

文章编号 1004-924X(2014)07-1814-06

绝对式光栅尺母尺刻划曝光系统

刘 华^{1*}, 卢振武¹, 熊 峥^{1,2}, 王 尧¹, 王 鹤¹, 黄剑波¹, 谭向全¹, 孙 强¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 130049)

摘要:提出了基于数字微镜器件(DMD)的双曝光头总体结构,该结构可同时刻划母尺的周期和非周期两个光栅码道。单曝光头包含曝光光源、调焦光源、DMD和投影镜头四部分,曝光光源由激光器、准直镜组、二维微透镜阵列和场镜组成。本文利用光学软件 TracePro 设计该光源,实现了能量的平顶分布,在 14 mm×10 mm 的照明面上均匀性达到 95% 以上。利用光学软件 Zemax 设计了工作在双波段(曝光光源 0.403~0.407 μm 和调焦光源 0.525~0.535 μm)的共焦投影镜头,采用了二向色镜和分光棱镜使其能在曝光的同时进行实时调焦,优化后的系统在曝光波段和调焦波段均达到衍射极限,最大畸变为 0.009%。与传统的光栅尺刻划技术对比,设计的曝光系统具有工艺简单、制作速度快、精度高等优势,可用于长、超长计量光栅的制作。

关键词:绝对式光栅尺;光栅码道;母尺刻划;数字微镜器件;曝光头;计量光栅

中图分类号:TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142207.1814

Exposure optical system in lithographic main scale of absolute optical encoder

LIU Hua^{*1}, LU Zhen-wu¹, XIONG Zheng^{1,2}, WANG Yao¹, WANG He¹,

HUANG Jian-bo¹, TAN Xiang-quan¹, SUN Qiang¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130049, China)

* Corresponding author, E-mail: girllihua@sohu.com

Abstract: A general structure for two photolithographic heads based on Digital Micro-mirror Devices (DMDs) is proposed for simultaneously lithography of the double-track codes of an absolute optical encoder. The total optical system includes an exposure light source, an focusing light source, a DMD and a projective lens. The exposure light source mainly consists of a laser, a collimation lens, a 2D-micro-mirror array and a field lens. The exposure light source is designed by TracePro software, and the uniformity of the energy distribution is above 95% in the area of 14 mm×10 mm. A confocal projective system at two wavebands (exposure source at 0.403—0.407 μm and focusing source at 0.525—0.535 μm) is designed by Zemax software, in which the exposure and focusing can be realized in real time with a dichroscope and a prism. The imaging quality of the projective lens reaches

收稿日期:2013-11-12;修订日期:2013-12-08.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2013ZX04007021)

diffraction limit at exposure waveband and focusing waveband, and the maximum distortion is 0.009%. Compared with traditional grating lithography methods, the exposure optical system has advantages on simpler process, fast manufacturing and high precision. It can be used in manufacturing long and ultra-long metrological gratings.

Key words: absolute optical encoder; grating code-track; main scale; Digital Micro-mirror Device (DMD); exposure head; metrological grating

1 引 言

绝对式光栅线位移传感器属于高精度位移传感器,被广泛应用于精密测量、自动定位、跟踪测试等领域^[1-4]。它由照明光源、主计量光栅、指示光栅(扫描掩模)、光电探测器、计算机信号处理系统等组成。其中主计量光栅是其最核心部件,由上下相邻的 2 条光栅码道组成,上面的是增量码道,具有等周期光栅结构,周期为 20 μm ;下面的是绝对码道,具有非等周期光栅结构。由于绝对式光栅尺的结构特殊,传统的光栅刻划方法如机械刻划、掩模光刻、单点激光直写、全息干涉等^[5-7],均无法在制作速度、成本、稳定性、精度等方面满足它的加工要求。

基于数字微镜器件(DMD)的数字光刻法能很好地克服传统光栅刻划方法的缺陷,能够快速、高精度地制作出绝对式光栅尺的母尺。DMD 器件包括一个可独立寻址和控制的微反射镜像素阵列,每个像素可以对反射的光线产生开关状态和灰度调制,从而形成需要的光栅图形编码。该方法既不需要制作掩模板,又简化了点写、直写光刻过程中繁琐的工艺流程,制作速度快、耗时短、成本低且稳定性高。目前虽然基于 DMD 的数字光刻系统已经受到广泛关注和研究^[8-11],但是将其应用于绝对式光栅尺母尺的刻划还鲜有报告。

本文提出了 DMD 双曝光头结构,该结构能同时刻划绝对式光栅尺母尺的 2 个光栅码道。分别利用 TracePro 和 Zemax 软件设计了曝光头的照明光源和投影镜头,单曝光头还将调焦部分和曝光部分集成于一体。与传统的母尺刻划系统相比,该结构在加工工序、成本和环境要求等方面都具有一定优势。

2 双曝光头总体结构

光栅尺有 2 个码道,每个码道宽度为 3 mm,而单个曝头形成的有效曝光面积为 3.413 mm \times 2.560 mm,所以需同时曝光 2 个码道,要用 2 个曝光头并行的双通道曝光系统,其结构如图 1 所示。两套曝光头的结构完全相同,分别安装在 Z_1 和 Z_2 轴上。其相对位置精度要求非常严格——间距精度控制在 0.1 μm 以内,相对角度控制在 10"以内,才能保证曝光出来的光栅图案满足母光栅的使用要求。因此机械装调也十分困难,必须根据实际曝光结果反复调整,最后将位置锁定。双曝光头安装好以后,光栅尺基板要在工件台上不断进行步进运动,形成分步局部曝光。为保证光栅尺分步曝光拼接的准确性,工件台系统的绝对精度达到了 $\pm 0.6 \mu\text{m}/1\ 000 \text{ mm}$,重复定位精度为 0.1 μm 。

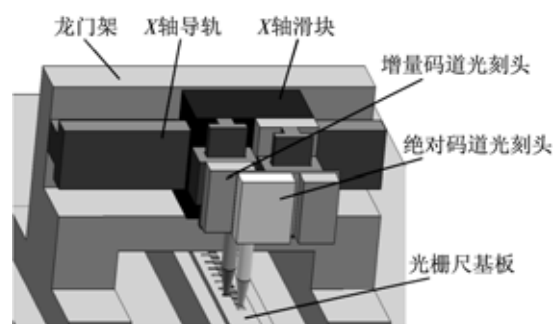


图 1 双光刻头并行曝光结构示意图

Fig. 1 General configuration of two lithography heads

曝光头的光学结构如图 2 所示,主要包括数字微镜器 DMD、照明系统、投影镜头和调焦定位系统。主控系统经 DMD 控制模块将控制信号输出至 DMD 驱动系统,经驱动系统处理后使得 DMD 微镜阵列产生曝光图形。投影镜头能够同时在两个波段工作:曝光波段和调焦波段,这两个

波段是共焦的。

曝光时,半导体激光光源发出的光束经光学系统进行准直和匀光,形成能量均匀分布的曝光光源,以一定角度照射到 DMD 上,经 DMD 反射调制后,经分光棱镜、投影光学系统照射到光栅尺基片上。调焦时 LED 光源发出的光束经光学系统进行准直和匀光,形成能量均匀分布的调焦光源,以一定角度照射到 DMD 上,经 DMD 反射调制后,经分光棱镜、投影光学系统照射到光栅尺基片上。光栅尺基片的上表面类似反射镜,可将部分入射光反射,经投影光学系统和分光棱镜后进入 CCD 成像系统,于是 CCD 探测器接收到投影在光栅表面的曝光图形。通过对图形的分析(包括清晰度、能量、线条宽度)可以判断出调焦量,并计算出需要调整的数值,进行调焦,这种利用图像分析进行制动调焦的方法,其精度可以达到 $1\ \mu\text{m}$,而本系统的投影镜头的焦深为 $8\ \mu\text{m}$,满足实际应用需求。

3 投影镜头结构

投影光刻物镜将 DMD 数字微镜上反射的图形成像到涂布在基片表面的光刻胶上。光刻胶上记录的图形再经过显影、定影、刻蚀,最终将 DMD 上的掩模图形转移到基片上。为了满足光刻的特征线宽要求,DMD 上反射的图形经过投影物镜后所成的像是按比例缩小的图形。投影物镜是光刻系统的核心部件之一,其精缩倍数决定了光刻系统的分辨率,且成像质量直接影响 DMD 上掩模图形的成像。投影镜头的参数确定主要由以下几方面决定:

(1)DMD 微镜阵列像素为 $1\ 024\times 768$,每个微镜的尺寸为 $13.68\ \mu\text{m}\times 13.68\ \mu\text{m}$,因此其整体图形显示尺寸为 $14.008\ \text{mm}\times 10.506\ \text{mm}$ 。由于光栅图案的周期为 $20\ \mu\text{m}$,黑白线宽比为 $1:1$,为了形成理想的光栅曝光图形,每个微镜经投影镜头投影后的成像尺寸应该能够被光栅图形的最小黑白线宽整除。选择 3 个微镜经投影镜头后形成线宽为 $10\ \mu\text{m}$ 的黑白光栅,因此投影镜头的放大倍率为 $\beta=-0.243\ 66$ 。DMD 经投影镜头后形成的有效曝光面积约 $S=3.413\ \text{mm}\times 2.560\ \text{mm}$ 。投影镜头的有效分辨率: $R_1=13.68\times\beta=$

$3.333\ \mu\text{m}$ 。

(2)投影镜头像方数值孔径(NA)径决定了镜头的系统分辨率 R_2 :

$$R_2 = \frac{k\lambda}{NA}, \quad (1)$$

式中: k 为与抗蚀剂和工艺有关的常量; λ 为曝光波长;NA为投影透镜的像方数值孔径。系统分辨率的值如果大于有效分辨率,每个微镜经过投影镜头后形成的像会严重模糊,无法形成理想的光栅图形。而系统分辨率的值如果小于有效分辨率,每个微镜经过投影镜头后形成的像会相互分离,形成独立光点,使得光栅图形不连续,不光滑。因此需要两者相匹配,令 k 为 0.8 , λ 为 $405\ \mu\text{m}$,NA 为 0.1 ,则系统分辨率 $R_2=3.24\ \mu\text{m}$ 。

(3)由于投影物镜物方工作距离内需要放置光源、分光棱镜等结构,投影镜头的物方工作距 L 一般比较长,至少需要 $100\ \text{mm}$ 以上。

(4)投影镜头的放大倍率会严重影响其形成的光栅图案黑白栅线的位置。为了确保其放大倍率在装调和调焦过程中保持不变,需要选择物方、像方双远心结构。

(5)投影镜头需要在双波段下工作,即曝光工作波段和调焦工作波段共焦。

综上所述,为了能够形成刻制光栅母尺需要的曝光图形,投影镜头的参数确定为:

物高 $14.008\ \text{mm}\times 10.506\ \text{mm}$,曝光光源工作波长 $403\sim 407\ \text{nm}$,调焦光源工作波长 $523\sim 537\ \text{nm}$,像方数值孔径 $NA=0.2$,物方数值孔径 $NA_{\text{object}}=0.05$,放大倍率 $\beta=-0.243\ 66$,物方工作距离为 $100\ \text{mm}$ 。

镜头的焦深为:

$$\Delta Z = \pm k_2 \frac{\lambda}{NA^2}, \quad (2)$$

其中: ΔZ 是焦深, λ 是波长,比例常数 k_2 是工艺因子,其值取决于成像标准和图形结构的特点,一般 $k_2=0.8$;经计算焦深 $\Delta Z=\pm 8\ \mu\text{m}$ 。

在光学设计软件中搭建了系统的初始结构,经过优化设计,严格控制系统的三级象差中的球差、彗差和像散,形成了能够达到衍射极限的投影镜头光学系统,其结构如图 2 所示(投影镜头部分),该系统在曝光波段的传递函数如图 3 所示,达到衍射极限;系统的畸变如图 4 所示,最大畸变为 0.009% 。

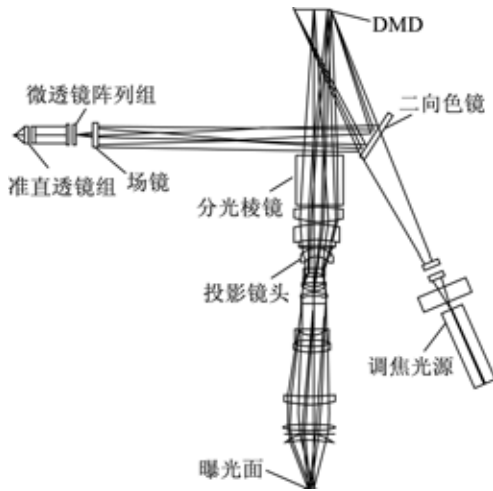


图 2 曝光头系统的结构图

Fig. 2 Configuration of lithography head system

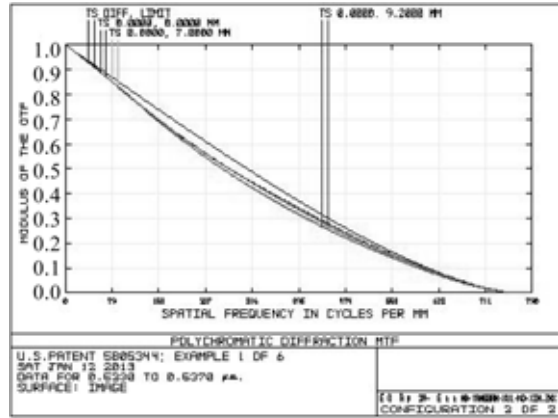


图 5 系统在调焦波段的传递函数

Fig. 5 MTF of lithography head at focusing waveband

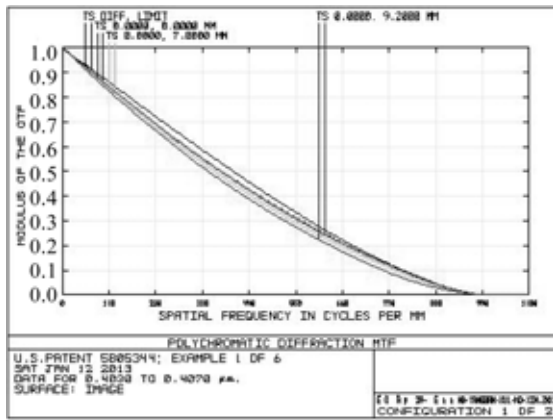


图 3 系统在曝光波段的传递函数

Fig. 3 MTF of lithography head at exposure waveband

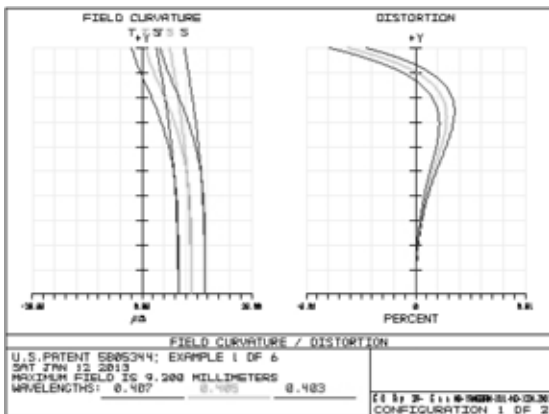


图 4 系统的畸变

Fig. 4 Distortion of lithography head

系统在调焦波段的传递函数如图 5 所示,达到了衍射极限。

4 照明光源结构

照明系统也是整个数字光刻曝光系统的重要组成部分,它提供曝光图形产生所需要的近紫外光以及调焦用的绿光,并以一定角度和尺寸均匀地照射到投影镜头的物面(即 DMD)上,其结构如图 6 所示。曝光光源能量的均匀性对于曝光过程非常重要,如果能量不均匀,将导致曝光出来的线宽不均匀,单元成像面积上各处或整个曝光面上的分辨率不一致。为了实现能量的高均匀性,采用双片微透镜阵列匀化处理准直后的激光光束。微透镜阵列将入射平行光束分割成许多具有一定发散角的子光束,再利用场镜将所有的子光束在空间叠加,从而大大提高了光能分布的均匀性。子光束的数量由微透镜阵的微镜数量决定,一般微镜数量越多,匀光效果越好,但是微透镜阵列成本越高。根据实际需要确定了曝光光源的指标:

(1)所需照明区域大小由 DMD 器件本身决定,由于所用 DMD 器件的单像素尺寸为 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$,DMD 所包含像素为 $1\ 064 \times 768$ 个,因此均匀照明区大小为 $14.008 \text{ mm} \times 10.506 \text{ mm}$ 。

(2)根据所使用的 DMD 器件本身的工作要求,其偏转角为 $\pm 12^\circ$,因此光源入射到 DMD 微镜的角度与 DMD 窗口玻璃的法线方向成 24° 。

(3)由于曝光光源的能量分布直接影响被曝光面所形成图案的对比度,因此系统对光源的能量均匀性要求非常高,需要实现能量的平顶分布,并且均匀度需达 95% 以上。

(4)根据图 6 的几何关系,设所选用微透镜阵

列宽度为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$; 两微透镜阵列间距为 4.8 mm , 则微透镜的单元尺寸为 $d = \frac{4.8}{f'} D$, 即 $d = 372.76\text{ mm}$ 。其中 f' 表示场镜焦距, D 表示 DMD 的纵向宽度。

(5) 每个微透镜单元发出的光都均匀地照明在 DMD 照明面, 因此, 由光源的入射角 24° , DMD 器件纵向尺寸 10.506 mm 以及单微透镜的发散角 θ , 根据图 6 中的几何关系, 依据三角形正弦定理:

$$f' = \frac{10.506}{\frac{2}{\sin(2^\circ)}} \times \sin[180^\circ - \theta - (90^\circ + 24^\circ)], \quad (3)$$

确定场镜焦距 f' 为 135.285 mm 。

调焦光源的均匀性相对要求较低, 经过光纤匀化后再经准直镜准直后即可满足使用要求。这两种光源经过二向色镜合束后以 24° 照射到 DMD 窗口玻璃上, 最终经窗口玻璃照射到每一片 DMD 数字微镜上 (见图 2)。DMD 照面上的曝光光源能量分布状况实际测试结果如图 7 所示, 在照明区域 $14.008\text{ mm} \times 10.506\text{ mm}$ 内的均匀性 (最小照度/平均照度) 为 95% 。

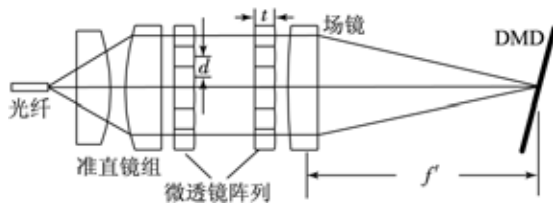


图 6 整体光源光路结构图

Fig. 6 Configuration of whole light path of light source



图 7 曝光光源能量分布实际测试图

Fig. 7 Energy distribution of exposure source under test

5 实验结果

将 DMD 微镜阵列、光源、分光棱镜、投影透镜、CCD 相机等单元器件集成, 形成理想的光栅尺曝光系统, 并进行了光栅尺制作, 其曝光后形成的码道图形在显微镜下测试结果如图 8 所示, 其刻线宽度为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 刻线间距为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 线条光滑流畅, 结果理想。

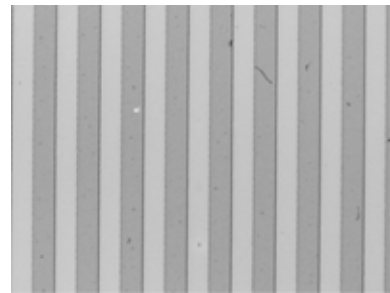


图 8 曝光后光栅尺码道显微镜图

Fig. 8 Configuration of the absolute optical encoder under microscope

6 结 论

本文将基于 DMD 的数字光刻技术引入绝对式光栅尺母尺的刻划中, 提出了双曝光头的总体结构。该结构能够同时加工母尺的周期、非周期码道, 简化了往复加工工序, 降低了成本, 同时还具有制作速度快、精度高等优势。另外, 通过使用二向色镜和分光棱镜实现了曝光的同时实时调焦。

设计结果表明, 照明光源通过光学软件优化实现了在 $0.405\text{ }\mu\text{m}$ 波段的能量均匀分布, 在 DMD 照明面上均匀性达到 95% 以上。投影镜头在曝光和调焦波段均达到衍射极限, 最大畸变为 0.009% , 满足技术指标要求。

参考文献:

- [1] KAI E, PETER S. Absolute high-resolution optical position encoder[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(1): 201-208.
- [2] BRUCE G, KOLLOFF, JEFFREY S, et al.. High

- resolution optical hybrid digital-analog linear position encoder [P]. U. S.: *Patent*, 5451776, 1995.
- [3] LEVITON D B. Absolute position encoders using pattern recognition [J]. *NASA Tech Briefs*, 2000, 24 (6): 6-10.
- [4] 刘洪兴, 张巍, 巩岩. 光栅参数测量技术研究进展 [J]. *中国光学*, 2011, 4(2): 103-110.
LIU H X, ZHANG W, GONG Y. Progress in grating parameter measurement technology [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 103-110.
- [5] 李凤友, 卢振武, 谢永军, 等. 激光直写方法制作透明导电金属网栅 [J]. *光子学报*, 2002, 31(10): 1270-1272.
LI F Y, LU ZH W, XIE Y J, *et al.*. Transparent conductive metallic film mesh fabrication by laser direct writing technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(10): 1270-1272. (in Chinese)
- [6] 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): 109-113.
ZHAO B, QI X D. Manufactruing of high efficient holographic diffraction gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 109-113. (in Chinese)
- [7] 盛斌, 徐向东, 刘颖, 等. 真空紫外硅闪耀光栅的制作 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 94-99.
SHENG B, XU X D, LIU Y, *et al.*. Vacuum-ultraviolet blazed silicon gratinganisotropic ally etched in KOH solution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 94-99.
- [8] 郭小伟. SLM无掩模光刻技术的研究 [D]. 四川: 四川大学, 2007.
GUO X W. Research on SLM-based Maskless Lithography [D]. *Sichuan: Sichuan University*, 2007, (in Chinese)
- [9] DANA D, WALTER D, JOHN S. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [J]. *SPIE*, 2003, 4985: 1-12.
- [10] KIN F C, FENG ZH Q, YANG R, *et al.*. High-resolution maskless Lithography [J]. *SPIE*, 2003, 2: 331-339.
- [11] KENNETH C, JOHNSON. High-throughput maskless lithograpy system [P]. U. S.: 6177980, 2001.

作者简介:



刘 华(1976—),女,辽宁抚顺人,博士,副研究员,2001年于东北师范大学获得学士学位,2006年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光学检测、光学设计、衍射光学的研究。E-mail: girllihua@sohu.com



卢振武(1955—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1982年于东北师范大学获学士学位,1985年于中科院长春光机所获硕士学位,主要研究方向为衍射光学。E-mail: luzw@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)