

# 基于正弦光栅的凝视型激光探测告警系统的设计与实现

张超 牛燕雄 苏平和 婷 张鹏 牛海莎 李易难

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要** 当激光入射到正弦光栅时,会产生 0 级和 $\pm 1$  级衍射谱线,通过测量衍射谱线的分布,可获得入射激光的波长及方位角信息。为了实时探测激光光源的波长和方位角,设计了一种基于正弦光栅的凝视型激光探测告警系统。介绍了系统的工作原理,推导了激光波长和方位角的计算公式,并对系统的探测精度进行了数值模拟研究。分析了光栅常数和柱面镜曲率半径对系统探测能力的影响,并且给出了相关函数。实验结果表明:当光栅常数为 1/500 mm、柱面镜曲率半径为 20 mm 时,系统可实现对波长为 320~1100 nm、视场角为 $\pm 20^\circ$  范围内激光源的实时探测,波长分辨率可达到 10 nm,角分辨率可达到 $1^\circ$ 。

**关键词** 激光技术;激光告警;正弦光栅;激光波长;方位角

中图分类号 E928.9 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.1016001

## Design and Realization of Staring Laser Detecting and Warning System Based on Sinusoidal Grating

Zhang Chao Niu Yanxiong Su Ping He Ting Zhang Peng Niu Haisha Li Yanan

(Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** Incident laser passing through sinusoidal grating diffracts as zero-order and plus or minus one-order spectra. The wavelength and direction of incident laser can be measured by reading the position of the spectrum from the detector. In order to detect the wavelength and direction of laser light, a staring laser detecting and warning system based on sinusoidal grating is designed. Working principle of the system is introduced, computing formulas of wavelength and azimuth of the incident laser are deduced, and detecting accuracy is studied by numerical simulation. Influence of grating constant and cylindrical lens radius on detectivity of the system is studied and the related function is provided. Experimental results show that the laser detecting and warning system can realize real time measurement of laser with the wavelength range of 320~1100 nm, field of view of  $\pm 20^\circ$  when the grating constant is 1/500 nm and the cylindrical lens radius is 20 mm, where the wavelength resolution is less than 10 nm and the angular resolution is less than  $1^\circ$ .

**Key words** laser technique; laser warning; sinusoidal grating; laser wavelength; azimuth

**OCIS codes** 080.3620; 230.1950; 120.1880; 350.5730

## 1 引言

随着激光技术的发展,激光仪器和系统在武器装备中得到越来越广泛的应用,实时探测和识别激光光源的波长、方位等特性在现代战场上具有十分重要的意义。激光探测告警系统是光电对抗领域的一项重要技术应用,可实现对来袭激光的波长和方

位角的侦测与识别<sup>[1]</sup>。

激光告警技术的研究始于 20 世纪 70 年代。经过多年的发展,以美国为代表的军事强国已有多种型号的激光告警器装备部队,如 OPTRA 公司的激光告警系统,以及装备陆战平台的 AN/VVR-1 系列和装备军用直升机的 AN/AVR-2 系列激光探测

收稿日期: 2012-05-23; 收到修改稿日期: 2012-06-19

作者简介: 张超(1987—),男,硕士研究生,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: zhangchao\_2007@126.com

导师简介: 牛燕雄(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事光电对抗方面的研究。

E-mail: niuyx@buaa.edu.cn(通信联系人)

装置<sup>[2]</sup>。国内的哈尔滨工业大学陆宏等<sup>[3]</sup>实现了用光栅法和法布里-珀罗(F-P)法实时测量激光波长,但没有涉及激光源方位的探测;中北大学的张记龙等<sup>[4,5]</sup>研究了光栅法和掩膜编码法的激光告警技术,但未见针对探测精度进行光学系统的优化研究。

本文采用正弦光栅作为干涉元件,实现了一种基于正弦光栅的凝视型激光探测告警装置,分析、设计了具有较高分辨率的探测系统,对柱面镜和光栅的相关参数以及系统的探测精度做了研究,研制了原理样机,并进行了相关实验验证。

## 2 激光探测告警系统

### 2.1 系统结构与原理

基于正弦光栅的凝视型激光探测告警装置主要由探测系统和信号处理系统组成,结构如图1所示。其中,探测系统主要包括正弦透射光栅、平凸柱面镜和线阵电荷耦合器件(CCD),信号处理部分主要包括数据采集卡、数字信号处理(DSP)器以及发光二极管(LED)显示屏等。

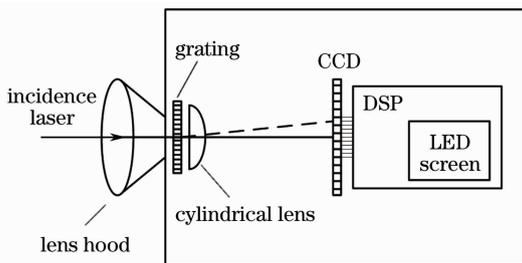


图1 激光探测告警系统结构

Fig. 1 Sketch map of laser detecting and warning system

正弦光栅的复振幅透射率呈正弦规律变化,入射激光经正弦光栅衍射后,能量集中在0级和±1级谱线,这种特性不仅能够提高系统的信噪比,而且有利于成像元件对衍射谱线的识别<sup>[6]</sup>。

衍射光线通过柱面镜的折射和会聚作用将在 CCD 探测面上形成衍射光斑,光斑的位置与入射激光的方位角有关,0级和±1级光斑的距离与入射激光波长和光栅常数有关。通过 CCD 可以将光信号转换为电信号,再由 DSP 进行处理和计算,最后在 LED 显示屏上输出入射激光的波长和方位角。

### 2.2 入射激光方位角的探测

为了实现对入射激光方位角的计算,需对柱面镜的成像规律进行研究,其基本原理如图2所示。

设柱面镜的折射率为  $n$ , 曲率半径为  $R$ , 径向厚度为  $D$ , 激光入射角为  $\alpha$ , 出射角为  $\alpha'$ , 0级出射光线在 CCD 上的投影坐标为  $X_0$ , 柱面镜焦距为  $f$ , 根据

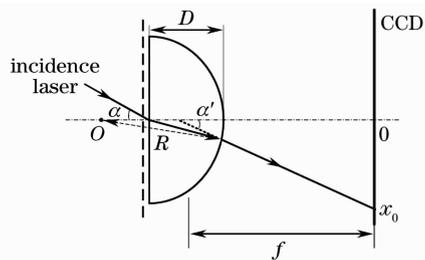


图2 方位角探测原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of incidence angle detection

折射定律及图2所示几何关系,可以得出

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right) - \arcsin\left(\frac{R-D}{nR} \sin \alpha\right) + \arcsin\left(\frac{R-D}{R} \sin \alpha\right) = F(\alpha), \quad (1)$$

式中的函数  $F(\alpha)$  表示入射激光经柱面镜后,出射角与入射角之间的关系<sup>[7]</sup>。根据几何关系可以得到

$$x_0 = f \tan \alpha', \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,可得

$$\alpha = F^{-1}(\alpha') = F^{-1}\left[\arctan\left(\frac{x_0}{f}\right)\right]. \quad (3)$$

根据(3)式,可以由光斑的位置和柱面镜参数计算出入射激光的方位角。

### 2.3 入射激光波长的探测

入射激光经正弦光栅的衍射作用,形成0级和±1级谱线光斑。为了保证较大的探测角度,应选取0级和-1级衍射光进行计算。如图3所示,激光以  $\alpha$  角入射,0级和-1级光线分别以  $\alpha$  和  $\beta$  从光栅出射,以  $\alpha'$  和  $\beta'$  从柱面镜出射,  $x_0, x_{-1}$  为0级、-1级衍射光斑的中心位置坐标,光栅常数为  $d$ 。

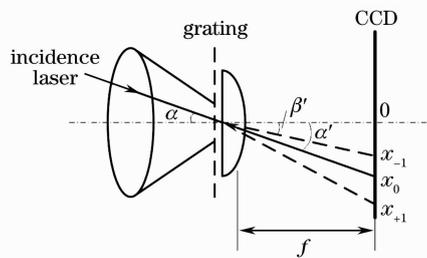


图3 波长探测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of wavelength detection

根据透射光栅方程,考虑-1级衍射光线<sup>[8]</sup>,有

$$d(\sin \beta - \sin \alpha) = -\lambda. \quad (4)$$

根据(3)式和(4)式,可得

$$\lambda = d\{\sin[F^{-1}(\alpha')] - \sin[F^{-1}(\beta')]\} = d\left\{\sin\left[F^{-1}\left[\arctan\left(\frac{x_0}{f}\right)\right]\right] - \sin\left[F^{-1}\left[\arctan\left(\frac{x_{-1}}{f}\right)\right]\right]\right\}. \quad (5)$$

由此表明,求解入射激光波长的关键在于测定 CCD 阵列面上 0 级和 -1 级光线投影点的位置。

### 3 探测系统设计

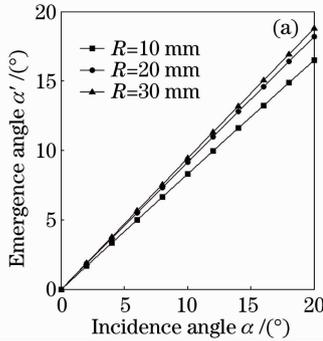
#### 3.1 CCD 探测器的选取

系统设计的探测波长范围为 320~1100 nm,探测角范围为  $\pm 20^\circ$ 。需要保证激光以最大角入射时,0 级衍射光斑能够成像在 CCD 上<sup>[9]</sup>。假设 CCD 阵列面的长度为  $L$ ,根据图 2 和(1)式可以推出

$$L > 2f \tan \alpha' = 2f \tan [F(\alpha)]. \quad (6)$$

柱面镜焦距可表示为

$$f = \frac{R}{n-1}, \quad (7)$$



则(6)式可写为

$$L > \frac{2R}{n-1} \tan [F(\alpha)], \quad (8)$$

(8)式表示在保证探测角范围的情况下,CCD 阵列面的长度  $L$  与函数  $F(\alpha)$  有关,即受柱面镜参数  $R$ 、 $D$ 、 $n$  以及光栅常数  $d$  的限制<sup>[10]</sup>。

#### 3.2 柱面镜的设计

柱面镜曲率半径对系统的探测角范围和 CCD 的选取有一定影响。设柱面镜径向厚度  $D=5$  mm, K9 玻璃折射率  $n=1.5$ ,依次取  $R=10, 20, 30$  mm,则  $f=20, 40, 60$  mm,考查柱面镜的偏折作用及对 CCD 长度的要求。根据(1)式和(8)式,可分别得  $\alpha'$  与  $\alpha$ 、 $L$  与  $\alpha$  的关系如图 4 所示。

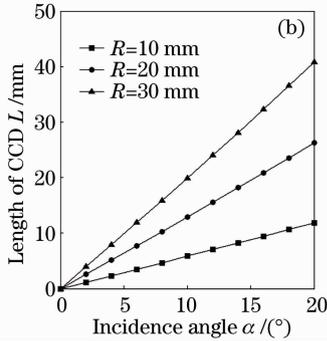


图 4  $R$  不同时出射角与入射角的关系(a)和 CCD 长度与入射角的关系(b)

Fig. 4 Under different  $R$ , (a) emergence versus incidence angle; (b) length of CCD versus incidence angle

由图 4 可知,当入射角  $\alpha$  一定时,出射角  $\alpha'$  与  $R$  呈正相关,但不同  $R$  值引起的差异并不十分明显; CCD 长度  $L$  与  $R$  呈正相关,而且不同  $R$  值引起的差异比较显著,这是因为  $f$  也随  $R$  的减小而减小,由此导致光斑间距明显变小。 $R$  越大,所需 CCD 长度  $L$  越大,所以应该选取适中的  $R$  值,这里选  $R=20$  mm,则  $f=40$  mm,根据图 4 可知, $L$  可选为 30 mm。

### 4 测量精度的分析

#### 4.1 波长分辨率

系统波长分辨率设计为  $\Delta\lambda \leq 10$  nm,即需要 CCD 能够分辨波长差为 10 nm 的两束激光垂直入射时,所产生的 1 级光斑之间的最小距离<sup>[11]</sup>。

根据图 3 所示,设波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的两束激光以  $0^\circ$  角入射,其中  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 10$  nm,0 级光斑的坐标分别为  $x_{10}$ 、 $x_{20}$ , -1 级光斑坐标分别为  $x_{11}$ 、 $x_{21}$ , -1 级谱线经柱面镜的入射角分别为  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ,出射角分别为  $\beta'_1$ 、 $\beta'_2$ 。

将  $\alpha=0^\circ$  代入(4)式,得

$$d \sin \beta_1 = \lambda_1, \quad (9)$$

$$d \sin \beta_2 = \lambda_2. \quad (10)$$

两个 -1 级光斑距离表示为  $\Delta x_1$ ,则有

$$\Delta x_1 = x_{21} - x_{11} = f(\tan \beta'_1 - \tan \beta'_2) = \frac{R}{n-1} \{ \tan [F(\beta_1)] - \tan [F(\beta_2)] \}, \quad (11)$$

将(9)、(10)式代入(11)式,可得

$$\Delta x_1 = \frac{R}{n-1} \left\{ \tan \left\{ F \left[ \arcsin \left( \frac{\lambda_1 + 10}{d} \right) \right] \right\} - \tan \left\{ F \left[ \arcsin \left( \frac{\lambda_1}{d} \right) \right] \right\} \right\} = G(\lambda_1, R, d), \quad (12)$$

设柱面镜的径向厚度  $D=5$  mm, K9 玻璃折射率  $n=1.5$ ,则(12)式  $G(\lambda_1, R, d)$  表示  $\Delta x_1$  是  $\lambda_1$ 、 $R$  及  $d$  的函数。经验证,  $\Delta x_1$  与  $\lambda_1$  呈正相关,即在其他条件一定的情况下,  $\lambda_1=320$  nm 时存在光斑距离最小值  $\Delta x_{1\min}$ 。若系统能够分辨此最小距离,则在 320~1100 nm 范围内都能实现 10 nm 的波长分辨率<sup>[12]</sup>。取(12)式中  $\lambda_1=320$  nm,  $R$  的范围取 10~30 mm,  $d$  的范围取 1/500~1/200 mm,可得  $\Delta x_{1\min}$  与  $R$ 、 $d$  的三维函数图像如图 5 所示。

由图 5 可知,  $\Delta x_{1\min}$  与柱面镜曲率半径  $R$  呈正

相关,与光栅常数  $d$  呈负相关。随着  $R$  的增大,  $d$  对  $\Delta x_{1\min}$  的影响由平缓过渡到相对明显;随着  $d$  的增大,  $R$  对  $\Delta x_{1\min}$  的影响逐渐趋于平缓。由此可知:在波长分辨率为 10 nm 的条件下,对于给定的光栅和柱面镜,系统存在着一个对应的光斑间距最小值。令此最小值大于 CCD 能够识别的最小移动距离,则可推出柱面镜曲率半径和光栅常数的取值范围,进一步优化光学系统。

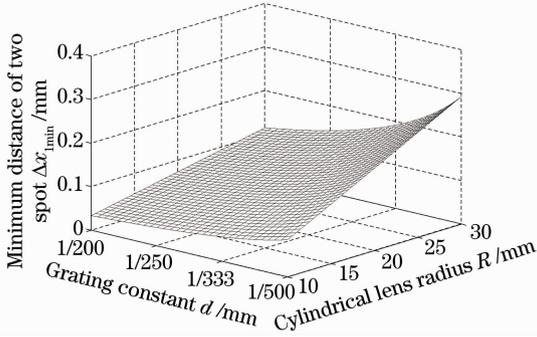


图 5  $\Delta x_{1\min}$  与  $R$ 、 $d$  的关系

Fig. 5 Variation of  $\Delta x_{1\min}$  with  $R$ ,  $d$

#### 4.2 角分辨率

考查系统的角分辨率,即考查激光分别以  $0^\circ$  角和  $\alpha$  角入射时,0 级光斑的移动距离。CCD 能够分辨这一距离的最小值所对应的  $\alpha$  即为系统能够识别的最小变化角度<sup>[13]</sup>。

根据图 3 所示,激光以  $0^\circ$  和  $\alpha$  角入射时,出射角分别为  $0^\circ$  和  $\alpha'$ ,设两个 0 级光斑的坐标分别为  $x_{10}$ 、 $x_{20}$ ,其距离为  $\Delta x_0$ ,则有

$$\Delta x_0 = x_{20} - x_{10} = f(\tan \alpha' - 0) = \frac{R}{n-1} \tan[F(\alpha)], \quad (13)$$

(13)式表示  $\Delta x_0$  与  $\alpha$  的函数关系。根据 4.1 节的分析可知,在保证系统波长分辨率的条件下可确定  $R$ 、 $d$  的取值,再令  $\Delta x_0$  等于 CCD 的最小识别距离,则可根据(13)式计算出  $\alpha$ ,即系统能够分辨的最小角度。

### 5 原理样机和实验

基于理论分析和参数设计,研制了激光探测告警系统原理样机,如图 6 所示。

系统采用 ALPHALAS 公司 2000M 型线阵 CCD,长度为 30 mm,共有 2048 pixel,每个像数宽度为  $14 \mu\text{m}$ ;信号处理部分选用 SEED-VPM642 系列开发板,模/数(A/D)采样率为 96 kHz,即每隔 10 pixel 输出 1 个信号。

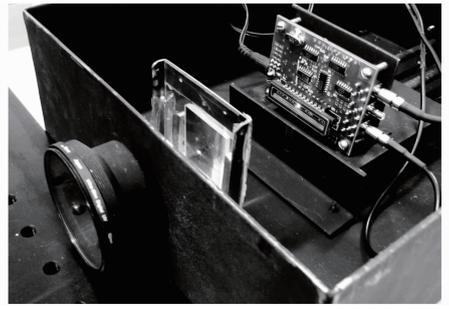


图 6 激光探测告警系统样机

Fig. 6 Model machine of laser detecting and warning system

由以上参数可知,CCD 能够识别的最小光斑移动距离为  $10 \times 14 \mu\text{m} = 0.14 \text{ mm}$ 。取柱面镜曲率半径  $R = 20 \text{ mm}$ 、光栅常数  $d = 1/500 \text{ mm}$ ,根据 4.1 节的分析结果,  $\Delta x_{1\min} = 0.19 \text{ mm} > 0.14 \text{ mm}$ ,说明样机的波长分辨率能够达到 10 nm;同时,根据 4.2 节的分析结果,令  $\Delta x_0 = 0.14 \text{ mm}$ ,可得  $\alpha < 1^\circ$ ,即角分辨率可以达到  $1^\circ$ 。

用波长为 532 nm 的激光从不同角度入射,对样机进行测试,实验得到的部分数据如表 1 所示。

表 1 部分测试结果

Table 1 Part of test results

Actual $\alpha / (^\circ)$	Measurement $\lambda' / \text{nm}$	Measurement $\alpha' / (^\circ)$	Actual $\alpha / (^\circ)$	Measurement $\lambda' / \text{nm}$	Measurement $\alpha' / (^\circ)$
-20	541	-20.3	1	541	1.1
-19	536	-19.4	2	542	2.1
-18	540	-18.3	3	543	2.8
-17	539	-17.1	4	536	3.8
-16	530	-16.2	5	536	4.9
-15	535	-15.4	6	543	5.9
-14	536	-14.2	7	537	6.9
-13	529	-13.2	8	534	7.5
-12	533	-12.1	9	539	8.9
-11	528	-11.2	10	537	9.8
-10	538	-10.3	11	534	11.0
-9	540	-9.1	12	532	11.7
-8	534	-8.1	13	528	12.8
-7	535	-7.2	14	532	13.7
-6	544	-6.0	15	533	14.8
-5	541	-5.1	16	539	15.8
-4	535	-3.9	17	529	16.9
-3	543	-3.1	18	535	17.7
-2	541	-2.0	19	534	18.7
-1	540	-1.0	20	531	19.6
0	531	0			

实验结果表明,原理样机能够实现  $\pm 20^\circ$  范围内的激光探测告警功能,对来袭激光的波长和方位角

的计算基本正确。波长误差和方位角测量结果如图7所示。

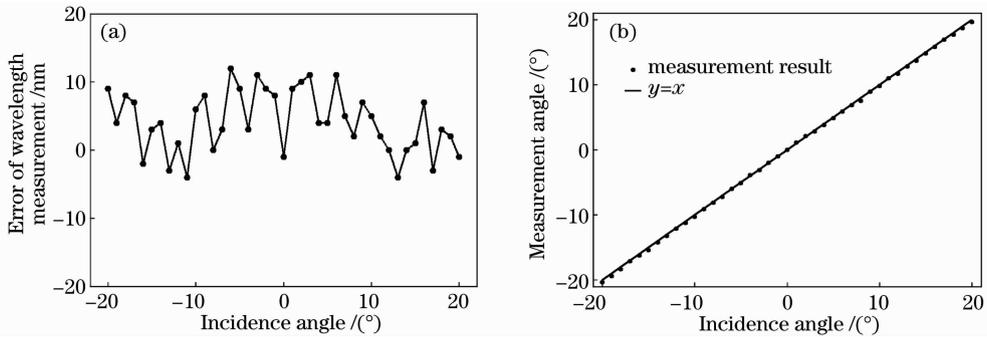


图7 (a)波长误差;(b)方位角测量结果

Fig. 7 (a) Error of wavelength; (b) angle measurement result

由于信号采集和处理过程有一定噪声,以及激光光源的定向放置过程操作精度有限,测量结果存在一定的误差。从图7(b)可以看出,角度的测量结果略为偏小,可能是由于柱面镜平面与CCD探测面未达到严格平行,计算结果整体向一个方向偏移所致。在允许的误差范围内,系统实现了波长分辨率为10 nm,角分辨率为1°的设计要求。

## 6 结 论

根据正弦光栅的衍射性质,分析了基于正弦光栅的凝视型激光探测告警系统的工作原理,设计了系统的结构和参数,并对波长分辨率和角分辨率的影响因素分别进行了研究。计算表明,当柱面镜曲率半径为20 mm、光栅常数为1/500 mm时,系统的视场角为±20°,探测波长范围为320~1100 nm,波长分辨率可达到10 nm,角分辨率可达到1°。根据设计参数制作了原理样机并进行了验证工作。测试结果表明,原理样机实现了激光探测告警功能,达到了设计分辨率。针对CCD信号采集以及DSP数据处理部分可以做进一步的优化,以提高系统稳定性和探测精度。

## 参 考 文 献

- 1 Li Wei. New type laser attack and countermeasure weapons[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2011, **40**(10): 1944~1948  
李 伟. 新型激光攻击与对抗武器[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(10): 1944~1948
- 2 Shi Lan, Wang Hong. Research on the of America's laser warning technologies and equipments [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2008, **37**(s): 335~339  
石 岚, 王 宏. 美军激光告警技术与装备发展分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(s): 335~339
- 3 Lu Hong, Jiang Lingzhen, Geng Wanzhen. The contrast between a grating system and a Fabry Perot interferometer system to measure the wavelength of laser in real-time[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 1995, **27**(4): 29~34  
陆 宏, 姜铃珍, 耿宪桢. 光栅法和法布里-珀罗干涉仪法实时测量激光波长的对比研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1995, **27**(4): 29~34

- 4 Zhang Jilong, Tian Erming, Wang Zhibin. Laser warning receiver based on sinusoidal transmission grating[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2006, **35**(3): 326~330  
张记龙, 田二明, 王志斌. 基于正弦透射光栅的激光告警接收机研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(3): 326~330
- 5 Lang Wenjie. Research on two-dimensional overlapping coding for detection of laser direction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1374~1378  
郎文杰. 基于二维交叠膜编码的全方向激光方向探测应用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1374~1378
- 6 Guo Chunfeng, Su Xianyu, Dou Yunfu *et al.*. Large-aperture aspheric surfaces testing by using sinusoidal grating based on ronchi method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0422001  
郭春风, 苏显渝, 窦蕴甫等. 用正弦光栅的朗奇法检验大口径非球面形[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0422001
- 7 Ma Hua, Zeng Xiaodong, An Yuying. Double half-cylindrical lens collimate the beam of laser diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 937~940  
马 华, 曾晓东, 安毓英. 双半圆柱透镜准直半导体激光光束[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 937~940
- 8 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 507~510  
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 507~510
- 9 Yu Bin, Chen Danni, Sun Qiang *et al.*. Design and analysis of new diffractive optic imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1260~1263  
于 斌, 陈丹妮, 孙 强等. 新型衍射光学成像光谱仪的设计和分折[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1260~1263
- 10 He Yuanxing, Li Xinyang. Far-field focal spot measurement based on diffraction grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208001  
贺元兴, 李新阳. 基于衍射光栅的远场焦斑测量新方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0208001
- 11 Hu Song, Chen Weimin, Wen Zhiyu *et al.*. Influence of photo-detector array on resolution and wavelength accuracy of spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 190~195  
胡 松, 陈伟民, 温志渝等. 光电阵列探测器对色散型光谱仪的光谱分辨率及波长准确性的影响[J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 190~195
- 12 Chang Lingying, Zhao Baochang, Qiu Yuehong *et al.*. Optical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3021~3026  
常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪等. 声光可调谐滤波器成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3021~3026
- 13 Bai Yong, Sun Zhihong. Improve the precision of a small angle displacement detecting equipment based on linear-CCD [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, **29**(4): 449~452  
白 勇, 孙志宏. 提高基于线阵CCD的小幅角位移检测装置精度的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(4): 449~452