

# 中频面形误差对离轴照明系统光场性能的影响

龚爽<sup>1,2</sup>, 杨宝喜<sup>1,2\*</sup>, 黄惠杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 研究离轴照明的系统中, 光学表面环带中频面形误差对于照明光场均匀性和半影宽度的影响。推导了二极照明下中频面形误差的峰谷(PV)值和系统的相干因子对线扩展函数(LSF)分布的解析关系, 并通过数值计算分析了二极照明下, 中频面形误差对照明镜组线扩展函数的影响。阐述了中频面形误差降低照明光场的均匀性和增大半影宽度的理论机制。利用实际制造的面形数据结合商用光学设计软件对光刻机照明系统中照明镜组进行仿真。结果表明, 这种仿真方法可以快速评估中频面形误差对照明光场和半影宽度的影响, 在设计阶段使用实际制造的面形对系统进行仿真, 为光学设计和光学加工公差分配提供了理论依据。

**关键词** 测量; 光刻; 光学加工; 中频面形误差; 中继镜组; 光场

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1204003

## Effects of Mid-Spatial Frequency Surface Errors on the Illumination Field Uniformity of Off-Axis Illumination

Gong Shuang<sup>1,2</sup>, Yang Baoxi<sup>1,2\*</sup>, Huang Huijie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The influences of mid-spatial frequency surface errors on the illumination field uniformity and the penumbra width of off-axis illumination are analyzed herein. The analytical relationship between peak-valley (PV) values of the errors and the coherence factor on the line spread function (LSF) distribution under the dipole illumination is derived, and the effect of the mid-spatial frequency error on the LSF of the relay lens group of the photolithography illumination is numerically analyzed. Mid-spatial error describes the reduced uniformity of the illumination field and the increased penumbra width. Using actual manufactured surface errors in conjunction with commercial optical design software to simulate the relay lens group in the photolithography illumination, theoretical accuracy is verified. Therefore, this simulation method can be used at the design stage using the actual manufactured profile, which can provide a reference for optical designs.

**Key words** measurement; lithography; optical fabrication; mid-spatial frequency surface errors; relay lens; illumination field

**OCIS codes** 120.3620; 120.4610; 110.2945

## 1 引言

光刻照明系统是超大规模集成电路的核心设备。为了使从准分子激光器发出的光束经过一系列模块传输后到达掩模面的能量满足光刻曝光系统的

要求, 需要在系统中引入非球面透镜, 以减少镜片数量, 降低能量的损耗。非球面透镜的抛光技术包括单点金刚石车削(SPDT)、计算机控制光学表面成形(CCOS)和磁流变加工(MRF)等<sup>[1]</sup>。

非球面抛光的过程会使元件表面具有中等频率

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-06-16; 录用日期: 2020-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61805264)、上海市自然科学基金(19ZR1464300)、上海市扬帆计划(18YF1426500)

\* E-mail: yangbx@siom.ac.cn

(简称中频, MSF)的面形误差<sup>[2]</sup>,同时因面形的中频面形误差越来越占主导地位,故光学系统的设计过程必须考虑这一误差<sup>[3]</sup>。此前,对于中频面形误差的研究都是建立在圆形光瞳的基础上,Goodman提出可将光学元件面形误差简化为位于系统出瞳面处的相位扰动<sup>[3]</sup>,Youngwoth等<sup>[4]</sup>提出了考虑中频面形误差的简化的光学传递函数模型,Tamkin等<sup>[5-6]</sup>分析了环带中频面形误差对光学系统的影响。这些研究表明,对于传统的光学系统,透镜表面的中频面形误差会使系统传递函数(MTF)中频部分的对比度下降,产生杂散光<sup>[7]</sup>,使光场的背景亮度提高,但一般不会影响图像的分辨率<sup>[8]</sup>。而现今的光刻机照明系统为了增强光刻分辨力、改善焦深、提高成像对比度,通常都会使用离轴照明的方式<sup>[9]</sup>。

因此,本文提出离轴照明下,带有中频面形误差的光学系统的表示模型,讨论了二极照明模式下,环

带中频面形误差对于照明光场均匀性和半影宽度的影响。在光刻机中由于使用不同的照明模式,在不同的光瞳参数下,中频面形误差对照明光场的影响不同,尤其在较高相干因子的光瞳参数下,中频面形误差会使照明镜组点扩展函数(PSF)的零级与次级的比值发生较大的改变,对照明光场的均匀性和半影宽度产生明显的影响。

## 2 光瞳参数定义

深紫外浸没式投影光刻机照明系统中,为了适应不同的掩模结构,采用不同的照明模式,通过光瞳整形调整光瞳参数并产生不同的照明模式,以增强光刻分辨力、改善焦深、提高成像对比度,从而得到更好的光刻性能。光刻机中几种常用的照明模式有传统照明、环形照明、二极照明、四极照明等<sup>[10]</sup>,如图1所示。

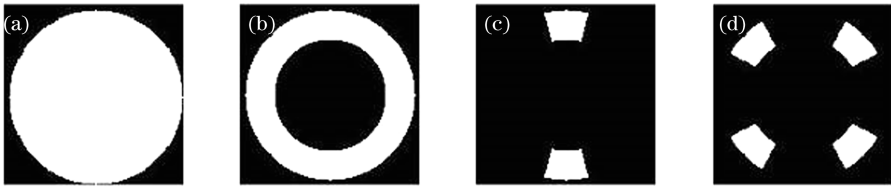


图1 照明模式示意图。(a)传统照明;(b)环形照明;(c)二极照明;(d)四极照明

Fig. 1 Diagrams of illumination modes. (a) Circular; (b) annular; (c) dipole; (d) quadrupole

以四极照明为例,阐述照明模式的几何参数的定义。图2为衍射光学元件(DOE)光瞳整形后在远场的光强分布,在 $x$ - $y$ 坐标系下, $\sigma_o$ 为外环半径, $\sigma_i$ 为内环半径, $\varphi$ 为极张角, $\varepsilon$ 为极方位角<sup>[11]</sup>。

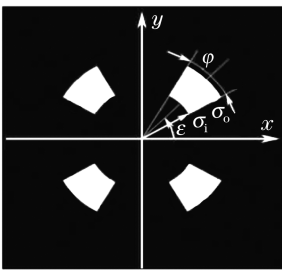


图2 DOE远场光强分布

Fig.2 Far field intensity distribution of DOE

## 3 原 理

### 3.1 中频面形误差对线扩展函数的影响

对于光刻照明光场,更加关心的是非扫描方向 $x$ 的光场均匀性<sup>[12]</sup>,所以本研究主要讨论线扩展函数(LSF,  $L(x)$ ),其中 $L(x) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{\text{psf}}(x, y) dy$ ,  $I_{\text{psf}}$

为系统的点扩展函数。首先计算系统的点扩展函数。假设照明物镜中的各表面中频面形误差在系统的出瞳处叠加引起的光程差为

$$w(x_o, y_o) = \sum_{i=1}^M w_i, \quad (1)$$

式中, $x_o$ 为出瞳面的横坐标, $y_o$ 为出瞳面的纵坐标, $w_i$ 为第 $i$ 个表面单独在系统出瞳面引起的光程差, $M$ 为表面总数。对于环带的中频面形误差,

$$w_i = \frac{X_{\text{PV},i}}{2} \sin\left(2\pi \frac{N_i}{d} \sqrt{x_o^2 + y_o^2}\right), X_{\text{PV},i}$$

为第 $i$ 个表面中频面形误差单独在出瞳面引起波面扰动的峰谷(PV)值, $d$ 为光瞳半径, $N_i$ 为第 $i$ 个表面中频面形误差单独在出瞳面引起波面扰动的环数,也被称为等效光瞳频率。对于中频面形误差,等效光瞳频率范围为 $20 \sim 80$ <sup>[7]</sup>。将中频面形误差在出瞳处引起的相位差表示为

$$\varphi(x_o, y_o) = \frac{2\pi}{\lambda} w(x_o, y_o) = k w(x_o, y_o), \quad (2)$$

其中 $\lambda$ 为激光的波长, $k$ 为波数。假设出瞳处的复振幅相同,则在出瞳处的扰动为

$$U_o = C' \exp \left\{ -j \frac{k}{2z} [(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2] \right\} \times \exp [jk\omega(x_o, y_o)] P(x_o, y_o), \quad (3)$$

式中,  $x_i$  为掩模面的横坐标,  $y_i$  为掩模面的纵坐标,  $z$  为出瞳位置到掩模面的距离,  $P$  为孔径函数,  $C'$  为常量。由菲涅耳衍射公式, 可得掩模面处的复振幅分布为

$$U_i(x_i, y_i) = C \iint_S \exp [jk\omega(x_o, y_o)] P(x_o, y_o) \times \exp \left[ -j \frac{k}{z} (x_o x_i + y_o y_i) \right] dx_o dy_o, \quad (4)$$

式中,  $C$  为常量,  $S$  为孔平面。掩模面上的强度分布即为照明物镜的点扩展函数, 表达式为

$$I_{\text{psf}}(x_i, y_i) = |U_i(x_i, y_i)|^2. \quad (5)$$

对于旋转对称照明模式, 其在照明镜组出瞳处的光瞳函数  $P(x_o, y_o)$  具有圆对称性<sup>[13]</sup>, 故可以写成  $P(r)$ , 同样  $\omega(x_o, y_o)$  可以写成  $\omega(r)$ 。令

$$f_x = \frac{x_i}{\lambda z}, f_y = \frac{y_i}{\lambda z}, \quad (6)$$

则有

$$r = \sqrt{x_o^2 + y_o^2}, \theta = \arctan\left(\frac{y_o}{x_o}\right), \quad (7)$$

$$\rho = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \varphi = \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right). \quad (8)$$

将(7)式和(8)式, 代入到(4)式, 利用贝塞尔恒等式, 可得

$$U_i(\rho, \varphi) = 2\pi C \int_0^\infty r \exp [jk\omega(r)] P(r) dr \int_0^{2\pi} \exp [-j2\pi r \rho \cos(\theta - \varphi)] d\theta, \quad (9)$$

$$U_i(\rho) = 2\pi C \int_{\sigma'_i}^{\sigma'_o} \exp [jk\omega(r)] J_0(2\pi r \rho) dr, \quad (10)$$

式中:  $\sigma'_o$  和  $\sigma'_i$  分别为出瞳位置光瞳分布的外环半径和内环半径, 分别对应  $\sigma_o$  和  $\sigma_i$ ;  $J_0$  为零阶第一类贝塞尔函数。计算像面处的光强分布为

$$I(\rho) = C_1 \left\{ \int_{\sigma'_i}^{\sigma'_o} \sin [jk\omega(r)] J_0(2\pi r \rho) dr \right\}^2 + C_1 \left\{ \int_{\sigma'_i}^{\sigma'_o} \cos [jk\omega(r)] J_0(2\pi r \rho) dr \right\}^2, \quad (11)$$

式中  $C_1$  为常量。假设  $\omega(r)$  为单频率分量。根据光刻照明对照明光场的需求, 主要分析照明方向平行于非扫描方向的二极照明模式, 通常设计 DOE 时, 二极照明的极张角的参数为  $30^\circ$ 。将二极照明的光瞳参数代入(4)式, 可得

$$U_i(\rho, \varphi) = 2\pi C \int_0^\infty \int_0^{2\pi} r \exp [jk\omega(r)] P(r, \theta) \exp [-j2\pi r \rho \cos(\theta - \varphi)] dr d\theta = 2\pi C \int_{-\pi/12}^{\pi/12} \int_{\sigma'_i}^{\sigma'_o} \exp [jk\omega(r)] \exp [-j2\pi r \rho \cos(\theta - \varphi)] dr d\theta + 2\pi C \int_{11\pi/12}^{13\pi/12} \int_{\sigma'_i}^{\sigma'_o} r \exp [jk\omega(r)] \exp [-j2\pi r \rho \cos(\theta - \varphi)] dr d\theta, \quad (12)$$

点扩展函数的分布为

$$I_{\text{psf}}(\rho, \varphi) = |U_i(\rho, \varphi)|^2. \quad (13)$$

照明镜组为双远心系统, 放大率为  $-1$ , 物方数值

孔径为 0.18。根据非球面加工中的去除函数, 设定中频面形误差在出瞳处的等效光瞳频率  $N = 40$ , 对 PSF 解析式进行数值计算, PSF 的分布如图3所示, 从图3

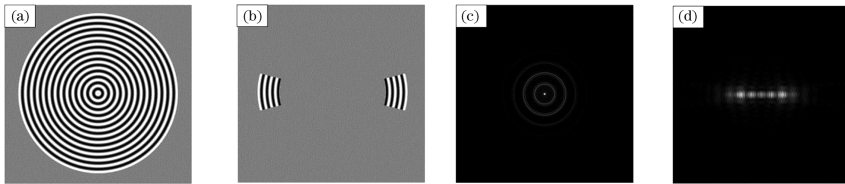


图3 出瞳处的扰动与其点扩展函数。(a)传统照明模式下出瞳处扰动;(b)二极照明模式下出瞳处扰动;(c)传统照明模式下存在中频面形误差时的点扩展函数;(d)二极照明模式下存在中频面形误差时的点扩展函数

Fig.3 Wavefront in the exit pupil and its PSF. (a) Wavefront in the exit pupil under circular mode; (b) wavefront in the exit pupil under dipole mode; (c) PSF with MSF errors under circular mode; (d) PSF with MSF errors under dipole mode

可以看出,二极照明时,中频面形误差类似于相位光栅,其对 PSF 的影响与传统照明时有明显的不同。

由公式  $L(x) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{\text{psf}}(x, y) dy$ , 对  $\sigma'_o$  进行归一化,令相干因子  $\sigma = \sigma'_i/\sigma'_o$ , 计算得到线扩展函数的分

布如图 4 所示。可以看出二极照明时,中频面形误差使衍射的零级和次级的能量比例发生了很大程度的改变,能量的弥散范围增大,故对照明光场的均匀性和半影宽度造成较大的影响。为了更加直观地描述线扩展函数的能量分布情况,分析线扩展函数的能量集中度。

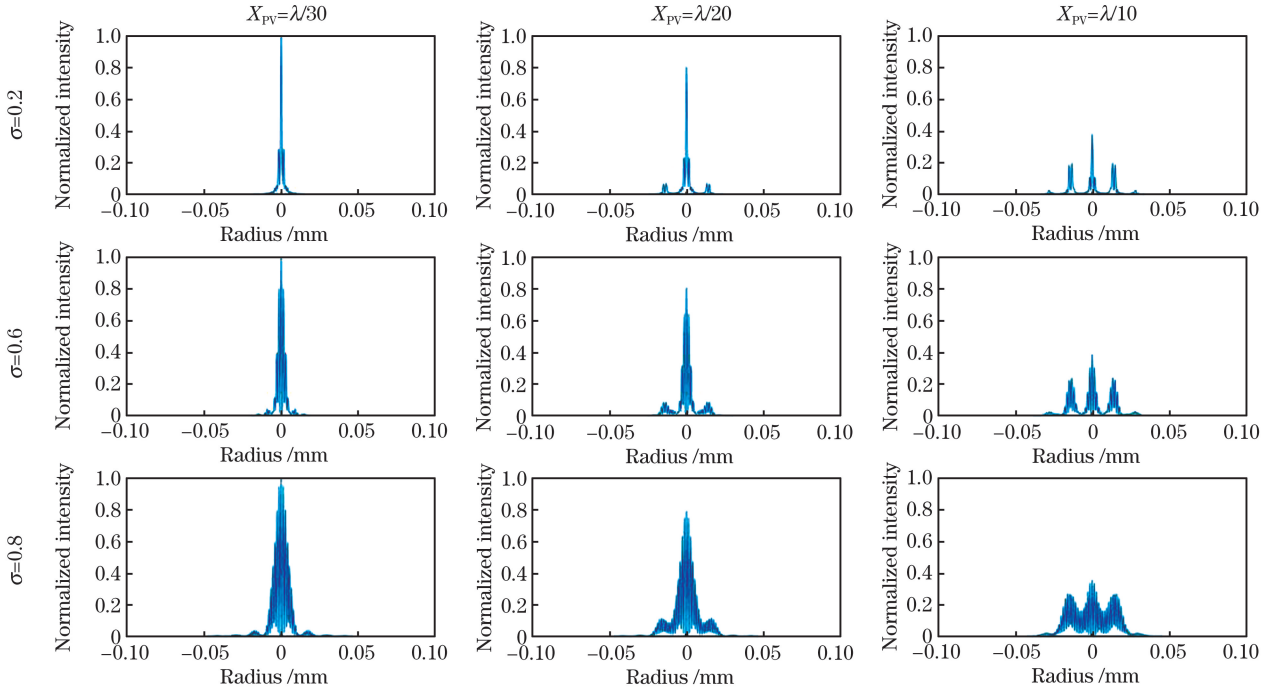


图 4 二极照明下系统的 LSF 分布

Fig.4 Distribution of LSF under dipole mode

分别计算相干因子  $\sigma$  等于 0.2 和 0.8 时的能量集中度,如图 5 所示,从图 5(a)可以明显地看出曲线呈台阶状,每个台阶表示一个衍射级次的能量,随着峰谷值的增大,曲线的第二台阶逐渐增大,这说明

LSF 的能量逐步向衍射的次级集中。对比图 5(b)和图 5(a),随着相干因子的变大,曲线的台阶变得不明显,不能很好地分辨衍射级次,但同样可以看出随着峰谷值的增大,LSF 的能量向外径扩展。

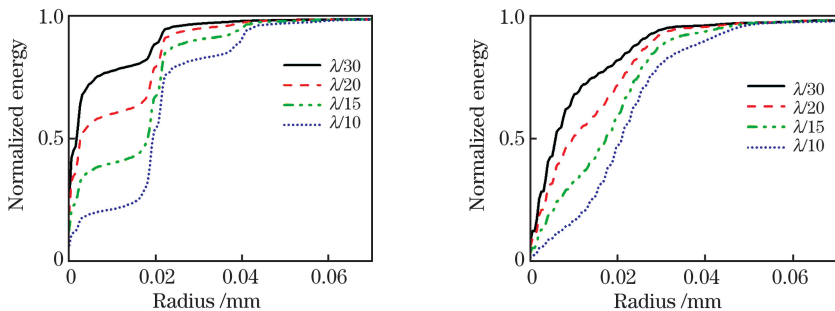


图 5 LSF 的能量集中度。(a)  $\sigma=0.2$ ; (b)  $\sigma=0.8$ ,

Fig.5 Encircled energy for the LSF. (a)  $\sigma=0.2$ ; (b)  $\sigma=0.8$

### 3.2 中频面形误差对照明光场的影响

对于二极照明,中频面形误差对同方向的光场分布影响较大,而对正交方向的光场分布影响几乎为零。在光刻机照明光场中,更加关心的是非扫描

方向的光场均匀性。假设非扫描方向为  $x$  方向,则光场分布为  $I(x)$ 。由瑞利成像理论可知,像面处的  $x$  方向的光场分布为理想光场分布与系统线扩展函数  $L(x)$  的卷积,理想的照明光场为矩形分布,

写为  $\text{rect}(l)$ , 其中  $l$  表示矩形在  $x$  方向上的长度。图 6 为照明光场非扫描方向分布的示意图, 图中可以看出中频面形误差对照明光场的均匀性和半影宽度都有影响。

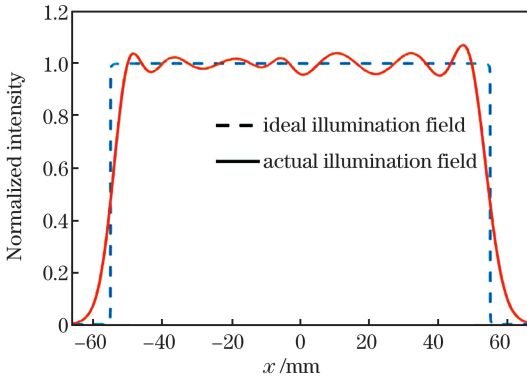


图 6 光场分布受中频面形误差影响示意图

Fig. 6 Illustration of the effects of MSF surface errors on illumination field

光场均匀性计算公式为

$$U = \frac{2I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

用 Matlab 对光场的均匀性进行计算, 得到等效光瞳频率  $N = 40$ , 数值孔径等于 0.18, 相干因子不同时光场均匀性与峰谷值的关系曲线, 如图 7 所示。从图中可以看出, 峰谷值在  $\lambda/30 \sim \lambda/10$  范围内, 随着峰谷值的增大, 光场均匀性下降。均匀性下降的幅度与系统的相干因子有关, 相干因子为 0.2 时, 中频面形误差对光场的均匀性几乎没有影响。在相干因子大于 0.6 后, 均匀性下降的趋势大幅增大。在同一中频面形误差的影响下, 相干因子越大, 均匀性越差, 这说明在等效频率  $N = 40$  时, 系统的相干因子越大, 照明光场均匀性对中频面形误差越敏感。

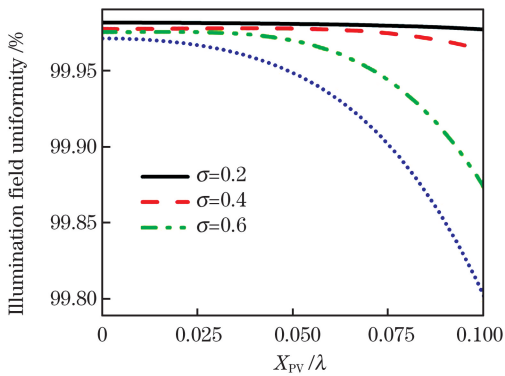


图 7 不同相干因子下, 光场均匀性与峰谷值的关系曲线  
Fig. 7 Uniformity of illumination field versus PV value under different coherence factors

### 3.3 中频面形误差对照明光场半影宽度的影响

理想情况下, 掩模面上非扫描方向的截面呈矩形形状, 但是受中频面形误差的影响, 非扫描方向截面呈梯形分布。半影宽度定义为光场边缘最大光强的 99% 处到 0.3% 处的间距<sup>[12]</sup>。对光场的半影宽度进行计算, 绘制了有效光瞳频率  $N = 40$ , 不同相干因子下, 半影宽度与中频面形误差峰谷值的关系曲线, 如图 8 所示, 可以看出相干因子的改变会对半影宽度产生影响, 在峰谷值小于  $0.07\lambda$  的部分, 半影宽度随着峰谷值的增大只有小幅变化, 故可以认为在这个范围内, 照明光场的半影宽度对中频面形误差不敏感, 其差异主要是由相干因子的变化造成的。在峰谷值大于  $0.07\lambda$  后, 半影宽度随着峰谷值的增大明显增大, 其增大幅度与相干因子有关, 相干因子越大, 增大幅度越大, 这说明在中频面形误差的峰谷值大于  $0.07\lambda$  后, 系统的相干因子越大, 照明光场的半影宽度对中频面形误差越敏感。

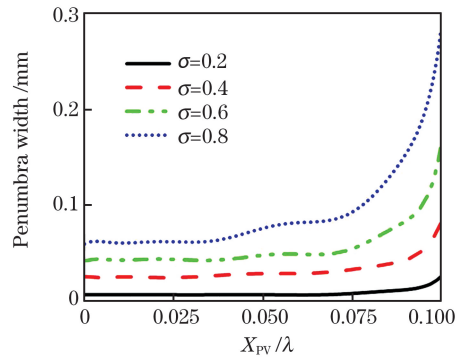


图 8 不同相干因子下, 光场半影宽度与峰谷值的关系曲线  
Fig. 8 Penumbra width versus PV value under different coherence factors

## 4 仿真及结果分析

### 4.1 仿真面形的结果分析

仿真所用的照明镜组结构如图 9 所示, 由 10 个镜片组成, 其中 5 个是非球面镜片。照明镜组用于浸没式光刻机照明系统时, 工作波长为 193 nm。在步进扫描光刻机中, 照明镜组的主要功能是在掩模面上形成严格的光束强度均匀的照明区域<sup>[14]</sup>。仿真过程使用 MATLAB 创建不同峰谷值的面形误差, 分别为  $\lambda/30, \lambda/20, \lambda/15$  和  $\lambda/10$  的等效光瞳频率  $N = 40$ 。若中频面形误差所在的表面距离孔径光阑较远时, 不能忽略视场的影响, 故系统不能看作为线性不变的系统。为了减小视场对仿真结果的影响, 将面形数据导入到距离孔径光阑最近的非球面

上,并改变光瞳的相干因子,即 0.4,0.6 和 0.8。仿真得到的光强分布如图 10 所示。

表 1 给出了数据处理后光场分布的均匀性。

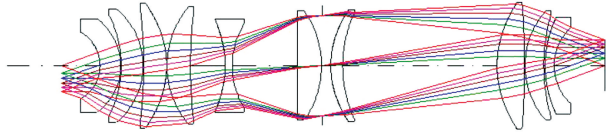


图 9 照明镜组结构示意图

Fig.9 Structure of relay lens group in photolithography illumination

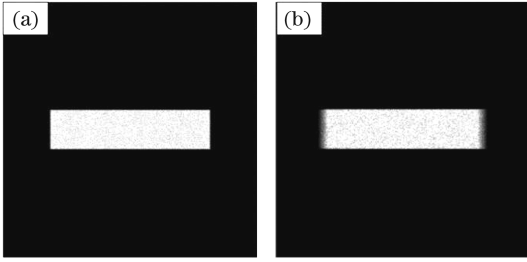


图 10 仿真得到光场均匀分布。(a)理想光场分布; (b)中频面形误差影响下光场分布

Fig. 10 Uniformity of illumination field created by simulation. (a) Ideal illumination field; (b) illumination field under the effects of MSF surface errors

表 1 各相干因子、PV 值下的光场均匀性

PV value	PV values and coherence factors				unit: %
	$\lambda/30$	$\lambda/20$	$\lambda/15$	$\lambda/10$	
Uniformity at $\sigma=0.4$	99.9775	99.9773	99.9737	99.9609	
Uniformity at $\sigma=0.6$	99.9750	99.9667	99.9459	99.9015	
Uniformity at $\sigma=0.8$	99.9730	99.9582	99.9147	99.8227	

从图 11 中可以看出相同的相干因子下,中频面

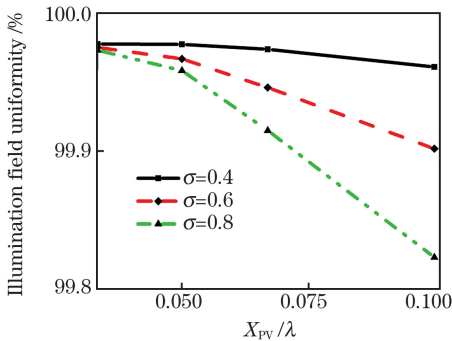


图 11 不同相干因子下,光场均匀性与 PV 值的曲线图  
Fig.11 Uniformity of illumination field versus PV value under different coherence factors

形误差的 PV 值越大,光场越不均匀。在相同 PV 值的中频面形误差下,相干因子越大,光场的均匀性下降越多,并且下降幅度也随相干因子增大而增大。仿真结果与第 3 节中的理论分析的变化趋势基本相同。由此可知,相干因子越大,系统对于中频面形误差越敏感,照明光场的均匀性下降幅度就越大。

此外,随着中频面形误差频率的上升,照明方向上的边缘会出现半影,如图 12 所示。与半影产生的传统原理不同<sup>[15]</sup>,中频面形误差引起光场产生半影的原因是,受中频面形误差影响的系统 LSF 与理想光场卷积后,光场边缘匀化,斜率下降。

表 2 给出了光场分布具体的半影宽度,对应的曲线图见图 13。

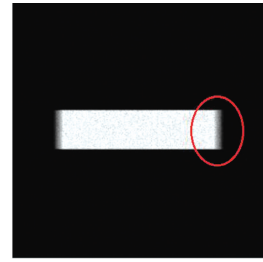


图 12 中频面形误差引起光场边缘半影的示意图

Fig.12 Diagram of the effects of MSF surface errors on penumbra width

表 2 各相干因子、PV 值下的半影宽度

PV value	factors				unit: mm
	$\lambda/30$	$\lambda/20$	$\lambda/15$	$\lambda/10$	
Penumbra width at $\sigma=0.4$	0.0110	0.0110	0.0220	0.0980	
Penumbra width at $\sigma=0.6$	0.0440	0.0550	0.0770	0.1870	
Penumbra width at $\sigma=0.8$	0.1100	0.1430	0.1650	0.3301	

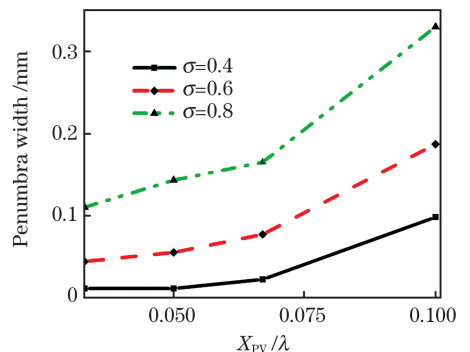


图 13 不同相干因子下,光场半影宽度与 PV 值的曲线图  
Fig.13 Penumbra width versus PV value under different coherence factors

## 4.2 实际制造面形的结果分析

实际制造的面形包括了低中高的频率误差,本文只分析中频部分的误差,需要将中频分量提取出来。由于检测手段的采样频率已经限制了检测结果的高频部分,只需要用检测的结果去除低频误差,就可得到中频部分。根据光学加工和系统像质分析的习惯,将用 37 项泽尼克多项式拟合的面形误差表示面形误差的低频部分,如图 14 所示,中频面形误差的等效空间频率大致为 40, PV 值在  $\lambda/10$  以下。

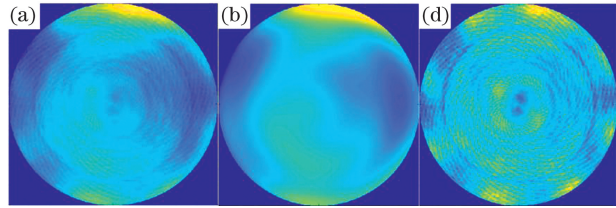


图 14 面形误差示意图。(a)实际制造的面形误差;  
(b)低频面形误差;(c)中频面形误差

Fig.14 Structure of surface errors. (a) Actually manufactured surface errors; (b) low-spatial frequency surface errors; (c) mid-spatial frequency surface errors

可以看出实际制造产生的面形误差要比仿真的面形误差复杂很多,这是因误差由环带和辐条状的误差叠加而成,而且各区域的空间频率也有差异,所以使用仿真的面形不能很好地反映实际的工程结果。

将提取的中频面形误差导入已建好的照明镜组模型中,使相干因子分别为 0.4, 0.6 和 0.8, 分别计算其均匀性和半影宽度,仿真结果如表 3, 均匀性分别为 99.8179%, 99.7863%, 99.6414%, 半影宽度分别为 0.11, 0.15, 0.28 mm。

表 3 各相干因子  $\sigma$ , PV 值下的光场均匀性和半影宽度  
Table 3 Uniformity of illumination field and penumbra width under different PV values and coherence factors

Coherence factor $\sigma$	0.4	0.6	0.8
Illumination field uniformity / %	99.8179	99.7863	99.6414
Penumbra width / mm	0.11	0.15	0.28

仿真结果符合理论的分析,在确定的面形误差下,照明模式的相干因子越大,光场分布越不均匀。通过这种仿真方法,可以在设计阶段就使用实际制造的面形进行仿真,对元件表面的中频面形误差进行分析,进而达到元件表面误差的要求。

## 5 结 论

针对二极照明系统,详细分析和推导了光瞳相干因子和中频面形误差 PV 值对于系统 LSF 和光场均匀性的影响。结果表明,中频面形误差的 PV 值越大,系统 LSF 能量越向次级集中,弥散范围越大,照明光场的能量分布均匀性下降,照明方向的半影宽度大幅增大。对于同一 PV 值频率的误差,相干因子越大,系统 LSF 能量越向极大之外的部分集中,LSF 的级次变得不明显,能量向外扩展,照明光场分布的均匀性下降,并且下降幅度也随相干因子的增大而增大。将仿真的面形导入商用的光学设计软件进行仿真,仿真结果与理论计算的结果大致相符。此外还将实际生产的面形导入模型进行仿真,分析中频面形误差对光场均匀性和半影宽度的影响,判断光场分布是否符合要求,由此说明该仿真方法可以用作光学设计时的容差分析。

### 参 考 文 献

- [1] Achilles K, Uhlendorf K, Ochse D. Tolerancing the impact of mid-spatial frequency surface errors of lenses on distortion and image homogeneity [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9626: 96260A.
- [2] Tohme Y E. Grinding aspheric and freeform micro-optical molds [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6462: 64620K.
- [3] Zeng X F, Zhang X J. Impact of mid-spatial frequency errors in optical manufacturing on modulation transfer function [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 072202. 曾雪锋, 张学军. 光学制造中频残差对光学调制传递函数的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 072202.
- [4] Youngworth R N, Stone B D. Simple estimates for the effects of mid-spatial-frequency surface errors on image quality [J]. Applied Optics, 2000, 39(13): 2198-2209.
- [5] Tamkin J M, Dallas W J, Milster T D. Theory of point-spread function artifacts due to structured mid-spatial frequency surface errors [J]. Applied Optics, 2010, 49(25): 4814-4824.
- [6] Tamkin J M, Milster T D. Effects of structured mid-spatial frequency surface errors on image performance [J]. Applied Optics, 2010, 49(33): 6522-6536.
- [7] Yang W, Huang W, Xu W C, et al. Analysis of mid-spatial frequency surface errors effects on local flare in lithographic projection lens [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0922001.

- 杨旺, 黄玮, 许伟才, 等. 光学表面中频面形误差对光刻物镜短程杂散光影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922001.
- [8] Zeng X, Feng Y, Zhang X. Effects of structured surface errors on MTF of off-axis TMA system[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8416: 84161B.
- [9] Zhang W, Gong Y. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2081-2086.  
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2081-2086.
- [10] Hu Z H, Zhu J, Yang B X, et al. Far-field multi-parameter measurement of diffractive optical element for pupil shaping in lithography system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0908001.  
胡中华, 朱菁, 杨宝喜, 等. 光刻机光瞳整形衍射光学元件远场多参数检测方法[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908001.
- [11] Hu Z H, Yang B X, Zhu J, et al. Pupil shaping techniques in high resolution projection exposure tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(11): 111101.  
胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 高分辨率投影光刻机光瞳整形技术[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 111101.
- [12] Cheng W L, Zhang F, Lin D L, et al. High precision correction method of illumination field uniformity for photolithography illumination system [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0722001.  
程伟林, 张方, 林栋梁, 等. 光刻机照明光场均匀性高精度校正方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0722001.
- [13] Goodman J W. Introduction to fourier optics [M]. New York: McGraw-Hill, 1995: 73-84.
- [14] Gan Y, Zhang F, Zhu S Y, et al. Evaluation algorithm of pupil characteristic parameters in lithography illumination system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304007.  
甘雨, 张方, 朱思羽, 等. 光刻机照明系统光瞳特性参数的评估算法[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304007.
- [15] Liu Z F, Chen M, Bu Y, et al. Blade edge's penumbra measurement for scanning slit of lithographic tools [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004005.  
刘志帆, 陈明, 步扬, 等. 光刻机扫描狭缝刀口半影宽度测量技术[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004005.