

曝光系统离焦对平面全息光栅衍射波前的影响

徐福全¹, 金 陆², 李文昊³, 裴 舒³, 巴音贺希格³, 齐向东³

(1. 内蒙古民族高等专科学校, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 电子科技大学 微电子与固体电子学院, 四川 成都 610054;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 波前像差是衍射光栅的重要技术指标,它直接影响光栅的分辨率。由光致刻蚀剂记录两束相干光干涉条纹是制作全息光栅的关键步骤。为了提高全息光栅曝光系统调整精度、减小离焦、降低光栅的衍射波前像差,从离焦对反射球面准直镜的准直光平行度的影响程度出发,分析了准直光平行度对全息光栅衍射波前像差的影响。理论分析和数值模拟结果表明,准直镜调整误差直接决定全息光栅衍射波前像差大小。以3种不同刻线密度光栅为例,得出了准直镜调整误差的允许变化范围。

关键词 全息光栅;曝光系统;离焦;衍射波前

中图分类号:O436.1;O438.2 文献标识码:A

Influence of defocus of exposure system on diffraction wave front of plane holographic grating

XU Fu-quan¹, JIN Lu², LI Wen-hao³, PEI Shu³, Bayanheshig³, QI Xiang-dong³

(1. Inner Mongol Nationality College Hohhot 010051, China;

2. College of Microelectronics and Solid-state Electronics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: As one of the important technical specifications of diffraction grating, diffraction wave front aberration directly affects the grating resolution. Recording the interference fringe produced from two coherent light beams by use of photoresist is a key process in manufacturing a holographic grating. According to the influence of defocus on collimating light parallelism of reflecting spherical collimating mirror, this paper analyzes the influence of collimating light parallelism on the wave front of holographic grating to improve setting accuracy.

收稿日期 2008-09-11;修订日期 2008-10-22.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(No. 60478043);中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金”资助项目(No. 072031G070);“十一五”国家科技支撑计划重大项目(No. 2006BAK03A02);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20070523, No. 20086013).

minimize defocus of exposure system in holographic grating , and to reduce diffraction wave front aberration of grating. The results of theoretic analysis and numerical simulation show that diffraction wave front aberration of grating is directly determined by the adjusting error of collimating mirror. In addition , by taking three kinds of gratings with different ruling densities for examples , the allowable range of adjusting error of collimating mirror is obtained.

Key words : holographic grating , exposure system , defocus , diffraction wave front

1 引言

光栅的衍射波前像差是衍射光栅非常重要的技术指标。衍射波前像差即光栅的实际衍射波前与理想的无偏差状态下的衍射波前之间的偏差,它决定光栅的分辨率,对于平面全息光栅的性能具有重要影响^[1-2]。

当两束相干光相遇时会产生一系列干涉条纹,使用光敏材料记录干涉条纹会产生光栅刻槽,形成全息光栅^[3-5]。由于光栅刻槽取决于干涉条纹,所以用这种方法制作的光栅不存在机械刻划造成的随机性和周期性误差。全息光栅的制作要在激光干涉系统中完成,也就是通常所说的曝光系统,曝光系统的好坏直接影响全息光栅的质量,因此,必须对曝光系统进行很好的设计和调试^[6-9]。

全息光栅曝光光路由激光器、空间滤波器、准直镜和调整反射镜组成。激光束经空间滤波器后变成波源点位于空间滤波器针孔位置的球面波,经准直镜后变成平行光束,在平行光束传播路径中放置调整反射镜,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相遇形成干涉场,在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而形成光栅。在全息光栅曝光光路的调试过程中,由于球面波波源点不能严格摆放在准直镜焦点位置而产生离焦,准直光平行度将会变差,使得光栅条纹间距发生变化,从而引入光栅的衍射波前像差,所以在调试时会产生一定的调整误差。鉴于此,本文在假定光学加工面形精度满足使用要求情况下,从离焦对反射球面准直镜产生的准直光平行度的影响程度出发,分析了准直光平行度对全息光栅衍射波前像差的影响程度,进而得出球面反射准直镜调整误

差的允许变化范围。在此基础上,归纳出实用的曝光系统调整方法,得出了曝光系统调整过程中离焦的许可变化范围,为曝光系统精密调整提供了理论依据。

2 数学模型

2.1 全息曝光系统

图 1 为全息曝光的实验装置,由 Kr^+ 激光器发出一束单色光,经平面反射镜 1 和平面反射镜 2 反射之后到达空间滤波器后变为球面波,经准

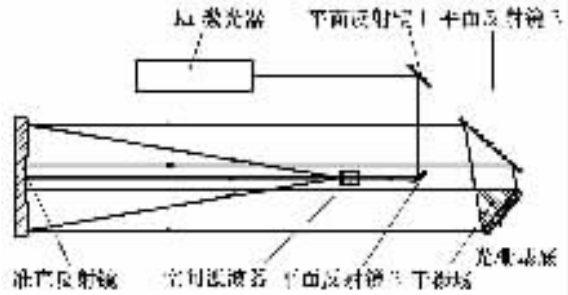


图 1 全息曝光光路图

Fig. 1 Light path of holographic exposure

直后变成平行光束。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。那么,待制作光栅刻线间距 d 为:

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

式中, λ 是入射光波长, n 是记录空间的折射率, θ 为两相干光束夹角之半, δ 为基底法线与两光束夹角的角平分线之间所成的角。光栅条纹间距 d 的误差直接影响光栅的衍射波前,决定光栅的波前像差。

2.2 光束在准直反射镜表面的传播

在图 2 中, O 为准直反射镜顶点, D 为曲率中

心 OD 为准直反射镜主光轴 A 为球面波波源点。

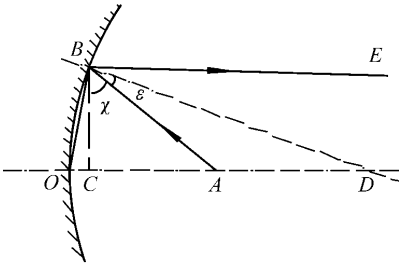


图 2 准直光光路示意图

Fig. 2 Scheme of collimating light path

自 A 点发出的光线照射在准直反射镜上的 B 点，

$$\eta = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{L - R_0 + \sqrt{R_0^2 - r^2}}{r}\right) - 2\arcsin\left\{\frac{R_0 - L}{R_0} \cos\left[\arctan\left(\frac{L - R_0 + \sqrt{R_0^2 - r^2}}{r}\right)\right]\right\}, \quad (3)$$

2.3 光栅衍射波前像差的产生

按光谱仪的使用要求,优质衍射光栅所衍射的波前像差不应大于 $\lambda/6 - \lambda/10^{[10]}$,本文取其为 $\lambda/10$ 。

光栅刻槽误差是产生衍射波前像差的主要原因,刻槽误差是指光栅实际刻槽位置与理想位置的偏差。当光栅用于自准直情况时,刻槽误差所产生的波前像差为:

$$\Delta(\eta) = 2\Delta d \sin\theta_m, \quad (4)$$

其中 Δd 、 θ_m 和 $\Delta(\eta)$ 分别表示刻槽误差、衍射角和衍射波前像差。

对式(1)取微分有:

$$\Delta(\eta) = 2 \cdot \left(-\frac{\lambda_0}{2\cos\delta} \cdot \frac{\cos\theta}{\sin^2\theta} \cdot \Delta\theta\right) \cdot \left(\frac{m\lambda \sin\theta \cos\delta}{\lambda_0}\right) = -m\lambda \cdot \frac{1}{\tan\theta} \cdot \Delta\theta, \quad (8)$$

由式(8)可知全息光栅衍射波前像差与光栅使用级次、两束记录光夹角以及夹角误差有关。

3 精度分析

3.1 准直镜通光孔径及离焦调整误差对准直光平行度的影响

取准直反射镜曲率半径 $R_0 = 2\,400\text{ mm}$, 焦距 $f_0 = 1\,200\text{ mm}$, 准直反射镜通光孔径最大为 $2r = 320\text{ mm}$ 。

准直光平行度主要受准直镜通光孔径以及离焦调整误差的影响:

经准直镜反射后沿 BE 方向出射,自 B 点做主光轴 OD 的垂线 BC 。实际传播时,由于球差以及离焦的影响,光线 BE 并不与准直反射镜主光轴平行,存在一定的偏角 η ,定义 η 为准直光的平行度。

假设准直反射镜曲率半径为 R_0 ,准直反射镜通光孔径为 $2r$,波源点 A 到准直反射镜顶点 O 的距离为 L , $\angle ABC = \chi$, $\angle ABD = \varepsilon$,则准直光的平行度 η 可以表示为:

$$\eta = \frac{\pi}{2} - \chi - 2\varepsilon, \quad (2)$$

根据三角形几何关系,经过推导可得:

$$\Delta d = -\frac{\lambda_0}{2\cos\delta} \cdot \frac{\cos\theta}{\sin^2\theta} \cdot \Delta\theta, \quad (5)$$

其中 Δd 为刻槽误差, $\Delta\theta$ 为两束记录光夹角的变化量。

当衍射光栅使用在自准直情况下有:

$$2d\sin\theta_m = m\lambda, \quad (6)$$

其中 λ 为使用波长, θ 为 m 级的衍射角。

将式(1)代入式(6)可得到:

$$\sin\theta_m = \frac{m\lambda}{2d} = \frac{m\lambda \sin\theta \cos\delta}{\lambda_0}, \quad (7)$$

将式(5)、(7)代入式(4)可得到:

(1)准直镜通光孔径对准直光平行度的影响。

准直反射镜焦距 $f_0 = 1\,200\text{ mm}$,当球面波波源点不是恰好放置在准直反射镜焦点位置,而是有一定的位置偏移 ΔL 时:

$$\Delta L = L - f_0, \quad (9)$$

令球面波波源点位于准直反射镜焦点位置,可得到不同离焦量下不同通光孔径处准直光的平行度。

从图3可以看出,相同离焦量的情况下,随着准直镜通光孔径的增大,准直光平行度越来越差,实际工作中应尽量使用准直光束的中间部分。

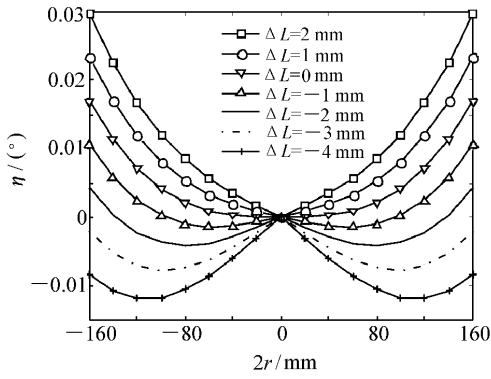


图 3 不同离焦量时准直镜通光孔径对准直光平行度的影响

Fig. 3 Influence of aperture of collimating mirror on collimating light parallelism at different defocusing amounts

(2) 离焦量对准直光平行度的影响。

图 4 是离焦量对不同通光孔径处准直光平行度的影响关系图。

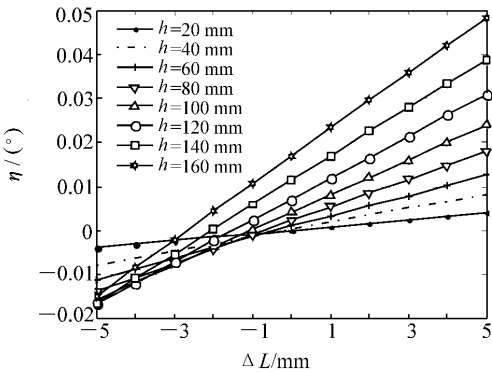


图 4 离焦量对不同通光孔径处准直光平行度的影响

Fig. 4 Influence of defocusing amount on collimating light parallelism at different apertures of collimating mirror

从图 4 中可以看出,当 $\Delta L < 0$ 时,相同离焦量引起的准直光平行度要比 $\Delta L > 0$ 时相同离焦量引起的准直光平行度好一些。实际上,离焦量能够控制在 ± 1 mm 之内,得到的准直光平行度 $\eta < 0.025^\circ$ 。

当 $\Delta L = -2 \sim -3$ mm 时,离焦量引起的准直光平行度在准直镜整个通光孔径内的均方根值最小。

3.2 准直光平行度对光栅衍射波前的影响

假设光栅使用在 -1 级,图 5 表示两束记录光夹角变化对不同刻线密度光栅衍射波前像差的影响。从图中可以看出,随着两记录光束夹角变化量 $\Delta\theta$ 的增大,光栅衍射波前像差 $\Delta(\eta)$ 会越来越大,并且光栅刻线密度越来越低,对衍射波前像差影响更加明显。

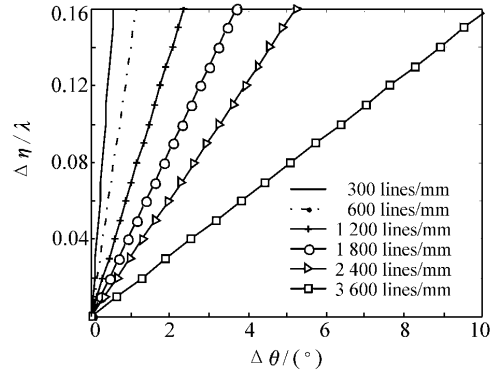


图 5 两束记录光夹角变化对不同刻线密度光栅衍射波前像差的影响

Fig. 5 Influence of the angle of two recording lights on wave front of holographic grating with different ruling densities

当光栅衍射波前像差要求 $\lambda/10$ 时,图 6 表示不同刻线密度光栅在不同级次使用时对两记录光束夹角变化量 $\Delta\theta$ 的要求。

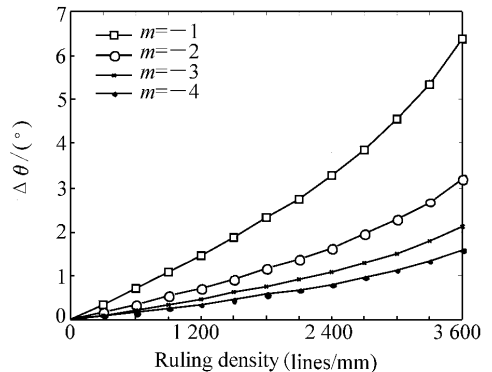


图 6 不同刻线密度光栅在不同级次使用时对两束记录光夹角变化的要求

Fig. 6 Two recording light angle's change requested by grating with different ruling densities used in the different orders

从图 6 中可以看出,使用在相同级次下,随着

光栅刻线密度增大,对两记录光束夹角变化量 $\Delta\theta$ 要求越低。

对于 1 200 lines/mm 光栅,当光栅波前像差要求为 $\lambda/10$,在 -1 级使用时, $\Delta\theta = 1.46^\circ$;在 -2 级使用时, $\Delta\theta = 0.73^\circ$ 。

对于 300 lines/mm 光栅,当光栅波前像差要求 $\lambda/10$,在 -1 级使用时, $\Delta\theta = 0.356^\circ$;在 -4 级使用时, $\Delta\theta = 0.089^\circ$ 。

1 200 lines/mm 光栅在 -1 级使用与 300 lines/mm 在 -4 级使用可以得到相同的色散效果,但是从制作全息光栅方面讲,对记录系统的精度要求提高了 16 倍。

对于 3 600 lines/mm 光栅,当光栅波前像差要求为 $\lambda/10$,在 -1 级使用时, $\Delta\theta = 6.371^\circ$ 。

当光栅使用在 -1 级和较低级次或者光栅刻线密度较高时,对准直光的平行度要求不严格,如

果光栅用于高级次或者光栅刻线密度较低时,对准直光的平行度要求会大大提高。

4 结 论

本文在分析离焦对反射球面准直镜产生的准直光平行度的影响程度的基础上,探讨了准直光平行度对全息光栅衍射波前像差的影响程度;对于引起衍射波前像差的主要原因——光栅刻槽误差,按照光栅衍射波前像差 $< \lambda/10$ 的要求,反推出光栅刻槽误差的允许变化范围,进而得到不同刻线密度光栅使用在不同级次时对两记录光束夹角变化量 $\Delta\theta$ 的要求,并计算出准直镜调整的误差允许变化范围;在此基础上,归纳出实用的曝光系统调整方法,为曝光系统精密调整提供了理论依据。

参考文献:

- [1] ANTOINE L,JEAN F. Spectrographic performance of holographically made diffraction gratings[J]. *Opt. Comm.*,1969,1(1) 5-8.
- [2] 吴国安.光谱仪器设计[M].北京:科学出版社,1978.
WU G A. *Spectrometer Design*[M]. Beijing: Science Press,1978.(in Chinese)
- [3] LOEWEN E G,POPOV E. *Diffraction Gratings and Applications*[M]. New York:Marcel Dekker,1997.
- [4] SCHMAHL G,RODOLPH D. Holographic diffraction grating[J]. *Progress in Optics*,1976,14:197-244.
- [5] PALMER C,LOEWEN E G. *Diffraction Grating Handbook*[M]. New York:Newport Corporation,2005.
- [6] MASHEV L,TONCHEN S. Formation of blazing holographic diffraction gratings[J]. *Appl. Phys.*,1982,B28:349-353.
- [7] 赵博,齐向东.高效平面全息衍射光栅的获取方法[J].*光学精密工程*,2001,9(2):109-114.
ZHAO B,QI X D. Manufacturing of high efficient holographic diffraction gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*,2001,9(2):109-114.(in Chinese)
- [8] ZAIDI S H,BRUECK S R J. Interferometric lithography for nanoscale fabrication[J]. *SPIE*,1999,3618:2-8.
- [9] PERR M D,BOYD R D,BRITTEN J A *et al.* High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings[J]. *Opt. Lett.*,1995,20:940-942.
- [10] 祝绍箕,邹海兴,包学诚等.衍射光栅[M].北京:机械工业出版社,1986.
ZHU SH Q,ZOU H X,BAO X CH *et al.*. *Diffraction Grating*[M]. Beijing:China Machine Press,1986.(in Chinese)

作者简介:徐福全(1960—),男,内蒙古兴安盟人,副教授,主要从事微光学元件原理方面的研究。E-mail:xfqc@ yahoo.com