

文章编号 1004-924X(2011)01-0056-07

# 制作平面全息光栅的离轴抛物镜/洛埃镜干涉系统

巴音贺希格<sup>1</sup>, 邵先秀<sup>1,2</sup>, 崔继承<sup>1,2</sup>, 李文昊<sup>1</sup>, 齐向东<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**设计和制作具有较高波前平面度和结构稳定的干涉曝光系统是研制高质量平面全息光栅的首要条件。对离轴抛物镜/洛埃镜系统、单透镜/洛埃镜系统、球面反射镜/洛埃镜系统和双分离透镜/洛埃镜系统等 4 种单反射镜干涉曝光系统产生的干涉条纹直线度进行了光线追迹。在干涉场中放置标准光栅, 使用于曝光的两束平行光入射到光栅上, 从而衍射光相干叠加产生莫尔条纹; 并对上述 4 个系统产生的莫尔条纹做了模拟。利用 Zernike 多项式对莫尔条纹进行拟合得到干涉曝光系统的波前像差, 比较了 4 个系统的差异。结果表明, 采用离轴抛物镜/洛埃镜系统中、小口径平面全息光栅是最为合适的。在此基础上, 研制了用于制作最大尺寸为 110 mm×110 mm, 刻线密度 >1 200 l/mm 的平面全息光栅的离轴抛物镜/洛埃镜干涉曝光系统, 在洛埃镜和离轴抛物镜面形精度为  $\lambda/8$  ( $\lambda=632.8$  nm) 的前提下, 平面全息光栅的衍射波前像差为  $0.239\ 6\lambda$  ( $\lambda=550$  nm)。此系统经过消除外界扰动和精细装调后, 可用于制作衍射波前像差达  $\lambda/6\sim\lambda/7$  ( $\lambda=550$  nm) 以上的平面全息光栅。

**关键词:**平面全息光栅; 离轴抛物镜; 洛埃镜; 干涉系统

**中图分类号:** TH744.3; O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111901.0056

## Off-axis parabolic/Lloyd mirror interferometric systems for manufacturing plane holographic gratings

Bayanheshig<sup>1</sup>, SHAO Xian-xiu<sup>1,2</sup>, CUI Ji-cheng<sup>1,2</sup>, LI Wen-hao<sup>1</sup>, QI Xiang-dong<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The design and manufacturing of interferometric exposure systems with high wave-front flatness and structural stability is a paramount condition for development of high-quality holographic diffraction gratings. A ray-tracing was carried out on straightness of the interference fringes arisen from four kinds of interferometric exposure systems of Single Reflective Mirrors (SLR), namely, off-axis parabolic/Lloyd mirror system, single lens/Lloyd mirror system, spherical mirror/Lloyd mirror system and the separation of pairs of lens/Lloyd mirror system. A standard grating was placed in the interferometric field to make two parallel light beams for exposure incident on the grating, so that the diffractive light was superpositioned to appear Moire fringes. Then, the Moire fringes mentioned above

**收稿日期:** 2009-10-22; **修订日期:** 2010-01-18.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 60478043); “十一五”国家科技支撑计划重大项目 (No. 2006BAK03A02); 国家创新方法工作专项项目 (No. 2008IM040700); 国家重大科研装备研制项目 (No. ZBYZ2008-1); 中国科学院重大科研装备研制项目 (No. YZ200804); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20070523, No. 20086013); 长春市应用技术研究计划项目 (No. 08YJ07)

were simulated. The Zernike polynomial was used to fit the Moire fringes to get wavefront aberration of interferometric exposure systems and to compare the differences among the four systems. The results show that the off-axis parabolic/Lloyd mirror system is the most appropriate in production of small-caliber plane holographic gratings. On that basis, the off-axis parabolic/Lloyd mirror interferometric exposure system was manufactured to fabricate plane holographic gratings with a maximum size of  $110\text{ mm}\times 110\text{ mm}$  and the engraved linear density greater than  $1200\text{ l/mm}$ . The diffraction grating wave-front aberration produced by the plane holographic grating is  $0.2396\lambda$  ( $\lambda = 550\text{ nm}$ ), as the mirror face accuracy aberration between off-axis parabolic mirror and Lloyd mirror is  $\lambda/8$  ( $\lambda = 632.8\text{ nm}$ ). This system can be used to produce plane holographic gratings with wave-front aberration in  $\lambda/6 - \lambda/7$  ( $\lambda = 550\text{ nm}$ ), if the external disturbance is overcome and finely tuned.

**Key words:** plane holographic grating; off-axis parabolic mirror; Lloyd mirror; interference system

## 1 引言

与机械刻划光栅相比,全息光栅具有不存在随机或周期性误差引起的“鬼线”,信噪比高<sup>[1]</sup>,制造周期短和成本相对较低等诸多优点,尤其是球面-非球面全息光栅还可以集色散、成像、消像差和波段展宽等功能于一身,大大简化光谱仪器的结构。离子束刻蚀技术的发展又进一步推动了全息光栅的发展,由此闪耀全息光栅应运而生,全息光栅与离子束刻蚀技术的成功结合,极大地提高了全息光栅的衍射效率<sup>[2-5]</sup>。因此,从紫外到可见光波段,全息光栅在常规型光谱仪器领域中的使用日趋普遍,需求量巨大。

全息光栅是利用光刻胶记录两相干光束的干涉条纹,然后经显影工艺转化为浮雕轮廓制作而成的<sup>[6]</sup>。激光干涉系统即曝光系统的性能直接影响全息光栅的质量。就平面全息光栅的制作而言,要求激光光束经曝光系统后产生两束平面波,光刻胶记录的是等间距的直线形干涉条纹。两干涉光束来自同一光源通过分振幅或分波前来获得<sup>[7]</sup>。分振幅需两套准直系统,光路较为复杂,调试难度较大,制作大口径全息光栅需采用此类曝光系统<sup>[8]</sup>。分波前干涉系统则光路相对简单,调试较为容易,制作中、小口径全息光栅采用此类曝光系统较为合适。分波前曝光系统按照调整反射镜的数量可分为双反射镜系统和单反射镜系统<sup>[9-10]</sup>。双反射镜系统通常需要一块同轴使用的准直球面镜或抛物镜为其提供平行光,故至少需

要3块反射镜。单反射镜系统则利用洛埃镜原理设置光路,故只需两块镜子,而且可把洛埃镜和待制作光栅基底安装于同一基座,抗外界扰动方面要优于双反射镜系统,系统装调方便且结构稳定<sup>[11]</sup>。但是,如何选择为洛埃镜提供平行光的准直镜,将直接决定全息光栅的衍射波前质量,衍射波前则影响光栅的分辨本领。

鉴于此,本文在对离轴抛物镜/洛埃镜系统、单透镜/洛埃镜系统、球面反射镜/洛埃镜系统和双分离透镜/洛埃镜系统等单反射镜干涉曝光系统做出系统评价的基础上,选择离轴抛物镜/洛埃镜系统作为研制平面全息光栅的干涉曝光系统。目前,所研制的干涉曝光系统已投入全息光栅的制作中。

## 2 全息光栅曝光系统的设计

### 2.1 曝光系统工作原理及反射镜规格

为了叙述方便,以最后选取并研制的离轴抛物镜/洛埃镜干涉系统为例予以说明。如图1所示,激光束经空间滤波器后变成球面波到达准直反射镜,经准直后变成平行光(平面波);在准直反射镜的对面放置调整反射镜,通过改变调整反射镜的方向,使其反射光与来自于准直反射镜的平行光之间的夹角符合待制作光栅刻线密度的要求,在这两束反射平行光形成的干涉场中放置涂有光致抗蚀剂的光栅基底来记录干涉条纹。

光栅基底与调整反射镜即洛埃镜安装于同一转台上,光栅周期决定于两束反射光之间的夹

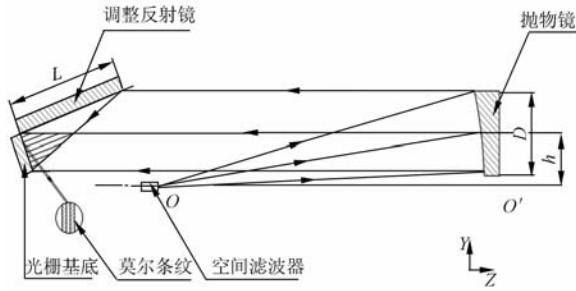


图 1 离轴抛物镜/洛埃镜系统示意图(俯视图)

Fig. 1 Schematic diagram of off-axis parabolic/Lloyd's mirror system(planform)

角  $2\theta$ , 即<sup>[9-11]</sup>

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta}, \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为激光光源波长。当转台逆时针旋转时,  $\theta$  角变大, 可制作刻线密度大的光栅; 反之亦然。

本曝光系统将用于制作最大尺寸为  $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ , 刻线密度  $> 1\,200 \text{ l/mm}$  的全息光栅。如图 1 所示,  $O$  点为空间滤波器出瞳, 可视为点光源, 位于准直镜焦点处,  $OO'$  为光轴。Kr<sup>+</sup> 激光器输出波长为  $413.1 \text{ nm}$ 。以制作  $1\,200 \text{ l/mm}$  光栅计算, 由式(1)知,  $\theta = 14.35^\circ$ , 故洛埃镜的长度  $L$  取  $390 \text{ mm}$ , 高度则为  $110 \text{ mm}$ 。根据调整反射镜和光栅基底在抛物镜上的投影可知抛物镜的有效使用面积为  $110 \text{ mm} \times 277 \text{ mm}$ , 其矩形的对角线长度为  $298 \text{ mm}$ , 离轴抛物镜用于产生平面波的有效口径  $D$  应大于此值, 实际取为  $320 \text{ mm}$ , 离轴量  $h$  为  $220 \text{ mm}$ , 焦距为  $1\,200 \text{ mm}$ 。

## 2.2 4 种曝光系统的比较

4 种系统都属于洛埃镜装置, 只是准直镜不同。(1)离轴使用的抛物镜/洛埃镜系统;(2)同轴使用的单透镜/洛埃镜系统;(3)避免中心遮拦离轴使用的球面反射镜/洛埃镜系统;(4)考虑到制作较大口径的胶合透镜困难, 选用非胶合双分离透镜作为准直镜的双分离透镜/洛埃镜系统。

### 2.2.1 准直镜的像差分析

制作平面全息光栅需要两束相干平行光, 而单反射镜系统中只有准直镜的球差影响相干光束的平行度。图 2(a)至(d)分别给出了离轴抛物镜、单透镜、球面反射镜和双分离透镜的球差曲线。

在计算时, 准直镜口径均为  $320 \text{ mm}$ , 焦距均为  $1\,200 \text{ mm}$ , 离轴抛物镜和球面反射镜的离轴量

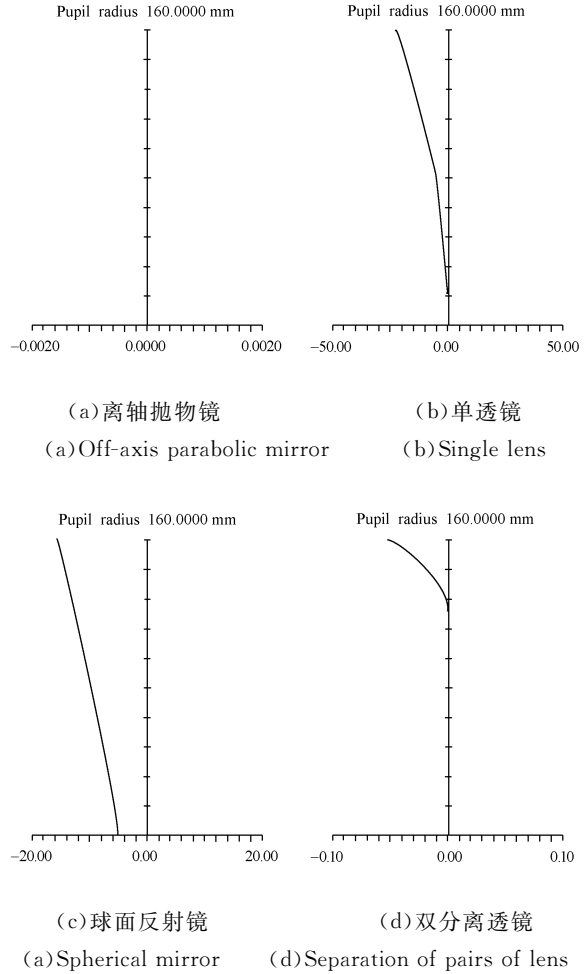


图 2 准直镜球差曲线

Fig. 2 Spherical aberration curves of collimating lenses

取  $220 \text{ mm}$ 。离轴抛物镜、单透镜、球面反射镜和双分离透镜的 Seidel 像差函数中球差系数分别为  $0, 142.58, -27.4985$  和  $0.737$ 。可以看出, 离轴抛物镜球差为零, 说明发自焦点的球面波经离轴抛物面反射后成为严格的平面波; 单透镜和球面反射镜球差较大, 双分离透镜球差相对较小。

### 2.2.2 待制作光栅基底上的干涉条纹模拟

平面全息光栅需要记录平行等间距的直线形干涉条纹, 为此, 分别对不同单反射镜系统的干涉场进行了数值仿真, 而且假定洛埃镜和准直镜都是理想的, 不存在加工误差。考虑到  $1\,200 \text{ l/mm}$  的干涉条纹密度太大, 不便于直观地评价干涉场, 于是, 通过追迹 128 条光线对干涉条纹的质量做出了定性判断。图 3(a)至(d)分别给出了离轴抛物镜/洛埃镜系统、单透镜/洛埃镜系统、球面反射镜/洛埃镜系统和双分离透镜/洛埃镜系统的干涉条纹模拟结果。可以看出, 离轴抛物镜和双分离

透镜系统下的干涉条纹为直条纹;单透镜系统下的干涉条纹边缘弯曲;球面反射镜系统下的干涉条纹出现环形,无法用于制作平面全息光栅。

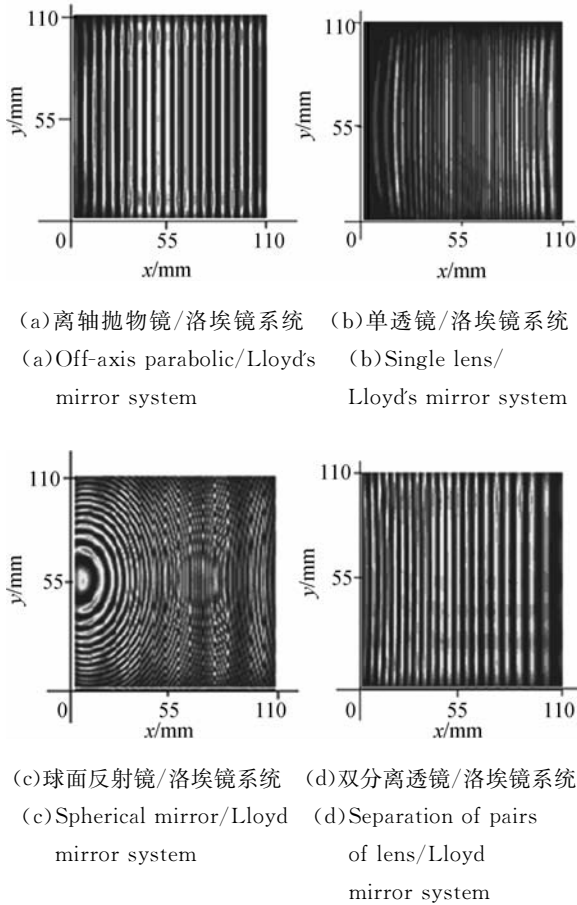


图 3 四种曝光系统下的干涉条纹模拟结果

Fig. 3 Fitting results of interference fringes in the four exposure systems

### 2.2.3 标准光栅的莫尔条纹及其 Zernike 多项式拟合

制作平面全息光栅时,由于干涉场中的干涉条纹密度很大,周期结构的特征尺度一般为微米或亚微米量级,在实验中无法直接观察到干涉条纹。但是,可以采用如图 1 所示的方法,间接观察干涉条纹质量,进而判断干涉曝光系统的波前像差。基本方式<sup>[9-10]</sup>是在光栅基底处放置一个与待制作全息光栅光栅常数相同(如 1 200 l/mm)的标准光栅,干涉曝光光路中来自于调整反射镜的记录光经标准光栅衍射的+1 级衍射光与来自于离轴抛物镜的记录光经标准光栅衍射的-2 级衍射光相叠加,适当调整调整反射镜与光栅衍射的相对位置,便可在视场中产生干涉条纹,通常也称为莫尔条纹,莫尔条纹反应干涉曝光系统的波

前质量。

图 4(a)至(d)分别给出了离轴抛物镜/洛埃镜系统、单透镜/洛埃镜系统、球面反射镜/洛埃镜系统和双分离透镜/洛埃镜系统条件下的莫尔条纹模拟结果,并假定洛埃镜、准直镜以及标准光栅都是理想的。由于在衍射光方向观察,莫尔条纹的尺寸为 110 mm×98 mm。可以看出,在离轴抛物镜和双分离透镜系统下得到的莫尔条纹为直条纹;在单透镜/洛埃镜系统下得到的莫尔条纹边缘出现弯曲;在球面反射镜/洛埃镜系统下得到的莫尔条纹出现圆环,说明该干涉曝光系统明显不符合平面全息光栅制作要求。

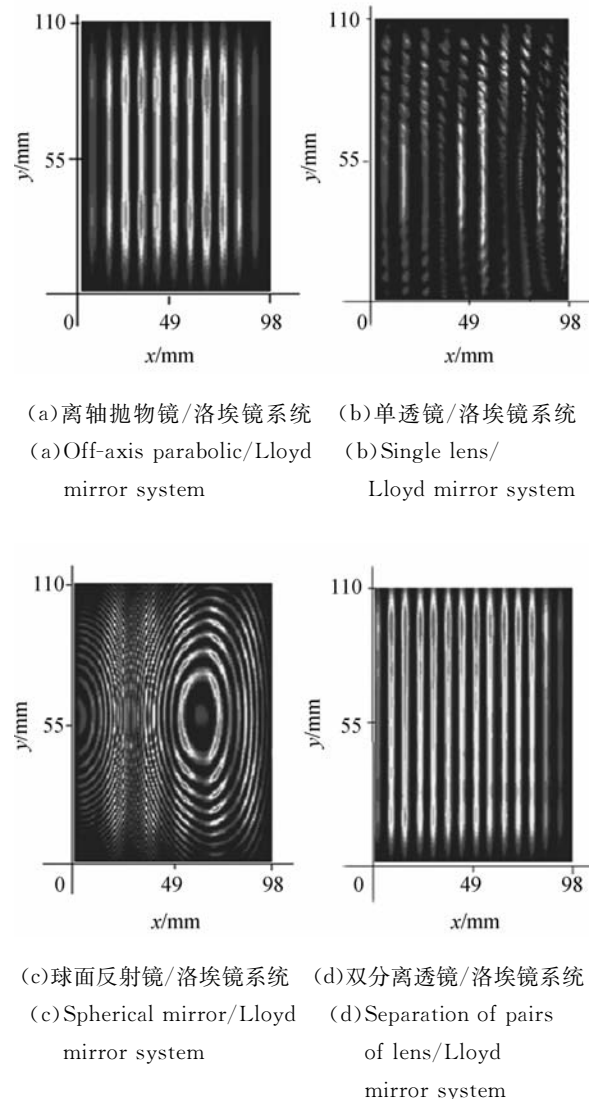


图 4 4 种曝光系统下标准光栅的莫尔条纹模拟结果

Fig. 4 Fitting results of interference fringes of standard gratings in four exposure systems

图 3 和图 4 给出的仅为软件模拟结果,不能给出干涉曝光系统具体的波前质量。由于 Zernike 多项式对波前的拟合精度高,并且与光学系统的 Seidel 像差函数很容易建立起联系,因此,可以利用 Zernike 多项式对莫尔条纹进行拟合得到干涉曝光系统波前像差。

本文采用 Gram-Schmidt 正交化方法<sup>[12]</sup> 求出 Zernike 多项式拟合莫尔条纹的系数 A, 即

$$A = B^T C, \quad (2)$$

其中,

$$B_{ij} = \begin{cases} 0 & (i < j) \\ \left[ \sum_{\sigma} W Z_i^2 - \sum_{r=1}^{i-1} \left( \sum_{\sigma} W Z_i V_r \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} & (i = j) \\ \sum_{r=1}^{i-1} \left[ \left( \sum_{\sigma} W Z_i V_r \right) B_{ij} B_{rj} \right] & (i > j) \end{cases}, \quad (3)$$

$$V_i = \frac{Z_i - \sum_{r=1}^{i-1} V_r \sum_{\sigma} W Z_i V_r}{\left[ \sum_{\sigma} W Z_i^2 - \sum_{r=1}^{i-1} \left( \sum_{\sigma} W Z_i V_r \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

$$\sum_{\sigma} V_{r_1} V_{r_2} W = \begin{cases} 0 & (r_1 \neq r_2) \\ 1 & (r_1 = r_2) \end{cases}, \quad (5)$$

$$C_i = \sum_{\sigma} W x V_i, \quad (6)$$

式(3)~(6)中,  $\sigma$  为所取数据点的集合。W 是非负权函数,其作用是使在权较大的区域内近似更为精确,一般情况取  $W = 1$ 。  $x(\rho, \theta)$  为实际干涉图样,即莫尔条纹, Z 为 Zernike 多项式。

波前像差用 3 级像差多项式来表示为

$$W(\rho, \theta) = a_0 + \sum_{n=1}^2 [a_n R_n^0(\rho) + \sum_{m=1}^2 R_n^m(\rho) \rho^m (b_{nm} \cos m\theta + c_{nm} \sin m\theta)], \quad (7)$$

表 2 2 种曝光系统的调整误差与波前像差 P-V 值

Tab. 2 Adjustment errors and P-V values of wave-front aberration from two exposure systems

干涉系统	y 轴偏 0.5 mm	x 轴偏 0.5 mm	绕 x 轴转 0.5°	绕 y 轴转 0.5°	$\theta$ 减小 0.007°	离焦 10 mm
离轴抛物镜系统	0.208 6	0.028 6	0.340 2	0.326 9	0.074 9	0.085 9
双分离透镜系统	0.229 2	0.088 6	0.529 2	0.044 5	0.210 1	0.137 3

由表 2 看出,双分离透镜/洛埃镜系统单镜调整误差引入的波前像差 P-V 值,除绕 y 轴旋转之外,其它都大于离轴抛物镜/洛埃镜系统。如果考虑两块透镜调整误差引入的波前像差就会更大。

式中,  $R_n^m(\rho) \rho^m$  为 Zernike 多项式径向函数表达式。可以由 Zernike 多项式拟合系数很方便地得出波前像差的 P-V 值,其数值就是实际波前和理想波前之间的最大偏差,也可以得到波前像差的 RMS 值,即

$$\sigma^2 = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{a_n^2}{2n+1} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^n \frac{b_{nm}^2 + c_{nm}^2}{2n+1-m} \right], \quad (8)$$

其中,  $a_n, b_{nm}, c_{nm}$  分别为对应的 Zernike 多项式的拟合系数。表 1 给出的是对图 4(a), (b) 和 (d) 所示莫尔条纹模拟结果的 Zernike 多项式拟合系数求得的波前像差 P-V 值和 RMS 值。

表 1 3 种曝光系统的波前像差 P-V 值和 RMS 值

Tab. 1 P-V and RMS values of wave-front aberration in three exposure systems

曝光系统	P-V/ $\lambda$	RMS/ $\lambda$
	( $\lambda = 413.1 \text{ nm}$ )	( $\lambda = 413.1 \text{ nm}$ )
离轴抛物镜系统	0.001 30	0.000 75
单透镜系统	0.103 73	0.088 93
双分离透镜系统	0.001 65	0.000 82

由表 1 看出,在洛埃镜和单透镜都是理想状态下,单透镜系统的波前像差 P-V 值已不足  $\lambda/10$ ,可实际的光学系统波前像差 P-V 值要大得多,所以单透镜/洛埃镜系统不适合于制作平面全息光栅。

选择干涉曝光系统不仅要看波前质量,还要考虑系统的稳定性和调试难度。表 2 给出的是离轴抛物镜/洛埃镜系统和双分离透镜/洛埃镜系统存在调整误差情况下的波前像差 P-V 值。在做双分离透镜系统的莫尔条纹模拟时,固定其中一个透镜。

另外,从加工难度考虑,双分离透镜的面形及一致性不易保证。

综上所述,选择离轴抛物镜/洛埃镜系统作为研制平面全息光栅的干涉曝光系统较为合理。

### 3 实验结果

根据制作常规型光谱仪器用平面全息光栅的实际需要,在长春光机所光学技术中心加工了洛埃镜和离轴抛物镜,面形精度要求为  $\lambda/8$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。图 5 为由 Zygo 干涉仪测得的离轴抛物镜面形误差,测量值为  $0.116\lambda$ ,完全达到了设计要求。

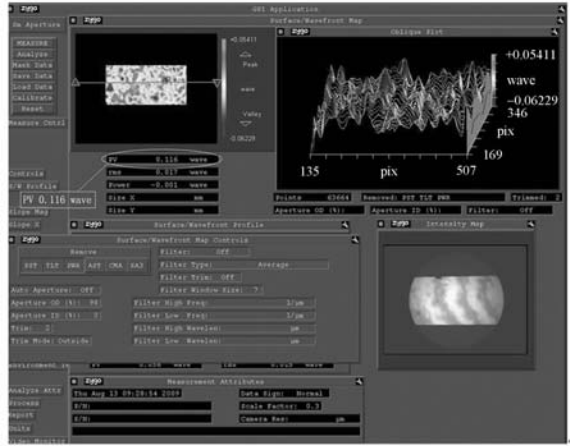


图 5 抛物镜面形误差

Fig. 5 Shape error of parabolic mirror

图 6 为在离轴抛物镜/洛埃镜系统中摄得的莫尔条纹,由于标准光栅 ( $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ ,  $1\ 200 \text{ l/mm}$ ) 基底存在面形误差,实验调节尚不到位和空气扰动等因素的存在使莫尔条纹局部不够直,Zernike 多项式拟合结果为接近  $\lambda/5$ ,见表 3。图 7 为试制出的  $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ ,  $1\ 200 \text{ l/mm}$  平面全息光栅,利用泰曼干涉仪测得的衍射波前干涉图,其中同样包括仪器光学系统像差和光栅基底的误差,波前像差见表 3。

表 3 干涉曝光系统莫尔条纹与全息光栅的衍射波前干涉图及其波前像差

Tab. 3 Diffraction wave-front interference patterns and wave-front aberration of interferometric exposure system Moire fringe and holographic grating

波前像差	P-V	RMS
莫尔条纹 ( $\lambda = 413.1 \text{ nm}$ )	0.200 $7\lambda$	0.101 $2\lambda$
衍射波前干涉图 ( $\lambda = 550 \text{ nm}$ )	0.239 $6\lambda$	0.113 $2\lambda$



图 6 离轴抛物镜系统的莫尔条纹

Fig. 6 Moire fringe of off-axis parabolic system

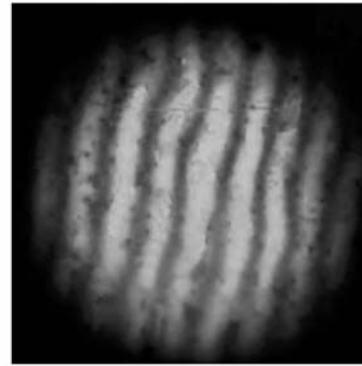


图 7 全息光栅衍射波前干涉图

Fig. 7 Wave-front diffraction pattern of holographic grating

### 4 结 论

本文分析、对比了离轴抛物镜/洛埃镜系统、单透镜/洛埃镜系统、球面反射镜/洛埃镜系统和双分离透镜/洛埃镜系统等单反射镜干涉曝光系统制作平面全息光栅时的干涉场像差校正能力,得到如下结论:离轴抛物镜/洛埃镜系统和双分离透镜/洛埃镜系统具有较为优越的波前质量,理论波前像差分别可以达到  $0.001\ 30\lambda$  和  $0.001\ 65\lambda$  ( $\lambda = 413.1 \text{ nm}$ )。但是,双分离透镜的加工和装调难度大,这两点又会影响到实际的系统波前质量,而且抗外界扰动能力不及离轴抛物镜/洛埃镜系统,因此,制作中、小口径平面全息光栅采用离轴抛物镜/洛埃镜系统是合适的。在洛埃镜和离轴抛物镜面形精度为  $\lambda/8$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) 的前提下,

试制的 110 mm×110 mm, 1 200 l/mm 平面全息光栅的衍射波前像差为  $0.2396\lambda$  ( $\lambda=550\text{ nm}$ )。完善曝光隔振平台和减小空气湍流扰动后, 对本

系统加以精调会进一步提高波前质量, 可以使光栅的衍射波前像差提高到接近  $\lambda/6$ , 若制作口径  $<70\text{ mm}\times 70\text{ mm}$  的平面全息光栅则更为容易。

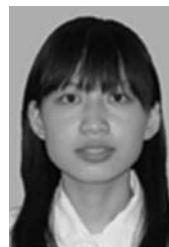
## 参考文献:

- [1] 巴音贺希格, 李燕, 吴娜, 等. 紫外平面刻划光栅杂散光数值分析及测试[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(8):1783-1789.  
BAYANHESHIG, LI Y, WU N, *et al.*. Numerical analysis and measurement method of stray light for UV ruled gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1783-1789. (in Chinese)
- [2] SCHMAHL G, RODOLPH D. Holographic diffraction grating[J]. *Progress in Optics*, 1976, 14:197-244.
- [3] MASHEV L, TONCHEV S. Formation of blazed holographic diffraction gratings[J]. *Appl. Phys.*, 1982, B28: 349-353.
- [4] FLAMAND J, BONNEMASON F, THEVENON A. The blazing of holographic gratings using ion-etching[J]. *SPIE*, 1989, 1055:288-294.
- [5] HARADA T, SAKUMA H T, FUSE M. Fabrication of blazed gratings and grisms utilizing anisotropic etching of silicon[J]. *SPIE*, 1998, 3450:11-16.
- [6] 巴音贺希格, 张浩泰, 李文昊. 凹球面基底离心式涂胶的数学模型及实验验证[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(2):229-234.  
BAYANHESHIG, ZANG H T, LI W H. Mathematic model and experiment verification of spin-coating on concave spherical substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):229-234. (in Chinese)
- [7] 徐向东. 全息离子束刻蚀真空紫外及软 X 射线衍射光栅研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2001.  
XU X D. *Fabrication of VUV and soft X ray dif-*
- fraction gratings by holographic ion beam etching technique* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2001. (in Chinese)
- [8] 王诗华, 吴建宏, 李朝明. 用平凸透镜系统制作大口径光栅的像差分析[J]. 激光杂志, 2007, 28(6):48-50.  
WANG SH H, WU J H, LI CH M. Wavefront aberration analysis of large-aperture grating fabricated by using plano-convex lens [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(6):48-50. (in Chinese)
- [9] 巴音贺希格. 衍射光栅色散理论与光栅设计、制作和检验方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.  
BAYANHESHIG. *The study on the dispersion theory, design, manufacture, and efficiency test of diffraction gratings* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [10] 李文昊. 平面及 IV 型凹面全息光栅曝光系统设计及掩模制作关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.  
LI W H. *Study on the plane holographic grating and IV-type concave holographic grating design and manufacture technology of holographic grating* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [11] 祝绍箕. 制造全息光栅的新装置[J]. 光学学报, 1990, 10(2):189-192.  
ZHU SH J. A new device for manufacturing holographic gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, 10(2):189-192. (in Chinese)
- [12] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. New York: John Wiley and Sons, 2007.

## 作者简介:



巴音贺希格(1962—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 理学博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: bayin888@sina.com



邵先秀(1982—), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事平面全息光栅制作中干涉场校正技术的研究。E-mail: shxx201@sina.com



崔继承(1976—),男,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,主要从事光学设计理论及光谱仪器设计的研究。E-mail:jicheng\_cui@yahoo.com.cn



齐向东(1965—),男,吉林辽源人,研究员,博士生导师,主要从事光栅刻划机研究及衍射光栅研制。E-mail:china-grating@263.net



李文昊(1980—),男,内蒙古赤峰人,工学博士,副研究员,主要从事全息光栅设计及制作技术的研究。E-mail:leewenho@163.com

(本栏目编辑:严寒)

## ● 下期预告

# 半导体量子点材料在 Nd:YAG 激光辐照下的非线性效应

P. Kumbhakar

(Department of Physics, Nanoscience Laboratory,  
National Institute of Technology Durgapur, 713209 India)

使用 10 ns 脉冲调 Q Nd:YAG 激光器 Z-scan 辐照技术,测量了化学合成的无掺杂的硫化锌量子点(QDs)以及掺杂  $Mn^{2+}$  的硫化锌量子点(QDs)的非线性光学性质。合成材料纳米结构的特点在于使用了透射电镜技术以及 X 射线衍射技术。在室温下,分别利用紫外到可见光的分光光度计和分光荧光计测量了人工合成 QDs 胶体溶液的线性光学吸收特性以及光致发光的发射特性。样品的吸收特性表明,由于量子限制效应样品的截止吸收低于硫化锌的截止吸收。掺杂  $Mn^{2+}$  的硫化锌样品显示出明显的光致发光现象,发射峰大约在 580 nm,而无掺杂的硫化锌样品在紫外区辐射,发射峰大约在 365 nm。通过测量样品在紫外到可见光的吸收特性并分析透射电镜技术和光致发光的分析数据,测定了硫化锌样品的平均粒度(半径)大约是 1.2 nm。分析开放光圈(OA)Z-scan 的实验数据,发现了在 1 064 nm 处两种试验样品都会发生四光子吸收现象。拟合实验数据得到了两种试验样品的 FPA 系数以及 FPA 横截面。ZnS QD 的 FPA 横截面的计算值是  $4.9 \times 10^{-106} \text{ cm}^8 \text{ s}^3 \text{ photon}^{-3}$ ,比硫化锌的 FPA 横截面大了五个数量级,而且人工合成的 ZnS QD 也有光学限制的性质。掺  $Mn^{2+}$  离子的样品具有大的 FPA 横截面并且在可见光区有高的发光效率,这两个特点使得这种材料适合用于多光子荧光成像应用的材料。