

# 光学表面中频误差对光刻物镜短程杂散光影响分析

杨 旺<sup>1,2</sup> 黄 玮<sup>1</sup> 许伟才<sup>1</sup> 尚红波<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 研究了光学表面中频误差对杂散光的影响规律, 提出使用功率谱密度函数描述表面中频误差, 并通过该方法进行杂散光分析; 同时利用等效光瞳空间频率对表面中频误差进行公差分析。利用以上方法, 对工作波长为 193 nm、数值孔径为 0.75 的光刻物镜进行元件表面中频公差分析, 当要求在 2~10 μm 范围内的杂散光强度占比小于 0.5% 时, 中低频等效光瞳空间频率界限为 16, 中高频等效光瞳空间频率界限为 78。当元件表面功率谱曲线指数取 1.5 时, 功率谱密度系数小于 0.06 的元件表面满足杂散光要求。结果表明该方法可以有效分析光学系统杂散光和元件表面中频公差。

**关键词** 光学设计; 杂散光; 功率谱密度; 公差分析; 光刻物镜

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0922001

## Analysis of Mid-Spatial Frequency Surface Errors Effects on Local Flare in Lithographic Projection Lens

Yang Wang<sup>1,2</sup> Huang Wei<sup>1</sup> Xu Weicai<sup>1</sup> Shang Hongbo<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The influence of mid-spatial frequency surface errors on flare is analysed. Power spectral density function is used to describe the mid-spatial frequency surface errors and analyze the flare. The concepts of spatial frequency and equivalent pupil are used to analyze tolerance. Based on the method, the lens with numerical aperture of 0.75 and working wavelength of 193 nm is analyzed under the requirement of the local flare intensity ratio is less than 0.5% in the scattering range of 2~10 μm. The spatial frequency range of equivalent pupil is 16~78. And it demands that the coefficient of power spectral density is 0.06 and the coefficient of power spectral density is 1.5. The results show that the way can be used to analyze the flare and tolerance the mid-spatial frequency surface errors in lithographic lens.

**Key words** optical design; flare; power spectral density; tolerance analysis; lithographic lens

**OCIS codes** 220.3620; 220.4610; 220.3740

## 1 引 言

随着光刻投影物镜技术的发展, 其工作波长不断变短, 且投影物镜由折射式转变为折反射式, 非球面使用数量不断增加, 使得局部杂散光成为影响深紫外光刻投影物镜的关键因素之一<sup>[1-2]</sup>。所以, 对杂散光的分析及控制是光刻投影物镜设计者必须要考虑的问题。根据杂散光的散射范围, 可以将杂散

光分为远程杂散光和短程杂散光<sup>[3]</sup>。远程杂散光的散射范围在数十微米以上, 测量方法为刀口开闭法, 主要影响掩模亮区曝光。杂散光的主要产生原因是元件膜层、物镜内镜片反射、硅片反射及污染物反射等。短程杂散光的散射范围在 2~10 μm, 测量方法为 Kirk 法, 对掩模亮区曝光和掩模暗区曝光都有影响。主要产生原因是材料折射率不均匀性和元件表

收稿日期: 2012-12-12; 收到修改稿日期: 2013-01-21

作者简介: 杨 旺(1984—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事紫外光学系统设计方面的研究。

E-mail: yangwang@ciomp.ac.cn

导师简介: 黄 玮(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: huangw@ciomp.ac.cn

面中频误差<sup>[4]</sup>。

光刻物镜中短程杂散光与传统杂散光的区别在于产生原因,其中传统杂散光产生的主要原因是镜面多次反射和镜筒反射等<sup>[5-8]</sup>,因此,传统分析方法不适合用于光刻投影物镜短程杂散光的分析。光刻物镜中短程杂散光产生的主要原因是光学元件表面中频误差和光学材料均匀性的中频成份。所以,短程杂散光的控制方法不同于传统杂散光,光学设计者需要解决的问题是根据杂散光要求,给出材料折射率不均匀性及元件表面中频公差。

面形低频对成像的影响可以通过光线追迹实现,但是表面中频误差对成像的影响则很难解决。由于中频误差对成像的影响是一种衍射效应,研究人员提出使用傅里叶算法解决这一问题<sup>[9]</sup>。傅里叶算法是计算点扩展函数的通用算法,简单对光瞳的处理,而很难解决发生在其他位置的衍射效应,同时计算多次衍射效应时,抽样问题很难协调。此外傅里叶算法对小  $F$  数光学系统的衍射效应计算精度的提高很有限。

为解决以上问题,研究人员提出了子波传输算法<sup>[10]</sup>,在很大程度上弥补了傅里叶算法的缺陷。子波传输算法基于波动方程线性特性的计算方法,把一束光分成很多子波进行传输,子波与子波之间互相独立,最终光场由各个子波共同确定。因此,子波传输算法容易解决类似光栅衍射等问题,而不存在互相协调抽样的问题。但是子波传输算法计算量很大,效率不高。随着计算机性能不断增强,这个问题逐渐解决。所以,表面中频误差对成像问题的影响可以用子波传输算法处理。

但是,根据光学系统一定范围内对杂散光强度的要求,分析表面中频误差的公差并没有得到有效解决。因为一定范围内的杂散光是由光学系统中不

同光学表面透射波前衍射造成的,每个表面起作用的频率范围不同。根据现有的加工经验,每个表面的粗糙度或引入杂散光均等分配并不合理,使用均方根值(RMS)描述表面中频进行公差分析具有很大的难度,元件全表面粗糙度量化和频率划分都难以解决。

本文主要讨论由表面中频误差引起的杂散光,从光学设计的角度,提出表面中频误差的分配方法,包括表面中频误差表达形式、公差分析过程及公差分析结果等。

## 2 分析原理

假设光学系统中一个光学元件表面起伏为  $z(x)$ ,表面中频误差对光学系统的影响所引起的相位变化可以表示为

$$\varphi(x) = \frac{2\pi(n-1)}{\lambda} z(x) \cos \theta_x, \quad (1)$$

$$z'(x) = z(x) \cos \theta_x, \quad (2)$$

式中  $n$  为光学元件折射率,  $\lambda$  为光学系统工作波长,  $\theta_x$  为光学元件表面入射角。由于高质量光学系统中光学元件表面起伏比工作波长小一个数量级,光学元件表面中频误差比工作波长一般小两个数量级以上,则出瞳光波函数可以近似表示为<sup>[11]</sup>

$$U(x) = A \exp[j\varphi(x)] \text{rect}\left(\frac{x}{D}\right) \approx A \text{rect}\left(\frac{x}{D}\right) \left[1 + j \frac{2\pi(n-1)}{\lambda} z'(x)\right], \quad (3)$$

式中  $|A|^2$  为入射光强,  $D$  为光瞳口径,  $f_1$  为光学系统焦距。焦面振幅分布为

$$U'(f_x) = \frac{1}{j\lambda f_1} \mathcal{F}[U(x)]_{f_x = \frac{x'}{\lambda f_1}}, \quad (4)$$

式中  $x'$  为焦面坐标。焦面的光强分布为

$$I(f_x) = |U'(f_x)|^2 = \left| \frac{A}{j\sqrt{\lambda f_1}} D \text{sinc}(Df_x) + \frac{A}{\sqrt{\lambda f_1}} \frac{2\pi(n-1)}{\lambda} \mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{D}\right) z'(x)\right] \right|^2 = \frac{A^2}{\lambda f_1} \left\{ D^2 \text{sinc}^2(Df_x) + \left[ \frac{2\pi(n-1)}{\lambda} \right]^2 \mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{D}\right) z'(x)\right]^2 \right\}. \quad (5)$$

由于光学表面可以看成多个正弦函数的叠加,焦面光强分布可以近似为多个正弦振幅光栅衍射光强的叠加,所以,光能量主要集中在三个衍射级上,即零级衍射和  $\pm 1$  级衍射。 $\pm 1$  级衍射能量为杂散光能量,其他级次可以忽略。当计算散射范围为  $[x'_1, x'_2]$  或者频率范围  $[f_1, f_2]$  的  $\pm 1$  级散射时,可以通过积分获得杂散光:

$$s = \frac{1}{A^2 D} \int_{x'_1}^{x'_2} \frac{A^2}{\lambda f_1} \left[ \frac{2\pi(n-1)}{\lambda} \right]^2 \mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{D}\right) z'(x)\right]^2 dx' = \frac{4\pi^2(n-1)^2}{\lambda^2} \int_{f_1}^{f_2} \frac{1}{D} \mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{D}\right) z'(x)\right]^2 df_x. \quad (6)$$

因为杂散光研究对一定的散射区域比较注重,而且期望在该区域内杂散光的分布函数连续,所以将面形起伏表示为<sup>[12]</sup>

$$S(f_x) = \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{1}{D} \mathcal{F} \left[ \text{rect} \left( \frac{x}{D} \right) z'(x) \right]^2, \quad (7)$$

上式表示元件表面起伏的功率谱密度(PSD)。杂散光公式可以简化为

$$s = \frac{4\pi^2(n-1)^2}{\lambda^2} \int_{f_1}^{f_2} S(f_x) df_x. \quad (8)$$

由上述公式推导可知,杂散光与面形 PSD 直接相关,结论同样适用于面形的二维分布。杂散光的强度可以由功率谱积分求得,积分范围可以由散射距离求得。该结论适用于有反射镜的光学系统及光学系统中处于不同位置的光学元件表面对杂散光的影响,当表面为反射面时,其中的折射率  $n$  改为  $-1$ ,  $D$  表示每个视场光束在不同透镜表面的光斑大小

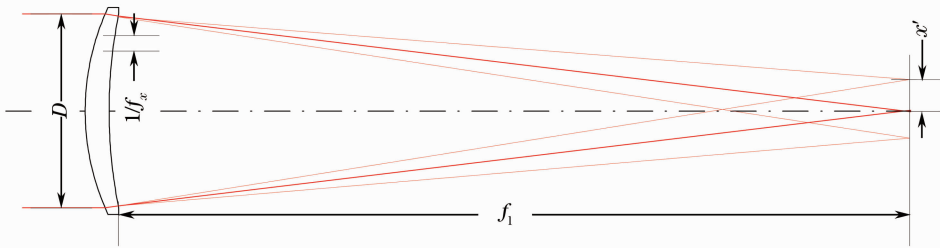


图 1 等效光瞳空间频率与散射距离的关系

Fig. 1 Relation between spatial frequency in equivalent pupil and scattering range

因为每个表面产生的散射光再次经其他表面散射时,可以忽略。所以,光学系统中所有元件表面产生的杂散光可以表示为

$$s = 1 - t = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - s_k) \approx \sum_{k=1}^m s_k, \quad (11)$$

式中  $s_k$  表示第  $k$  个表面散射,  $m$  表示光学系统元件表面总数。

PSD 函数是表面粗糙度的频谱函数,它能够很完全地描述表面质量特性,尤其在量化超光滑表面时非常有用。用 PSD 函数描述被测面形没有约束时的自然属性和统计特性<sup>[13]</sup>, PSD 可表示为

$$S(f_x) = \frac{A}{f_x^B}, \quad (12)$$

式中  $f_x$  为空间频率( $\text{mm}^{-1}$ ),  $A$  为常数( $\text{nm}^2 \cdot \text{mm}^{1-B}$ ),  $B$  为空间频率幂数,对于大多数真实表面  $B \in [1, 3]$ 。  $B$  参数一般由加工工艺决定,  $A$  参数的大小可以表征元件表面加工的质量。图 2 为 ISO10110 中关于光学表面粗糙度的 PSD 曲线<sup>[13]</sup>,  $B$  参数取 2,  $A$  取不同值确定的普通抛光、精抛和超光滑抛光三种抛光标

$D_k$ 。

为使结论具有通用性,定义等效光瞳空间频率:

$$\nu = Df_x = \frac{D}{\lambda f_1} x' = \frac{1}{\lambda F} x' = \frac{2NA}{\lambda} x'. \quad (9)$$

图 1 所示为等效光瞳空间频率与散射距离的关系,当工作波长  $\lambda$  和视场光斑确定时,散射距离  $x'$  与面形空间频率  $f_x$  和光学系统焦距  $f_1$  有关。根据等效光瞳空间频率定义,可以使散射距离计算更通用和方便,散射距离与光学系统数值孔径  $NA$ 、工作波长  $\lambda$  和等效光瞳空间频率相关。等效光瞳空间频率使不同元件表面与散射范围相联系,散射范围为  $[x'_1, x'_2]$ , 可确定等效光瞳空间频率范围  $[\nu_1, \nu_2]$ 。光学系统中第  $k$  个表面引起的散射可以表示为

$$s_k = \frac{4\pi^2(n_k-1)^2}{\lambda^2} \int_{\nu_1/D_k}^{\nu_2/D_k} S(f_x) df_x. \quad (10)$$

准。由(11)、(12)式,根据杂散光要求可得表面参数  $A$  满足:

$$A = \frac{s\lambda^2(B-1)}{4\pi^2 \sum_{k=1}^k (n_k-1)^2 (f_1^{1-B} - f_2^{1-B})}. \quad (13)$$

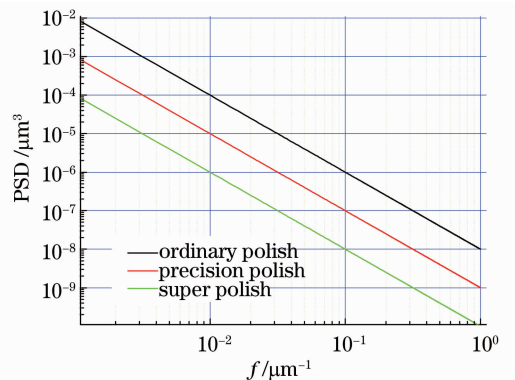


图 2 光学元件表面 ISO 标准

Fig. 2 ISO standard of optical surface quality

PSD 可以从光学元件面形数据中直接通过傅里叶变化获得, PSD 的测量等同于面形轮廓测量,

而且可以根据 PSD 得到 RMS。由于功率谱密度与光学元件表面大小、光学元件工作位置无关,易于量化加工质量,使用功率谱密度 PSD 来表示面形起伏,并使用功率谱密度均等的公差分配原则,将是元件表面中频公差分析的较好选择。

所以根据杂散光要求对表面中频误差公差分析即是求取 PSD 函数中一对参数(A,B)的过程。

### 3 仿真与结果分析

#### 3.1 光学系统及杂散光要求

光刻投影物镜光学设计的初始结构来自于文献[14],如图 3 所示,镜片数为 21 个,工作波长为 193.368 nm,光学系统使用一种光学材料熔石英,

折射率为 1.56。数值孔径为 0.75,静态视场尺寸为 26 mm×8 mm,倍率为-0.25。一般光刻机对光刻投影物镜要求在 2~10 μm 散射范围杂散光强度占比不超过 1.5%,根据元件表面加工能力,由元件表面产生的杂散光强度占比在 2~10 μm 散射范围内一般限制在 0.5%~1.0%。

#### 3.2 等效光瞳空间频率

对光学系统中不同光学表面进行 PSD 参数和空间频率范围设置,可以获得如图 4 所示的散射距离和散射强度。图 4 为光刻投影物镜中心视场的光强分布,中心亮斑为艾里斑,外围亮环由光学表面散射形成。

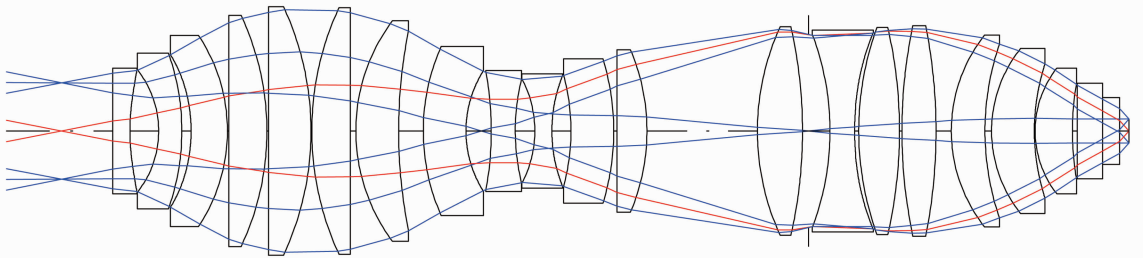


图 3 光刻物镜结构示意图

Fig. 3 Layout of the lithographic projection lens

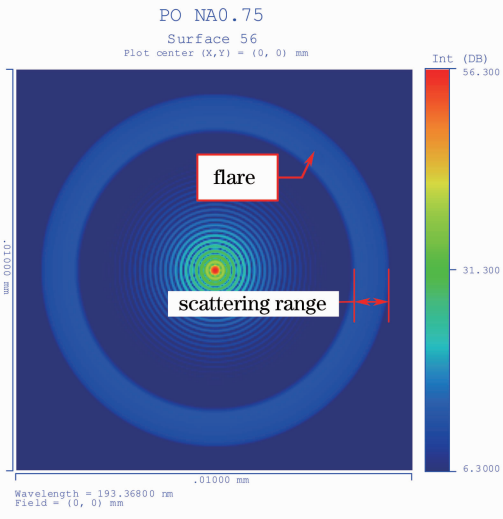


图 4 光学系统中元件表面引起的散射分布

Fig. 4 Distribution of the intensity effected by the surface errors in lithographic lens

#### 3.3 元件表面中频公差分析

当工作波长确定时,散射距离与等效光瞳空间频率有着明确的线性关系,图 5 为不同数值孔径下散射距离与等效光瞳空间频率的关系曲线。散射范围为 2~10 μm 时,数值孔径为 0.75 的等效光瞳空间频率可以确定为 15.5~77.7。图 6 给出了该系

统中不同表面通光口径和单视场光斑大小,其中第 27 号表面为光阑;除了光阑面,每个表面的通光口径和单视场光斑大小不同,尤其第 1~22 号表面差别较大;不同表面单视场光斑大小也不相同,这就是不能使用粗糙度均等分配原则的原因。根据单视场光斑可以计算不同表面的空间频率范围及产生的杂散光大小。

图 7 给出了杂散光强度占比分别为 0.5%、1.0%和 1.5%时,对 PSD 中(A,B)参数的要求。当

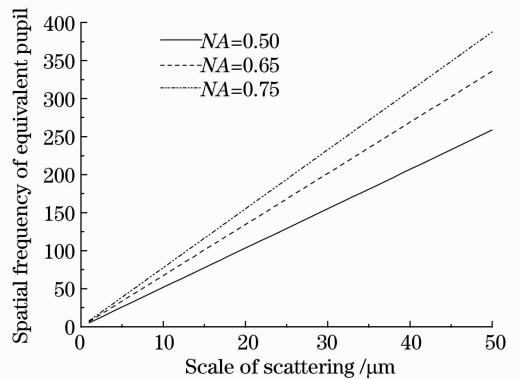


图 5 不同数值孔径下等效光瞳频率对应的散射距离

Fig. 5 Scattering range of different spatial frequencies of equivalent pupil with different number apertures

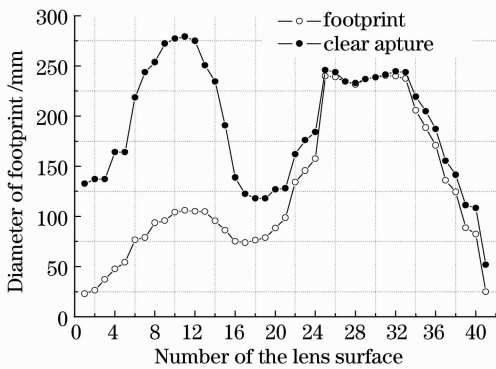


图 6 光刻物镜中元件表面通光口径大小和单视场光斑大小

Fig. 6 Size of the clear aperture and the footprint in lithographic lens

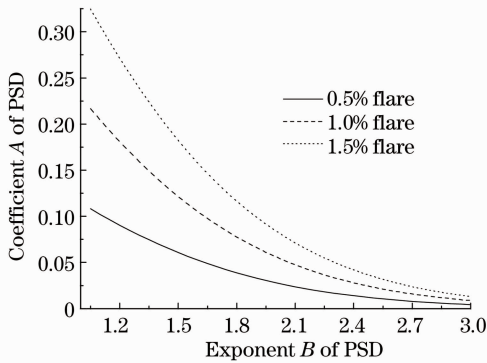


图 7 在不同水平杂散光情况下元件表面的 PSD 要求  
Fig. 7 PSD demands of the surface in the lens under different flare values

PSD 中(A,B)取值位于对应曲线之下时,元件表面这种要求就会满足光学系统对杂散光的要求。例如杂散光要求小于 0.5%时,B=1.5,对 A 的要求就是小于 0.06。从图 7 中曲线可以看出,光学加工工艺使 B 的取值越小,系统对 A 的要求越宽松,光学系统的杂散光越容易满足要求。当光学加工工艺使 B 的取值确定时,A 的大小决定光学系统杂散光大小,A 就可以成为量化光学表面质量的参数。通过该分析方法可以完成对光学系统光学元件表面质量公差的分析,进而获得光学表面质量要求。

## 4 结 论

针对光刻投影物镜杂散光要求,给出了光刻投影物镜短程杂散光分析方法和光刻投影物镜元件表面中频公差的分析方法。通过光刻投影物镜实例分

析表明,根据短程杂散光要求可以提出元件表面中频要求,也可以根据元件表面质量量化光刻投影物镜短程杂散光大小。对光刻投影物镜杂散光分析和光刻投影物镜光学元件加工具有指导意义。该分析方法也适用于折反射光刻投影物镜和极紫外光刻投影物镜。

## 参 考 文 献

- 1 J P Kirk. Scattered light in photolithographic lenses [C]. SPIE, 1994, 2197: 566—572.
- 2 C Krautschik, M Chandhok, G Zhang, *et al.*. Implementing flare compensation for EUV masks through localized mask CD resizing [C]. SPIE, 2003, 5037: 58—68.
- 3 Stephen P Renwick, Steven D Slonaker, Taro Ogata. Size-dependent flare and its effect on imaging [C]. SPIE, 2003, 5040: 24—32.
- 4 J R Harvey, A Kotha. Scattering effects from residual optical fabrication errors [C]. SPIE, 1995, 2576: 155—174.
- 5 Yuan Yukai. Stray light suppressing measure of optical system [J]. Journal of Atmospheric and Enviromental Optics, 2007, 2(1): 6—10.  
原育凯. 光学系统杂散光的消除方法[J]. 大气与环境光科学报, 2007, 2(1): 6—10.
- 6 Xu Deyan, Shen Weixing, Lin Zunqi. Response of optic profiler to spatial wavelength of optical element surface [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(12): 1721—1726.  
徐德衍, 沈卫星, 林尊琪. 光学轮廓仪对光学元件表面空间波长回应的研究[J]. 光学学报, 1998, 18(12): 1721—1726.
- 7 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.*. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 768—771.  
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 768—771.
- 8 Chen Xue, Sun Chuang, Xia Xinlin. Stray light suppression property of baffle with honeycombed wall [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0523004.  
陈 学, 孙 创, 夏新林. 具有蜂窝内壁的遮光罩杂散光抑制特性分析[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0523004.
- 9 Richard N Youngworth, Bryan D Stone. Simple estimates for the effects of mid-spatial-frequency surface errors on image quality [J]. Appl Opt, 2000, 39(13): 2198—2209.
- 10 Bryan D Stone, Thomas J Bruegge. Practical considerations for simulating beam propagation: a comparison of three approaches [C]. International Optical Design Conferece, 2002. International Society for Optics and Photonics, 2002: 359—378.
- 11 Michael Bass, Casimer De Cusatis, Jay Ewoch, *et al.*. Handbook of Optic, Volume I: Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments [M]. McGraw-Hill, Inc, 1995. 7.1—7.12.
- 12 J M Elson, J M Bennett. Calculation of the power spectral density from surface profile data [J]. Appl Opt, 1995, 34(1): 201—208.
- 13 International standard, ISO10110-8; Surface Texture [S]. 1997.
- 14 Y Omura. Projection Exposure Method and Apparatus and Projection Optical System. European Patent: 1139138 [P]. 2001-10-04.

栏目编辑: 张 腾