和理论的 MgF_2 薄膜材料沉积效率间存在比例关系,即满足

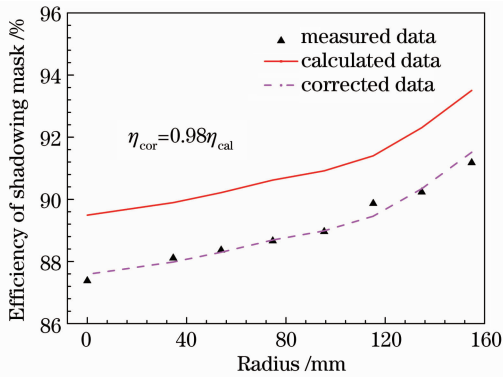


图 5 实测和理论的薄膜材料沉积效率

Fig. 5 Measured and calculated deposition efficiency of the coating material on substrate holder

$\eta_{\text{mea}} \approx 0.98\eta_{\text{cal}}$, 该比例系数非常接近 1。表明薄膜厚度模型和修正挡板校正薄膜厚度非均匀性模型能真实描述真空镀膜过程中光学元件所处的物理实际。值得一提的是确定薄膜材料沉积效率后, 可以将真空镀膜机薄膜厚度监控系统中工具因子参数乘上薄膜材料沉积效率或者将膜系中对应膜层物理厚度除以该薄膜材料沉积效率, 即可实现对使用修正挡板时薄膜制备工艺中相应膜层厚度的精确控制, 实施非常简便。

4 结 论

本文分别建立了真空镀膜机行星系统中未使用和使用修正挡板时平面光学元件上薄膜厚度分布模型, 并运用数值计算方法完成了修正挡板优化设计。依据未使用挡板时由电子束热蒸发制备的 MgF_2 薄膜的物理厚度分布, 确定了电子束热蒸发 MgF_2 薄膜材料的蒸发特性参数为 1.76 ± 0.02 。而实验上采用本模型设计的修正挡板使口径 310 mm 的平面行星夹具上 MgF_2 薄膜厚度均匀性由 95.8% 提高到 99.6%。实验结果也表明使用数值计算方法优

化设计的修正挡板后电子束热蒸发 MgF_2 薄膜材料的沉积效率高于 87.4%。

参 考 文 献

- 1 F. Villa, A. Martínez, L. E. Regalado. Correction masks for thickness uniformity in large-area thin films[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(10): 1602~1610
- 2 J. B. Oliver, D. Talbot. Optimization of deposition uniformity for large-aperture National Ignition Facility substrates in a planetary rotation system[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(13): 3097~3105
- 3 P. Kelkar, B. Tirri, R. Wilklow *et al.*. Deposition and characterization of challenging DUV coatings[C]. *SPIE*, 2008, **7067**: 706708
- 4 B. Sassolas, R. Flaminio, J. Franc *et al.*. Masking technique for coating thickness control on large and strongly curved aspherical optics[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3760~3765
- 5 Fang Ming, Fan Zhengxiu, Huang Jianbing. Numerical simulation of a flat planetary fixture for physical vapor deposition[J]. *Chinese J. Computational Physics*, 2006, **23**(6): 738~742
方明, 范正修, 黄建兵. 平面行星夹具的物理气相沉积均匀性计算[J]. *计算物理*, 2006, **23**(6): 738~742
- 6 Fang Ming, Zheng Weijun, Wu Ming *et al.*. Improved design of uniformity mask for flat planetary fixture[J]. *J. Vacuum Science and Technology*, 2006, **26**(4): 286~289
方明, 郑伟军, 吴明等. 平面行星夹具均匀性修正挡板设计方法研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2006, **26**(4): 286~289
- 7 Pan Dongliang, Xiong Shengming, Zhang Yundong *et al.*. Film uniformity calculation of large caliber coating machine[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(3): 277~280
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
- 8 F. Villa, O. Pompa. Emission pattern of a real vapor sources in high vacuum: an overview[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(4): 695~703
- 9 G. I. Abzalova, R. S. Sabirov, A. V. Mikhailov. Depositing uniform-thickness coatings on large surfaces by means of electron-beam evaporation in vacuum[J]. *J. Opt. Technol.*, 2005, **72**(10): 799~801
- 10 F. L. Wang, R. Crocker, R. Faber. Large-area uniformity in evaporation coating through a new form of substrate motion[C]. Tucson: Optical Interference Coating, 2010. 1~3
- 11 M. Gross, S. Dligatctch, A. Chtanov. Optimization of coating uniformity in an ion beam sputtering system using a modified planetary rotation method[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(9): C316~C320

栏目编辑: 韩 峰