

文章编号 1004-924X(2010)07-1536-07

# 紫外全息闪耀光栅的制作

谭鑫,李文昊,巴音贺希格,齐向东

(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:**通过理论计算研究了影响闪耀光栅衍射效率的因素,并利用离子束刻蚀模拟程序模拟刻蚀闪耀光栅来确定闪耀光栅的制作参数。以理论计算的闪耀光栅参数为依据,以刻蚀模拟程序为指导,基于全息-离子束刻蚀工艺制作了闪耀波长分别为250 nm和330 nm,光栅尺寸分别为85 mm×85 mm,60 mm×60 mm,线密度均为1 200 lp/mm的闪耀光栅。第一种光栅闪耀角为8.54°,非闪耀角为72°,其250 nm波长自准直入射时的-1级衍射光衍射效率约为81%;第二种光栅闪耀角为11.68°,非闪耀角为74°,330 nm波长自准直入射时的-1级衍射光衍射效率约为80%。实验结果表明,提出的方法可以在制作闪耀光栅的过程中实现对闪耀角的精确控制,获得的实验结果与理论计算结果符合较好。利用该方法能够在在大尺寸基底上获得衍射效率>75%的紫外闪耀光栅。

**关键词:**闪耀光栅;紫外光栅;衍射效率;刻蚀模拟

**中图分类号:**O436.1;TN305 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101807.1536

## Fabrication of ultraviolet holographic blazed grating

Tan Xin, Li Wen-hao, Bayanheshig, QI Xiang-dong

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

**Abstract:** The factors effecting on the diffraction efficiencies of blazed gratings were researched and the parameters fabricating the blazed gratings were determined by holographic ion beam etching. On the basis of above, two kinds of blazed gratings with a line density of 1200 lp/mm and blazed wavelength of 250 nm and 330 nm were fabricated, respectively, and then their blazed angles were measured by a Atomic Force Microscopy (AFM) and the diffraction efficiencies were measured by a plane grating diffraction efficiency instrument. Obtained results show that the 250 nm blazed grating with a size of 85 mm×85 mm has a blazed angle of 8.54° and a right angle of 72° and its diffraction efficiency is about 81% at 250 nm. Moreover, the 330 nm blazed grating with a size of 60 mm×60 mm has a blazed angle of 11.68° and a right angle of 74° and its diffraction efficiency is about 80% at 330 nm. These data demonstrate that experimental results are well in agreement with that calculated ones and illustrate that blazed angles can be controlled in grating fabrication process. By using the proposed method, the ultraviolet blazed gratings with diffraction efficiency more than 75% can be fabricated on a large size substrate.

**Key words:** blazed grating; ultraviolet grating; diffraction efficiency; etching simulation

**收稿日期:**2009-12-09; **修订日期:**2010-01-15.

**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资助项目(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)

## 1 引言

衍射光栅是一种应用非常广泛而重要的高分辨率色散光学元件,在现代光学仪器中占有相当重要的地位<sup>[1-8]</sup>。

闪耀光栅作为衍射光栅的一个种类,在凝聚态物理和材料、信息及生命科学、原子物理、分子物理、团簇科学、分子反应动力学等领域的实验系统中扮演着关键角色。从闪耀光栅出现到现在,人们对闪耀光栅衍射效率的追求从未停止过,对高衍射效率闪耀光栅的研制也进行了很多定性和定量研究,但是对于刻槽形状与衍射效率关系的定量研究并不深入。闪耀光栅有多种制作方法,在这些方法中,全息离子束刻蚀由于其制作方便,可控性高,所制作光栅无鬼线,杂散光低,而成为闪耀光栅的主要制作手段。虽然全息离子束刻蚀制作闪耀光栅已经经历了约30年的发展,但对于全息-离子束刻蚀闪耀光栅的研究仍然是本领域内的研究重点,国内外均在开展槽形与衍射效率关系的研究工作<sup>[1-6,8]</sup>,并取得了一些不错的研究成果,不过衍射效率依然不够高,尚不能满足日益增加的高衍射效率的闪耀光栅需求。

本文以闪耀波长为250 nm,330 nm,线密度为1 200 lp/mm的闪耀光栅为例,对影响闪耀光栅衍射效率的主要因素进行了理论分析,并通过实验实现了对影响衍射效率的主要因素严格控制,从而在K9玻璃基底上获得了两种不同闪耀波长,有效面积分别为85 mm×85 mm和60 mm×60 mm的高衍射效率的闪耀光栅。

## 2 平面闪耀光栅的衍射效率分析

对工作波长为250 nm和330 nm,线密度为1 200 lp/mm的闪耀光栅在自准入射情况的衍射效率进行了理论分析。图1为平面闪耀光栅一个周期的示意图。从图1可以看出,对于一种固定了闪耀波长和周期的闪耀光栅,其可变参数只有闪耀角(Left angle)及非闪耀角(Right angle),闪耀角的变化引起衍射效率的变化或与目标闪耀波长的偏离是众所周知的。图2为1 200 lp/mm闪耀光栅在250 nm波长自准直入射情况下-1级衍射光衍射效率随闪耀角变化的曲线,图3为

1 200 lp/mm闪耀光栅在330 nm波长自准直入射情况下-1级衍射光衍射效率随闪耀角变化的曲线,图2和图3的衍射效率曲线是通过商用软件PCgratMLT2000,利用矢量算法计算得到的。从图2可以看出,-1级衍射光的衍射效率在闪耀角为8~8.7°时达到最高,约82%,随着闪耀角向大于8.7°或小于8°变化,对应250 nm波长的衍射效率将降低;同时由图3可知此时其闪耀角为10.5~12°,衍射效率较高,约83%,随着闪耀角向大于12°或小于10.5°变化,对应330 nm波长的衍射效率将降低。

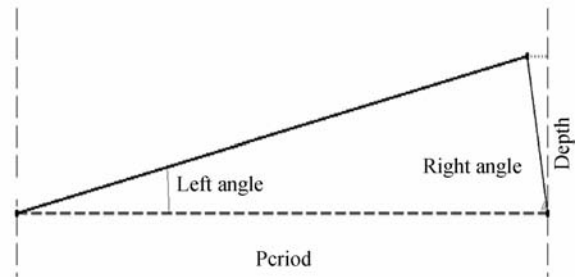


图1 闪耀光栅示意图

Fig. 1 Sketch map of one period blazed grating

从图2和图3的理论效率曲线上看,衍射效率对闪耀角的变化都是十分敏感的,如果要获得高衍射效率(接近理论衍射效率)的闪耀光栅,对于闪耀角及非闪耀角的控制都要十分严格,即波长250 nm的闪耀光栅,其闪耀角应为8~8.7°;波长应330 nm的闪耀光栅,其闪耀角应为10.5~12°。

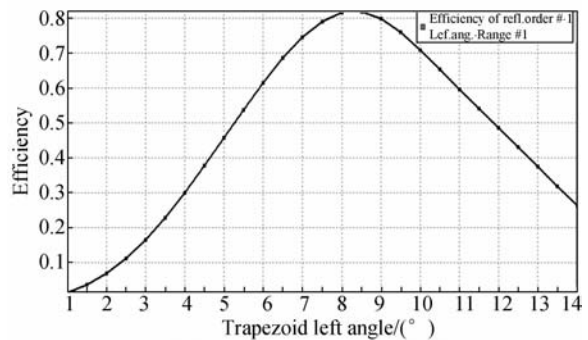


图2 1 200 lp/mm闪耀光栅在250 nm波长自准直入射情况下-1级衍射光衍射效率随闪耀角的变化(镀铝表面)

Fig. 2 Diffraction efficiencies of -1 order light of a 1 200 lp/mm blazed grating as functions of blazed angles at wavelength of 250 nm

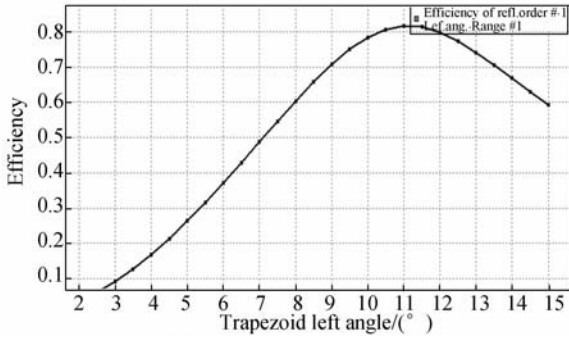


图 3 1 200 lp/mm 闪耀光栅在 330 nm 波长自准直入射情况下 -1 级衍射光衍射效率随闪耀角的变化(镀铝表面)

Fig. 3 Diffraction efficiencies of -1 order light of a 1 200 lp/mm blazed grating as functions of blazed angles at wavelength of 330 nm

### 3 平面闪耀光栅的制作工艺

全息-离子束刻蚀闪耀光栅制作涉及多步工艺<sup>[7,9-10]</sup>,其主要步骤如图 4 所示。图 4 的主要工艺步骤中涉及的基片处理,光刻胶前烘温度和时间,两相干光强的平衡性和曝光量,显影液浓度和温度,显影时间和搅动程度,后烘温度和时间,离子束刻蚀条件,镀膜条件等的变化,都有可能影响到光栅的重复性和衍射效率。全息曝光、显影用于产生光刻胶光栅浮雕图形(掩模),离子束刻蚀用于将光刻胶光栅掩模转移到光栅基底材料中。

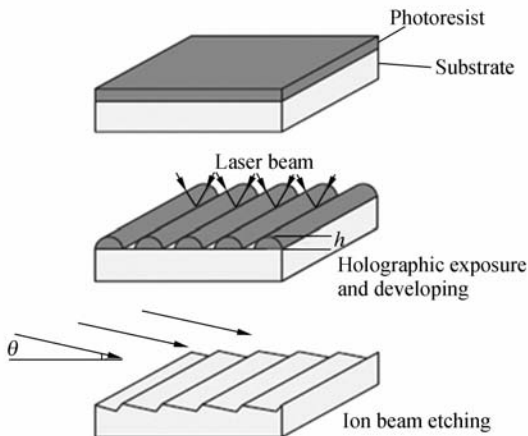


图 4 全息离子束刻蚀闪耀光栅主要工艺步骤

Fig. 4 Fabrication process of blazed holographic ion beam etched grating

闪耀光栅的闪耀角决定了光栅的闪耀波长,为了刻蚀出理想的锯齿槽形,刻蚀时要求离子束

与光刻胶掩模条纹相切,并刚好入射到掩模条纹的根部。这时的光刻胶掩模高度将有一确定值,根据光刻胶掩模界面外形曲线方程和离子束与其相切的切线方程可得

$$h = 0.7236d \tan \theta^{[2]}, \quad (1)$$

式中, $\theta$ 为离子束与光栅平面的夹角,它与刻蚀获得的闪耀光栅的闪耀角存在一定的偏差,这是由于离子束流存在发散角所引起的。对于不同的离子源及刻蚀系统,其偏差是不同的,可以通过大量实验确定其偏差值,从而确定获得的闪耀角。

从式(1)及上面的讨论可以看出闪耀光栅的闪耀角直接受光刻胶掩模的槽深及占宽比影响,通过在光刻胶掩模制作过程中使用曝光-显影在线监测系统,加之在离子束刻蚀前对掩模进行反应离子灰化可以获得满足离子束刻蚀需求的光刻胶掩模。在此基础上,利用稳定的离子束刻蚀工艺将获得闪耀角满足要求的闪耀光栅。

上述工艺是制作全息-离子束刻蚀闪耀光栅的基础工艺,由于其对离子束刻蚀过程的控制只能通过实验总结再进行实验以选择合适的刻蚀参数,所以制作效率较低。本文在实验中引入了离子束刻蚀过程模拟,在离子束刻蚀前对离子束刻蚀过程进行模拟得到目标槽形所需的离子束刻蚀参数后再利用该参数指导离子束刻蚀工艺,从而大大地提高了工作效率和刻蚀结果的可控性。

在模拟过程中,需要在保证离子束刻蚀参数易于实现的基础上使获得的刻蚀模拟槽形逼近理想槽形,同时给出诸如离子束刻蚀参数,刻蚀时间等结果。图 5 给出了利用自行开发的刻蚀模拟程序 BLAZING 计算获得的两种不同刻蚀参数情况下获得的 250 nm 和 330 nm 闪耀光栅的刻蚀槽形。

图 5 中的两幅图片分别是对应不同刻蚀参数情况下获得的 250 nm 和 330 nm 的闪耀光栅槽形。

将图 5 中的槽形参数与理想槽形参数一起输入衍射效率计算软件<sup>[11-12]</sup>,获得如图 6、图 7 所示的衍射效率对比图。

由图 5、图 6 和图 7 可以看出,通过 BLAZING 模拟获得的槽形与理想槽形计算出来的衍射效率差异较小,在闪耀波长附近,小于 3%。

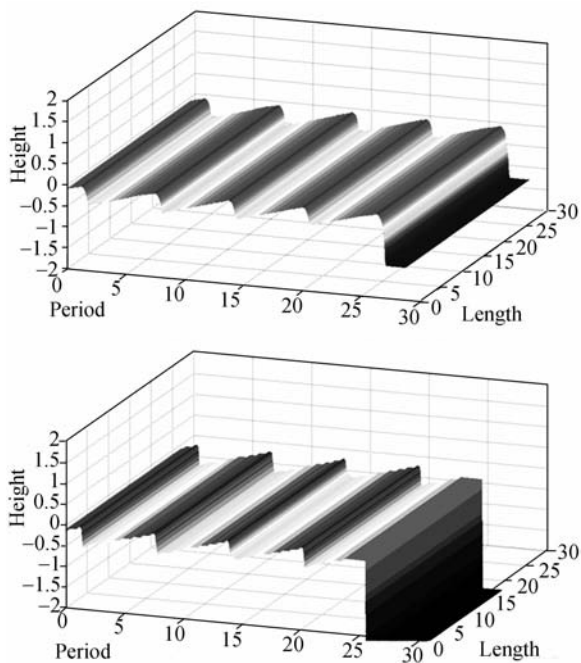


图 5 250 nm 和 330 nm 闪耀光栅刻蚀槽形

Fig. 5 Simulated ion etched grating grooves of a 1 200 lp/mm blazed grating at wavelength of 250 nm and 330 nm

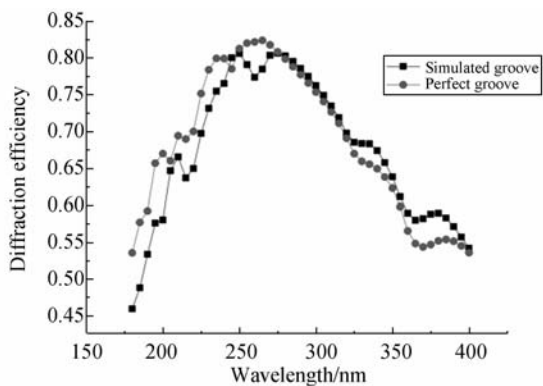


图 6 250 nm 闪耀光栅刻蚀模拟槽形与理想槽形的衍射效率

Fig. 6 Calculated grating efficiencies of  $-1$  order light of a 1 200 lp/mm blazed grating as functions of the wavelengths for simulated groove and perfect groove at wavelength of 250 nm

闪耀光栅的闪耀角通过离子束刻蚀过程中离子束入射角的控制来进行调整;而非闪耀角则通过控制离子束对光刻胶掩模与基底层的刻蚀速率比来进行控制,这些工艺技术国内外已经进行过很多研究<sup>[13]</sup>。

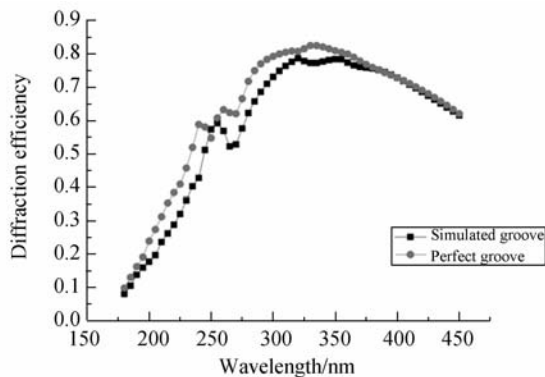


图 7 330 nm 闪耀光栅刻蚀模拟槽形与理想槽形的衍射效率

Fig. 7 Calculated grating efficiencies of  $-1$  order light of a 1 200 lp/mm blazed grating as functions of the wavelengths for simulated groove and perfect groove at wavelength of 330 nm

#### 4 实验结果及讨论

工艺条件可控的情况下,在 K9 基底上制作了如图 8 所示的 250 nm 闪耀光栅,其线密度为 1 200 lp/mm,闪耀角为  $8.54^\circ$ ,非闪耀角为  $72^\circ$ ,尺寸为  $85\text{ mm} \times 85\text{ mm}$ ,衍射效率的测量结果如图 9 所示。

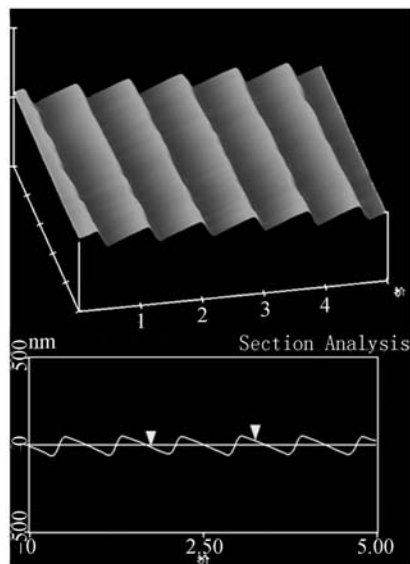


图 8 1 200 lp/mm,250 nm 闪耀光栅的 AFM 照片  
Fig. 8 AFM photos of a 1 200 lp/mm blazed grating at wavelength of 250 nm

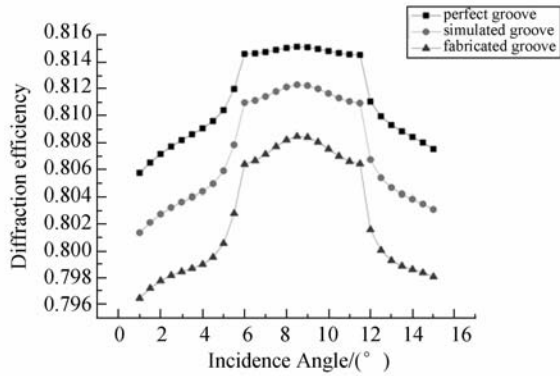


图 9 1 200 lp/mm, 250 nm 闪耀光栅的理论槽形、模拟槽形及制作槽形衍射效率与入射角的关系

Fig. 9 Diffraction efficiencies of perfect groove, simulated groove and fabricated groove of a 1 200 lp/mm blazed grating as functions of the incidence angles for wavelength of 250 nm

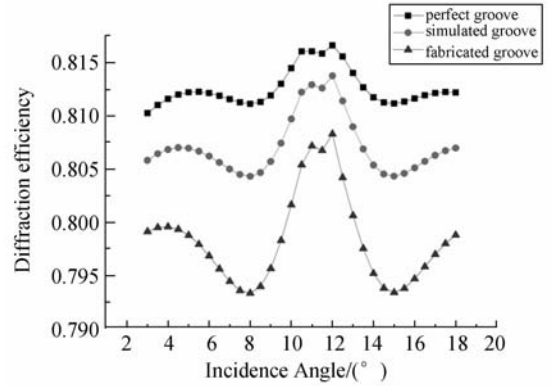


图 11 1 200 lp/mm, 330 nm 闪耀光栅的理论槽形、模拟槽形及制作槽形衍射效率与入射角的关系

Fig. 11 Perfect groove, simulated groove and fabricated groove of a 1 200 lp/mm blazed grating as functions of the incidence angles for wavelength of 330 nm

同时,在 K9 基底上制作了如图 10 所示的 330 nm 闪耀光栅,其线密度为 1 200 lp/mm,闪耀角为  $11.68^\circ$ ,非闪耀角为  $74^\circ$ ,尺寸为  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ,衍射效率的测量结果如图 11 所示。

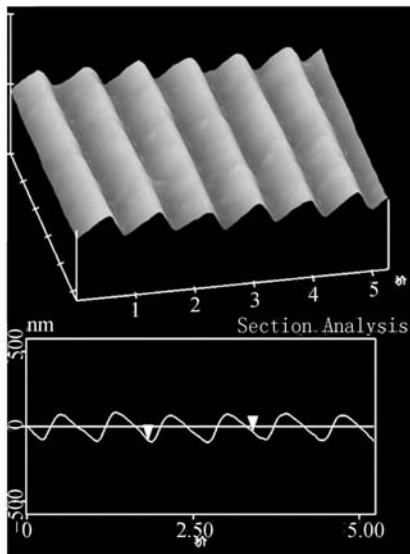


图 10 1 200 lp/mm, 330 nm 闪耀光栅的 AFM 照片  
Fig. 10 AFM photos of a 1 200 lp/mm blazed grating at wavelength of 330 nm

图 8 和图 10 中所示的闪耀光栅槽形的闪耀角,非闪耀角均使用 Veeco D3100 型原子力显微镜测量。

从图 9 和图 11 的衍射效率曲线中可以看出,

理论衍射效率平均比制作的衍射光栅的衍射效率高 2%。这是因为,第一,理论衍射效率是通过 Pcgrate MLT2000 进行计算获得的,该版本的软件在计算衍射效率时不能加入光栅表面粗糙度等制作误差信息,而是完全理想的状况,因此获得了较高的衍射效率;第二,制作获得的闪耀光栅受表面粗糙度,光栅山脊成圆角等因素的影响。第二个原因可以通过闪耀光栅制作工艺的改进来加以控制,但是在目前的软件版本下无法给出定量的计算分析。

## 5 结 论

本文对影响闪耀光栅衍射效率的主要因素进行了分析,并通过全息-离子束刻蚀实验验证了之前对衍射效率影响因素的分析。使用离子束刻蚀模拟程序来指导离子束刻蚀工艺,实现了离子束刻蚀速率比的可控,并在此基础上制作了两种尺寸均大于  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ,线密度为 1 200 lp/mm 的闪耀光栅。其中闪耀角为  $8.54^\circ$ ,非闪耀角为  $72^\circ$ ,250 nm 波长自准直入射时-1 级衍射光的衍射效率达到 80% 以上;闪耀角为  $11.68^\circ$ ,非闪耀角为  $74^\circ$ ,330 nm 波长自准直入射时-1 级衍射光的衍射效率  $>80\%$ 。

感谢吉林大学超分子国家重点实验室董凤霞老师,于景生老师在扫描电镜和原子力显微镜测

量方面的帮助;感谢长春光机所激发态室赵海峰

老师在扫描电镜方面的帮助。

## 参考文献:

- [1] JOHNSON L F, INGERSOLL K A. Asymmetric triangular grating profiles with 90 groove angles produced by ion-beam erosion [J]. *Appl. Opt.*, 1981, 20(17):2951-2961.
- [2] AOYAGI Y, NAMBA S. Blazed ion-etched holographic gratings[J]. *Opt. Acta.* 1976, 23(9):701-707.
- [3] NELLES B, HEIDEMANN K F, KLEEMANN B. Design, manufacturing and testing of gratings for synchrotron radiation[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2001, 23(9):260-266.
- [4] OSTERRIED K, HEIDEMANN K F, NELLES B. Groove profile modification of blazed gratings by dip coating with hardenable liquids [J]. *Appl. Opt.* 1998, 50(37):8002-8007.
- [5] de MELLO B A, da COSTA I F, LIMA C R A, et al.. Developed profile of holographically exposed photoresist gratings [J]. *Appl. Opt.* 1995, 50(34):597-603.
- [6] LIN H, LI L F. Fabrication of extreme-ultraviolet blazed gratings by use of direct argon - oxygen ion-beam etching through a rectangular photoresist mask[J]. *Appl. Opt.* 2008, 50(47):6212-6218.
- [7] 赵博, 齐向东. 高效平面全息衍射光机的获取方法[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] HUTLEY M C. *Diffraction Gratings*[M]. America Academic, 1982.
- [9] TAN X, LIU Y, LIU ZH K. Performance of a soft X-ray splitter grating parallelism measuring system by diffraction method[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2009, 17(15):61-65.
- [10] LIU Y, TAN X, LIU ZH K. Soft X-ray holographic grating beam splitter including a double frequency grating for interferometer pre-alignment [J]. *Optics Express*, 2008, 17(16):14761-14770.
- [11] 巴音贺希格, 朱洪春. 基于槽形函数拟合的刻划光栅衍射特性分析方法[J]. *物理学报*, 2007 80(56):3893-3899.
- BAYANHESHIG, ZHU H C. Analytical method of the diffraction characteristic of ruled grating based on profile fitting function[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 80(56):3893-3899. (in Chinese)
- [12] 巴音贺希格, 齐向东, 唐玉国. 位相光栅色散特性的矢量衍射理论分析[J]. *物理学报*, 2003, 80(52):1157-1161.
- BAYANHESHIG, QI X D, TANG Y G. The vector diffraction theory analysis of chromatic dispersion characteristics of phase grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 80(52):1157-1161. (in Chinese)
- [13] 谭鑫, 刘颖, 徐向东, 等. 13.9 nm Lamina 分束光栅的研制[J]. *光学精密工程*, 2009, 15(1):33-37.
- TAN X, LIU Y, XU X D. 13.9 nm Lamina grating as beam splitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 15(1):33-37. (in Chinese)

## 作者简介:



谭鑫(1981—),男,吉林长春人,工学博士,副研究员,2003年、2008年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事光栅设计制作技术及光学器件微细加工技术的研究。E-mail: xintan.grating@gmail.com



李文昊(1980—),男,内蒙古赤峰人,博士,副研究员,2002年于陕西科技大学获学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要研究方向为平面、凹面全息光栅的理论设计及制作工艺。E-mail: leewenho@163.com



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,1984年于内蒙古民族大学获学士学位,2001年于吉林大学物理学院获理学硕士学位,2004年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,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



齐向东(1965—),男,吉林辽源人,研究员,1987年于长春光学精密机械学院获学士学位,主要从事光栅刻划机的研究及衍射光栅的研制。E-mail: china-grating@263.net

## ● 下期预告

# 微型光电编码器在电机角速率辨识中的应用

李琳<sup>1,2</sup>, 厉明<sup>1,2</sup>, 艾华<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)

针对电机伺服控制系统利用编码器角位置信息预测角速率的需求,提出并实现了一种基于平稳卡尔曼滤波的编码器信号处理方法。首先,分析了典型电机系统的结构及编码器测量噪声的组成,在此基础上建立了电机系统和编码器的参数化数学模型。接着,根据电机系统和编码器模型给出了统一的参数化平稳卡尔曼滤波器设计结果。然后,在 Matlab/Simulink 环境下完成了电机、编码器和卡尔曼滤波器的仿真模型,并利用不同参数对参数化平稳卡尔曼滤波器的普适性和滤波效果进行了预测。最后,搭建了实验平台,对仿真结论进行验证,并对滤波性能进行了实测。仿真和实验结果表明:参数化滤波模型对典型电机系统具有普适性,自适应平稳卡尔曼滤波器可以利用编码器信号实现角速率的最优估计,误差标准差为  $0.021 (^{\circ})/s$ ,最大误差可以控制在  $0.06 (^{\circ})/s$  之内,能够满足一般电机伺服系统对角速率精度的要求。