

# 基于 ZnSe 平板波导的小型光谱仪光学系统设计

李扬裕<sup>1,2</sup> 方勇华<sup>1</sup> 李大成<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 一般光谱仪的小型化是通过缩小元件尺寸和元件间距离实现的,会降低仪器的性能。为实现高光通量、高光谱分辨率的红外光谱探测,提出一种基于 ZnSe 平板波导的小型光谱仪的设计方法。说明平板波导结构压缩光束的原理,根据介质中光栅的衍射特性,推导出光谱分辨率与各个参数的关系,给出一个小型光谱仪的具体设计。仪器的光谱范围为 8~14  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率为 80 nm,数值孔径为 0.3,光学系统是一整块 ZnSe 平板波导,尺寸为 70 mm $\times$ 70 mm $\times$ 4 mm。并与相同设计指标下一般 Czerny-Turner 结构的光谱仪进行对比分析。结果表明基于 ZnSe 平板波导的小型光谱仪系统尺寸更小,光谱分辨率更高,光通量更大。

**关键词** 光学设计;小型光谱仪;平板波导;光谱分辨率;浸入式光栅

**中图分类号** O433.1; TH744.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0122003

## Optical Design of Miniature Spectrometer Based on ZnSe Planar Waveguide

Li Yangyu<sup>1,2</sup> Fang Yonghua<sup>1</sup> Li Dacheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Common method of spectrometer miniaturization is implemented by decreasing the size of optical components and the distance between them, which will reduce the system performance. In order to achieve high throughput, high spectral resolution infrared spectral detection, a design method of a miniature spectrometer based on ZnSe planar waveguide is proposed. First, the principle of beam compression by planar waveguide is described. Then, in accordance with the diffraction properties of grating in ZnSe medium, the relationship between the spectral resolution and the various optical parameters is deduced. Finally, a specific design of a miniature spectrometer is given. The spectral range of this spectrometer is 8~14 $\mu\text{m}$ , the spectral resolution is 80 nm, numerical aperture is 0.3. The optical system is a monolithic ZnSe planar waveguide, the size is 70 mm $\times$ 70 mm $\times$ 4 mm. A comparison between this spectrometer and common Czerny-Turner of the same design specifications is done. The results show that miniature spectrometer based ZnSe planar waveguide has very small size, good spectral resolution and high throughput.

**Key words** optical design; miniature spectrometer; planar waveguide; spectral resolution; immersion gratings

**OCIS codes** 220.4830; 300.6340; 230.7390; 300.6320; 230.1950

## 1 引言

小型光谱仪成本低、结构紧凑、携带方便、操作简单,是光谱仪发展的一大趋势,而且小型光谱仪应用范围更广,弥补了大型光谱仪只能用于实验室分析的缺憾。目前,已有大量的小型光谱仪出现<sup>[1-6]</sup>。这些光谱

收稿日期: 2015-7-20; 收到修改稿日期: 2015-9-11

基金项目: 国家自然科学基金(61275173)

作者简介: 李扬裕(1986-),男,博士研究生,主要从事光谱仪器方面的研究。E-mail: lyy1876@126.com

导师简介: 方勇华(1966-),男,博士,研究员,主要从事光电信息获取与处理等方面的研究。

E-mail: yhfang@aiofm.ac.cn(通信联系人)

仪的光学结构与大型光谱仪并没有什么不同,小型化是通过缩小光学元件的尺寸,减小元件间的距离实现的。因此仪器的性能,如光通量、光谱分辨率,也随之降低。

对于光栅光谱仪,非色散方向上的尺寸仅影响光通量,而对光谱分辨率没有影响。于是,有学者提出用平板波导压缩非色散方向上的尺寸可以进一步减小系统的尺寸<sup>[7-9]</sup>。这种方法在减小系统尺寸的同时不会降低光通量,也就是说不会降低光学系统的性能。如 Foster-Miller 公司研制的 ZnSe 波导红外光谱仪<sup>[9]</sup>,系统采用的是罗兰光学结构,ZnSe 平板波导的尺寸为 63.5 mm×38.1 mm×6.35 mm,波长范围 8~12 μm,光谱分辨率 100 nm,矩形视场角 5°×45°。但是,由于红外波段的凹面光栅加工困难,且罗兰光学结构比 Czerny-Turner 结构的像差大(光谱分辨率低),因此应用尚不成熟。

为实现高光通量、高光谱分辨率的红外光谱探测,提出一种基于 ZnSe 平板波导的大数值孔径小型红外光谱仪光学系统。该系统的分光结构为非对称 Czerny-Turner 结构,所用光栅为浸入式光栅,在相同条件下,它比普通反射光栅光谱仪的光谱分辨率提高  $n_m$  倍( $n_m$  为衍射发生的介质折射率)<sup>[10]</sup>。非色散方向上,采用高折射率的 ZnSe 平板波导,能让光学系统尺寸更小。仿真结果表明:基于 ZnSe 平板波导的小型红外光谱仪光学系统尺寸小、光通量高、光谱分辨率高。

## 2 平板波导光谱仪原理

平板波导光谱仪的光学系统如图 1 所示,YZ 平面为色散平面,XZ 平面垂直于色散平面。平板波导是指在 XZ 平面内上下表面平行的一块平板。入射面、准直镜、成像镜、出射面皆为柱面镜。YZ 平面上,狭缝发出的光在入射面发生折射后,在平板波导内传播;被准直镜准直后入射到平面光栅上;光栅的衍射光被成像镜会聚后,经过出射面发生折射,最后会聚在探测器的像面上。XZ 平面上,狭缝发出的光在入射面被准直后,被限制在上、下波导平面间传播,最后经出射面折射后会聚到探测器上。

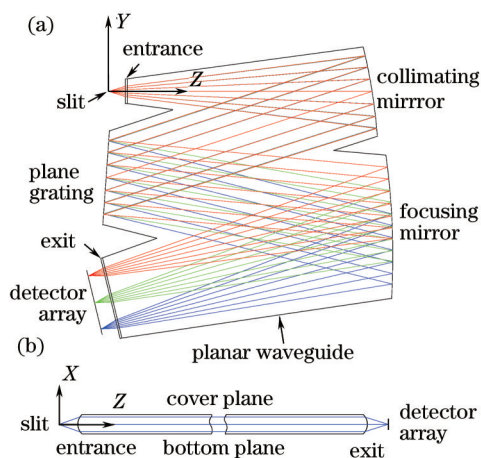


图 1 平板波导光谱仪的光学系统结构。(a) YZ 平面;(b) XZ 平面

Fig.1 Optical structure of planar waveguide spectrometer. (a) YZ plane; (b) XZ plane

在“入射面”和“出射面”光线发生折射时,满足折射定律:

$$n_a \sin \omega_a = n_m \sin \omega_m, \quad (1)$$

式中  $n_a$  为空气的折射率,  $n_m$  为平板波导介质的折射率,  $\omega_a$  为空气中的角度,  $\omega_m$  为介质中的角度。当角度较小时,可以用弧度值近似表示正弦值,此时介质中光线角度  $\omega_m = \omega_a/n_m$ 。假设波导介质为 ZnSe,其折射率为 2.4,则光线角度是空气中的 1/2.4,光束的尺寸变小了。因此,在波导介质中光学元件的宽度会变小,同时由于平板波导结构光学元件的高度也变小了。由于 Czerny-Turner 结构是反射式光学结构,其主要像差与光学元件的孔径大小和离轴角有关。因此,相同数值孔径下基于 ZnSe 平板波导的 Czerny-Turner 结构比一般 Czerny-Turner 结构尺寸更小,像差也更小。如果尺寸相同,则基于 ZnSe 平板波导的 Czerny-Turner 结构的数值孔径能做到更大,光谱分辨率更高。

### 3 光学系统设计

#### 3.1 波导介质中的光栅特性

ZnSe 平板波导光谱仪中光栅有两种加工方式,第一种是将光栅直接刻在 ZnSe 平板波导上,第二种是用光学胶将刻好的光栅粘到 ZnSe 平板波导上。第一种情况下,光栅方程为

$$n_m \cdot d_m \cdot (\sin i_m + \sin \theta_m) = m \cdot \lambda, \quad (2)$$

式中  $d_m$  为光栅常数,  $i_m$  和  $\theta_m$  为介质中光栅的入射角和衍射角,  $m$  为衍射级次,  $\lambda$  为入射光波长。

第二种情况下,光线要先经过光学胶后才入射到光栅表面。假设光学胶的折射率为  $n_b$ , 此时的光栅方程为

$$n_b \cdot d_b \cdot (\sin i_b + \sin \theta_b) = m \cdot \lambda. \quad (3)$$

根据折射定律得到

$$n_b \sin i_b = n_m \sin i_m, \quad (4)$$

$$n_b \sin \theta_b = n_m \sin \theta_m. \quad (5)$$

将(4)式和(5)式代入(3)式,可得

$$n_m \cdot d_b \cdot (\sin i_m + \sin \theta_m) = m \cdot \lambda, \quad (6)$$

对比(2)式和(6)式,发现  $d_m = d_b$ , 即光栅常数不变。

光栅在 Zemax 中就两个参数,刻线数和衍射级次。因此,不管哪种加工方式,光栅的参数是一样的,光学系统的参数也就一样了。第二种方式在实际加工制作中更容易且成本更低,而第一种方式在 Zemax 仿真中更方便。

#### 3.2 光谱分辨率分析

根据光栅方程和 Czerny-Turner 结构的原理,得到光栅的线色散率倒数为

$$\frac{d\lambda}{dl} = \frac{n_m d_m \cos \theta_m}{m \cdot L_4} = \frac{\Delta\lambda}{W_d}, \quad (7)$$

式中  $L_4$  为成像镜到像面的距离,  $\Delta\lambda$  为光谱仪工作波长范围,  $W_d$  为像面的宽度。

光栅的分辨能力  $R$  为

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda_g} = m \cdot n_m \cdot N, \quad (8)$$

$$\delta\lambda_g = \frac{\lambda}{R} = \frac{\lambda}{m \cdot n_m \cdot N}, \quad (9)$$

式中  $N$  为光栅刻线总数,  $\delta\lambda_g$  为由衍射极限确定的光谱分辨率。

分辨能力  $R$  代表的是光栅的衍射极限分辨率,是由孔径衍射决定的。实际的光谱分辨率  $\delta\lambda$  可以用仪器线型函数的半峰全宽(FWHM)来表示,主要受狭缝宽度、像差影响<sup>[11]</sup>:

$$\delta\lambda = \sqrt{\delta\lambda_g^2 + \delta\lambda_s^2 + \delta\lambda_a^2}, \quad (10)$$

$$\delta\lambda_s = \frac{n_m \cdot d_m \cdot W_s' \cdot \cos \theta_m}{m \cdot L_4}, \quad (11)$$

$$\delta\lambda_a = \frac{n_m \cdot d_m \cdot W_a \cdot \cos \theta_m}{m \cdot L_4}, \quad (12)$$

式中  $\delta\lambda_s$  为有限狭缝宽度决定的光谱分辨率,  $\delta\lambda_a$  为像差导致的光谱分辨率,式中  $W_s'$  为狭缝像的宽度,  $W_a$  为像差导致弥散斑的等效宽度(点扩散函数的半高宽)

$$W_s' = \frac{L_4 \cdot \cos i_m}{L_l \cdot \cos \theta_m} \cdot W_s, \quad (13)$$

$$W_a = 2.4 V_{\text{RMS,Spot,Y}}, \quad (14)$$

式中  $W_s$  为狭缝的宽度,  $L_l$  为狭缝到准直镜的距离,  $V_{\text{RMS,Spot,Y}}$  是 Zemax 软件根据实际光线计算出来的一个值。  $V_{\text{RMS,Spot,Y}}$  可以反映弥散斑在  $Y$  方向上的离散程度。(14)式中的系数 2.4 是一个经验值。

根据(9)~(14)式可以计算光学系统的光谱分辨率;也可以根据分辨率要求,按照(7)式和(11)式进行光学参数的合理分配,确定初始光学结构。

### 3.3 平板波导结构的设计

ZnSe 平板波导结构在 YZ 平面内的设计是在 Czerny-Turner 结构的基础上进行机械设计, 保证加工及安装的可行性。在 XZ 平面内的设计包括入射面、波导高度、出射面的设计。入射面的设计要使狭缝发出的光尽可能的平行于光轴。出射面的设计要使会聚到像面上的光斑尺寸尽可能小。波导的高度会影响出射面的会聚效果, 高度大则会聚效果好, 反之则会聚效果差。因此波导高度的设计要考虑尺寸、成本以及对出射面的影响。

## 4 设计实例与分析

根据上述原理设计一款基于 ZnSe 平板波导的小型红外光谱仪, 数值孔径 0.3, 工作波长 8~14 μm, 光谱分辨率 80 nm。所用的探测器为 384×288 的非制冷焦平面探测器, 像元尺寸 35 μm。使用阵列探测器时, 一般推荐 FWHM 宽度的光谱范围要有 3~6 个采样点<sup>[11]</sup>, 一个采样点为一个像元, 相邻两个采样点间的距离为采样间隔。所用采样点越多, 复原得到的光谱的峰位置和形状越准确。本设计中 8~14 μm 的光谱要展开在 384 个像元上, 计算得到光谱采样间隔为 16 nm, 即宽度为 80 nm 光谱范围内有 5 个采样点。

### 4.1 结构的优化设计

将对称 Czerny-Turner 结构<sup>[2]</sup>作为初始结构, 需要确定的参数有: 反射镜的曲率半径  $r_1 = r_2 = r$  (焦距  $f = r/2$ ), 准直镜的离轴角  $\alpha$ , 光栅入射光与衍射光的夹角  $\varphi$ , 成像镜的离轴角  $\beta$  以及光栅常数  $d_m$ 。

根据(7)式计算线色散率倒数并得到初始的光栅常数  $d_m$  和像距  $L_4$

$$\frac{d\lambda}{dl} = \frac{14 - 8}{384 \times 0.035} = \frac{n_m d_m \cos \theta_m}{m \cdot L_4} \approx \frac{2.4 \times d_m}{L_4} \quad (15)$$

取光栅常数为  $d_m = 16.667 \mu\text{m}$  (即光栅刻线数为 60 lines/mm);  $L_4 = 9.6 \text{ mm}$ , 即  $r = 2L_4 = 179.2 \text{ mm}$ ;  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ 。

然后先在 Zemax 的序列模式中进行优化, 优化目标为  $V_{\text{RMS, Spot, Y}}$  最小。变量包括: 准直镜和成像镜的曲率半径、入射面和出射面的曲率半径、元件间的距离、离轴角。约束条件包括: 不同波长光斑在像面上的位置、元件间的距离、离轴角等。然后再在非序列模式中进行优化, 优化目标为色散方向光斑尺寸最小, 优化结果与序列模式中的一致。优化后光学系统参数如表 1 所示, 3D 结构图如图 2 所示, ZnSe 平板波导的尺寸大小为 70 mm×70 mm×4 mm。

表 1 优化后的光学参数

Table 1 Optical parameters after optimization

Optical parameter	Value
Distance between slit and entrance /mm	4.0
Distance between entrance and collimating mirror /mm	60.0
Distance between collimating mirror and grating /mm	68.5
Distance between grating and focusing mirror /mm	70.6
Distance between focusing mirror and exit /mm	70.7
Distance between exit and detector /mm	4.0
Off-axis angle of collimating mirror /( $^\circ$ )	9.0
Incidence angle of grating /( $^\circ$ )	22.0
Exit angle of grating /( $^\circ$ )	5.717
Off-axis angle of focusing mirror /( $^\circ$ )	12.0
Radius of curvature of entrance /mm	6.000
Radius of curvature of collimating mirror /mm	134.224
Radius of curvature of focusing mirror /mm	175.485
Radius of curvature of exit /mm	6.500
Groove density of grating /(lines/mm)	64
Height of ZnSe planar waveguide /mm	4.0

8、11、14 μm 的点列图如图 3 所示, 黑色圆圈为艾利斑。从图 3 中可以看出光斑的尺寸与艾利斑相近。 $V_{\text{RMS, Spot, Y}}$  曲线如图 4 所示, 从中可以看出  $V_{\text{RMS, Spot, Y}}$  小于衍射极限, 说明本系统中像差很小。根据(9)~(14)式计算不同狭缝宽度时的光谱分辨率, 如图 5 所示。



图2 光学系统3D结构图

Fig.2 3D model of optical system

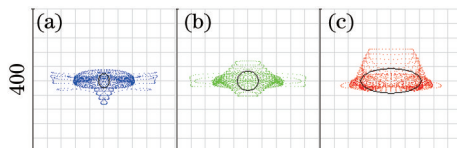


图3 不同波长的点列图。(a) 8 μm; (b) 11 μm; (c) 14 μm

Fig.3 Spot diagram of different wavelengths. (a) 8 μm; (b) 11 μm; (c) 14 μm

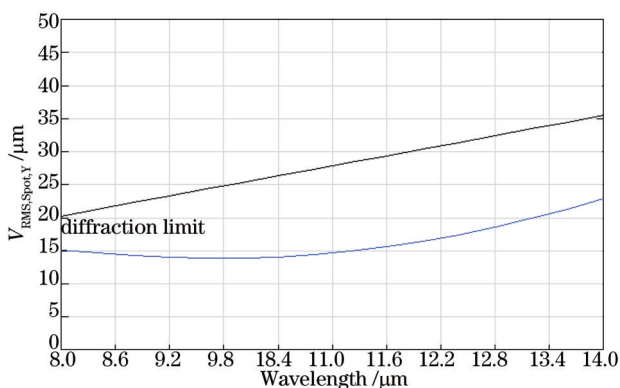


图4  $V_{RMS,Spot,Y}$  与波长的关系

Fig.4 Relationship between  $V_{RMS,Spot,Y}$  and wavelength

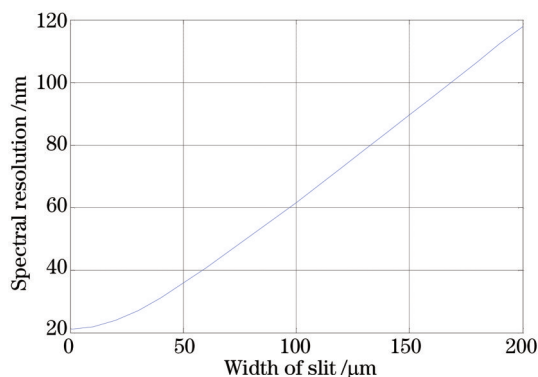


图5 狭缝宽度与光谱分辨率的关系

Fig.5 Relationship between spectral resolution and slit width

从图5中可以看出,狭缝宽度很小时,光谱分辨率主要受像差和衍射现象影响;狭缝宽度较大时,光谱分辨率主要受狭缝宽度影响,基本成线性关系。当狭缝宽度为零时(实际中不存在),光谱分辨率为21 nm;当狭缝宽度为135 μm时,光谱分辨率为80 nm,这是设计要求的光谱分辨率。

#### 4.2 对比分析

同样的设计要求,如果采用一般的 Czerny-Turner 结构实现,则系统结构如图6所示,  $V_{RMS,Spot,Y}$  曲线如图7所示。从图6、7中可以看出,一般的 Czerny-Turner 结构不仅尺寸大得多(尺寸70 mm×110 mm×60 mm),而且像差也大得多。根据  $V_{RMS,Spot,Y}$  计算得到,光谱分辨率最小为95 nm,不能满足设计要求。

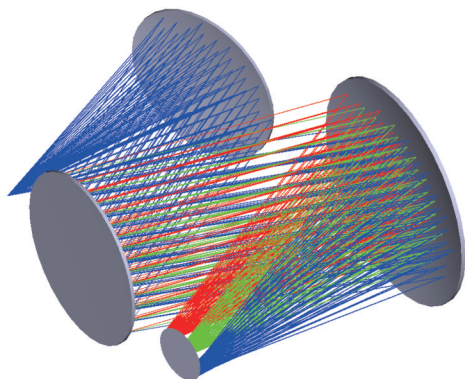


图6 一般的 Czerny-Turner 结构

Fig.6 Common Czerny-Turner structure

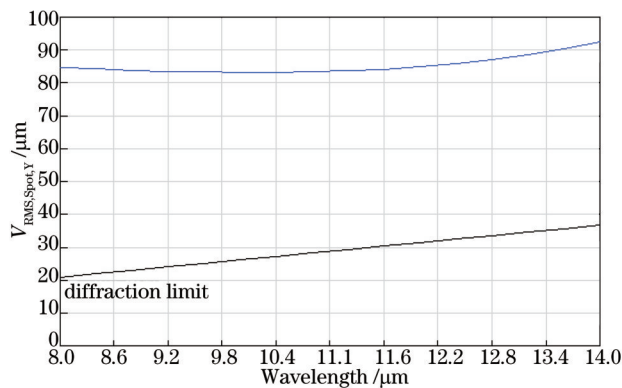


图7 一般 Czerny-Turner 结构的  $V_{RMS,Spot,Y}$  曲线

Fig.7  $V_{RMS,Spot,Y}$  curves of common Czerny-Turner structure



### 4.3 实际中一些问题的讨论

光线在 ZnSe 晶体中传播时会被晶格、材料缺陷、边界等散射,降低光学透射率,同时形成杂散光<sup>[6,10]</sup>。杂散光会降低信噪比,需要采取一些技术手段消除,如非工作表面涂消(吸)光涂料等。

整块 ZnSe 波导可以用超精密金刚石数控机床加工,优点是整体成形,缺点是出了问题就整块报废,而且加工费用高。另一种经济适用的加工方法是将 4 个柱面透镜(2 个透射,2 个反射)及平面光栅单独加工,然后在装配监视条件下,以平面对平面进行胶合。这样做的好处是有一定的装调余量,不至于出了问题就整个报废。

## 5 结 论

从 Czerny-Turner 结构的原理出发,提出一种基于 ZnSe 平板波导的小型红外光谱仪光学系统,实现了高光通量、高光谱分辨率的红外光谱探测。介绍了平板波导压缩光学系统尺寸的原理及优点,根据波导介质中的光栅方程,推导出光谱分辨率的计算公式,根据设计指标设计一个基于 ZnSe 平板波导的小型红外光谱仪光学系统,并与一般 Czerny-Turner 结构的光学系统进行对比分析。所设计的光学系统数值孔径 0.3,工作波长 8~14  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率 80 nm,ZnSe 平板波导尺寸 70 mm×70 mm×4 mm,狭缝宽度 135  $\mu\text{m}$ 。结果表明:基于 ZnSe 平板波导的小型红外光谱仪光学系统不仅尺寸小、光通量高、光谱分辨率高,而且装调容易、抗振性能好。

### 参 考 文 献

- 1 Ocean Optics. Usb4000 Datasheet [DB/OL]. <http://oceanoptics.com/products/usb4000.asp>.
- 2 Cheng Liang. Research and Application of Microspectrometers System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 11-13, 47-50.  
程 梁. 微型光谱仪系统的研究及其应用[D]. 杭州:浙江大学, 2008: 11-13, 47-50.
- 3 Xu Danyang, Tong Jianping, Gao Jianxun, *et al.*. Fiber spectrometer optical simulation optimization and calibration[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0516003.  
徐丹阳, 童建平, 高建勋, 等. 光纤光谱仪光路模拟优化及波长定标[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0516003
- 4 Wang Baohua, Ruan Ningjuan, Guo Chongling, *et al.*. Optical system design of airborne light and compact high resolution imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022001.  
王保华, 阮宁娟, 郭崇岭, 等. 机载轻小型高分辨率成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022001.
- 5 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316003.  
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- 6 Liu Bing, Yu Fanju, Sun Qiang, *et al.*. New approach of stray light suppression for probe system of handheld Raman spectrometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0115001.  
刘 兵, 于凡菊, 孙 强, 等. 手持式拉曼光谱仪探头系统的杂光抑制新方法[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0115001.
- 7 Wolffenbutter R F. State-of-the-art in integrated optical microspectrometers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2004, 53(1): 197-202.
- 8 Daly J T, Johnson E A, Bodkin W A, *et al.*. Recent advances in miniaturization of infrared spectrometers[J]. SPIE, 2000, 3953: 70-87.
- 9 Henning P F, Chadha S, Damren R, *et al.*. Miniaturized spectrometer for stand-off chemical detection[C]. Environmental and Industrial Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2002, 4574: 37-43.
- 10 Ikeda Y, Kobayashi N, Kondo S, *et al.*. ZnS and ZnSe immersion gratings for astronomical high-resolution spectroscopy-evaluation of internal attenuation of bulk material in the short NIR region[J]. Opt Eng, 2009, 48(8): 084001.
- 11 Lerner J M, Thevenon A. The Optics of Spectroscopy[DB/OL]. <http://www.horiba.com/cn/scientific/products/optics-tutorial/>.

栏目编辑: 韩 峰