

文章编号 1004-924X(2005)06-0637-06

一种采用微硅片狭缝的新型微小型光纤光谱仪

周连群^{1,2}, 吴一辉¹, 张平¹, 宣明¹, 贾宏光¹, 李正刚^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:研制了一种采用微硅片狭缝代替传统机械狭缝的微小型光纤光谱仪。采用 MEMS(微机电系统)工艺制造出了体积小、厚度薄的一体式微硅片狭缝,并分析了微硅片狭缝的狭缝不平直度对微小型光纤光谱仪分辨率的影响,通过测试系统分辨率的实验,验证了采用微硅片狭缝的可行性。同时,对微小型光纤光谱仪的光谱带宽和像元分辨力进行了讨论,为波长的标定提供了一种理论依据。通过对采集的汞灯谱线的分析和 MATLAB 的精确计算,验证了所提出的通用波长-像元迭代公式的正确性,从而研制出了一种采用微硅片狭缝的半峰全宽为 0.85 nm,波长标定精度小于 0.2 nm,体积为 50 mm×46 mm×14 mm 的微小型光纤光谱仪。

关键词:微硅片狭缝;微小型光纤光谱仪;微光机电系统;分辨率;波长标定公式

中图分类号:TH744.1;O433.1 **文献标识码:**A

A new mini-fiber-spectrometer adopting micro-silicon-slit

ZHOU Lian-qun^{1,2}, WU Yi-hui¹, ZHANG Ping¹, XUAN Ming¹, JIA Hong-guang¹, LI Zheng-gang^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A new mini-fiber-spectrometer was developed with micro-silicon-slit instead of traditional mechanical slit. By calculating the impact of nonlinearity MEMS-based slit on the resolution of the mini-fiber-spectrometer and measuring the resolution of the system, it finds that using micro-silicon slit is efficient. Meantime, a theory for wavelength-pixel calibrating was brought forward after analyzing the resolution of pixel and FWHM, which was validated by analyzing data of the experiments of measuring the mercury-arc and fine calculating through the tool of MATLAB system. The results show that the new mini-fiber-spectrometer with micro-silicon-slit is worked out, its FWHM is 0.85 nm, the precision of the wavelength calibration is less than 0.2 nm and the volume is 50 mm×46 mm×14 mm.

Key words: micro-silicon slit; mini-fiber-spectrometer; MOEMS; resolution; formula for wavelength calibration

收稿日期:2005-07-22;修订日期:2005-09-01.

基金项目:国家 863MEMS 重大专题项目(No. 2003AA-3-A19);(No. 2004AA404250);中国科学院二期创新资助项目。

1 引言

光谱仪是光学仪器的重要组成部分之一,是对物质的结构和成分进行测量和分析的基本设备,具有分析精度高、测量范围大、速度响应快等优点,广泛应用于医学、化学、地质学、物理及天文学等学科的研究中。微小型光纤光谱仪集成了各学科领域的先进技术成果,例如光谱技术、微机械技术、高效光敏材料、半导体制冷技术、光纤精密定位技术、微光学元件加工技术、精密加工技术、CCD耦合技术、高速度 A/D 转换技术、计算机控制技术和高速电子集成电路技术等^[1]。作为 MOEMS 的一种,微小型光纤光谱仪具有许多大型光谱仪所不具备的优点,如质量轻、体积小、探测速度快、使用方便、可集成化、可批量制造以及成本低廉等^[2]。采用线阵探测器阵列方式的光谱仪为全固态安装,没有机械传动,延长了使用寿命;减小传统倍增管探测方式仪器的体积,提高了定位精度^[3]。本文将微小型光纤光谱仪应用于医用生化分析仪器中并制造出了便携式生化分析仪,该仪器相对传统的大型生化分析仪具有体积小、携带方便、价格低、易于家庭化普及等优点,具有巨大的市场前景。在研究便携式生化分析仪时,其分辨率是非常重要的因素,我国和世界各国药典规定用于药检和生化分析的紫外可见分光光度计的光谱带宽要小于 2 nm ^[4]。本文结合 MEMS 机电系统技术为光谱仪制造出了微硅片狭缝,并将其用于微小型光纤光谱仪中,通过理论计算和实验验证微硅片狭缝对微小型光纤光谱仪分辨率的影响,进一步对微小型光纤光谱仪光谱带宽和像元分辨力进行了讨论,为光谱仪波长的标定提供了一种理论依据,给出了通用波长标定公式。

2 系统的组成和分析

本系统采用的是小型折叠 Czerny-Turner 结构,这种结构比较容易通过内部集成光阑来抑制杂散光,并且可以使得系统结构紧凑。它是将狭缝入射的光信号通过色散系统,按波长由小到大(或由大到小)的顺序沿垂直于狭缝的方向分开,并将色散后的光线聚焦到输出焦平面上。主要的

部件有微硅片狭缝、准直系统、色散系统(光栅)和聚焦系统。光线经引导光纤进入入口,经过微硅片狭缝对光线进行控制,使光束宽度按要求的宽度入射到准直反射镜 M_1 上,准直反射镜把光线准直后入射到光栅 G 上进行分光,分光后的光束再照射到成像反射镜 M_2 上,成像在出口探测器光敏面上。在准直反射镜 M_1 处的一侧加设集成渐晕光阑,去掉像差较大的一部分光束^[5]。

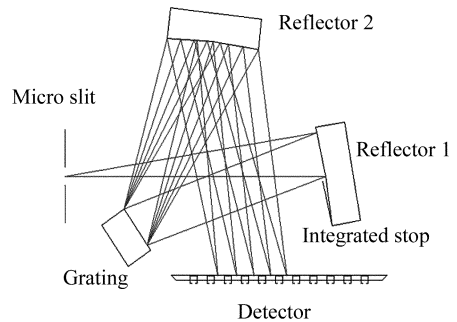
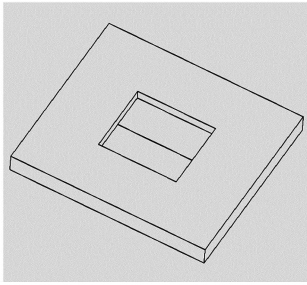


图 1 小型折叠 Czerny-Turner 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the mini-folded Czerny-Turner optical path

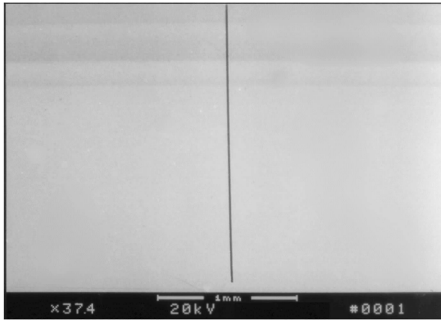
2.1 微硅片狭缝

狭缝是光谱仪的重要组成部分,狭缝的宽度直接影响光谱仪系统的分辨率,狭缝的高度直接影响光谱仪的探测强度。传统光谱仪狭缝是采用机械方法加工的,具有体积大、加工困难、装调复杂等缺点。若仍然采用机械加工的方法加工和装配狭缝,会使得光谱仪的体积增大,装配更加复杂,很难装配出理想微小型光纤光谱仪,更难应用于便携式生化分析仪中。采用微机械加工工艺加工出的硅片狭缝具有体积小、质量轻、价格低廉、适宜批量化生产等优点。系统的分辨率直接受狭缝宽度的影响,利用微机械加工工艺加工的硅片狭缝孔的宽度可以在 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 内任意选择,完全满足系统分辨率对狭缝宽度的要求。硅片狭缝的另一个优点是超薄型,由于采用硅片,其支撑膜的厚度可以在 $2\sim 100\ \mu\text{m}$ 内选择。硅片狭缝的刀口的平直度必须很好才能满足系统的要求。图 2 是微硅片狭缝的图片,其中(a)是微硅片狭缝的三维立体图,是本系统设计的模型;图(b)、(c)、(d)分别是在扫描电子显微镜下观察的微硅片狭缝的图片;图(b)为微硅片狭缝的下表面图,放大倍率是 37.4 倍,可看出狭缝在低倍率扫描电镜下



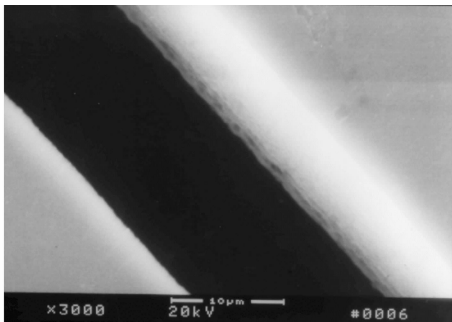
(a)微硅片狭缝的三维立体图

(a) Three-dimensional picture of the micro silicon slit



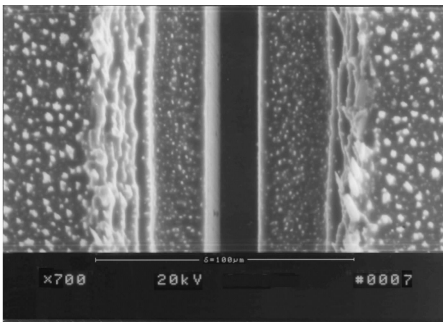
(b)微硅片狭缝的下表面

(b) Under-surface of the micro silicon slit



(c)微硅片狭缝的底面倾斜视图

(c) Tilt view of the micro silicon slit bottom



(d)微硅片狭缝的刻蚀表面的正视图

(d) Upper surface of the micro silicon slit

图 2 微硅片狭缝

Fig. 2 Micro silicon slit

是非常平直的缝隙;(c)图是微硅片狭缝底面的倾斜视图,放大倍率是 3000 倍,可以看出狭缝的侧面非常平整;(d)图是微硅片狭缝的正面视图,放大倍率是 700 倍,可以看出狭缝的 2 个刀口的平直性很好。

表 1 微硅片狭缝和传统金属狭缝的对比

Tab.1 Contrast between the silicon slit and the traditional metal slit

	质量 (g)	附件质量 (g)	厚度 (mm)	加工 难易	批量化 生产
微硅片狭缝	0.012	无	0.002~ 0.100	中	易
机械狭缝	0.625	9.066	0.2~2	难	难

硅片狭缝和传统金属狭缝的对比如表 1 所示。通过对比可以看出硅片狭缝是传统机械狭缝质量的 1/52,厚度的 1/100~1/20。传统的金属狭缝绝大多数是两个金属刀口通过附件连接在一起的,对连接的工艺也有一定的要求,否则会造成狭缝的宽度不一致。而硅片狭缝是通过微机械工艺一次加工而成的一体结构,无须附件就可以形成狭缝。由于采用微机械工艺加工,硅片狭缝更适宜批量化生产,在直径为 75 mm 的硅片基底上,可以排列出 10×10 阵列的硅片狭缝,且加工的成品合格率大于 99%。

2.2 分辨率分析

由于本系统中采用如图 1 所示小型折叠 Czerny-Turner 结构,其入射角 α 比较大,加之狭缝的宽度不为零,通用的分辨率公式就不适宜解决本系统的问题,所以必须对系统的分辨率重新进行推导和计算。在像差矫正较好的情况下,公式的推导如下:

从光栅衍射方程

$$d(\sin \alpha \pm \sin \beta) = m\lambda, \tag{1}$$

可得角色散

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta}, \tag{2}$$

线色散

$$\frac{dl}{d\lambda} = f_2 \times \frac{m}{d \cos \beta}, \tag{3}$$

其中, α 为入射角, β 为衍射角, d 为光栅常量, m 为衍射级次, λ 为光波波长, f_2 为焦距。+ 表示 α 、 β 同侧, - 表示两者异侧。

当狭缝的宽度引入后,衍射方程变为

$$d[\sin(\alpha + \Delta\alpha) \pm \sin(\beta + \Delta\beta)] = m\lambda, \quad (4)$$

式(4)减式(1)并整理得

$$\frac{\sin \frac{\Delta\beta}{2}}{\sin \frac{\Delta\alpha}{2}} = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}, \quad (5)$$

由于 $\Delta\alpha \ll 1, \Delta\beta \ll 1$ 得

$$\frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}, \quad (6)$$

其中

$$\Delta\alpha = \frac{S}{f_1}, \quad (7)$$

$$\Delta\beta = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \times \frac{S}{f_1}. \quad (8)$$

狭缝在焦平面上所成的像宽

$$\Delta L = f_2 \times \Delta\beta, \quad (9)$$

可分辨的波长差

$$\Delta\lambda = \Delta l \times \frac{d\lambda}{dl}, \quad (10)$$

把式(9)带入,得

$$\Delta\lambda = \frac{dS \cos \alpha}{mf_1}, \quad (11)$$

其中 $\Delta\alpha$ 表示入射微小扩散角, $\Delta\beta$ 表示衍射光束微小扩散角, f_1 为准直凹面反射镜焦距, f_2 为成像凹面反射镜焦距, S 为狭缝的宽度, d 为光栅常量, m 为光栅衍射级次。

光栅常量 d 的选择:由 $\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta}$ 得知: d 越小,角色散越大,即波长分散的越开,但是, d 并不能一味的减小,当 d 和光波波长相比较小时,光栅将起到反射镜的作用而不是光栅的衍射。故 d 的选择也取决于所要衍射的光的波长范围,对于紫外可见光栅光谱仪而言, d 的选择取决于其衍射的最大波长 $\lambda = 800$ nm。基于以上的考虑,本文中选用 $1/d = 600$ line/mm。本系统其他数据是 $S = 18.7 \mu\text{m}$, $\alpha = 14^\circ$, $f_1 = 36.895$ mm, $m = -1$,可求得 $\Delta\lambda = 0.8196$ nm。同样,由式(11)可知,当狭缝的宽度变化 $1 \mu\text{m}$,光谱带宽将变化 0.044 nm,本系统中所用到硅片狭缝的宽度不均匀性小于 $0.1 \mu\text{m}$,换算成对光谱带宽的影响为 0.0044 nm,所占的百分比为 0.5% ,为容许范围之内。

2.3 像元分辨力

像元分辨力指光探测传感器的一个像元所占

的光谱带宽^[6],本文中用 $\delta\lambda'$ 表示

$$\delta\lambda' = \frac{\delta L}{n}, \quad (12)$$

式中的 n 由下式决定

$$np = \delta L, \quad (13)$$

式中 p 表示两相邻像元中心距离。

$$\delta\lambda' = \frac{d p \cos \beta}{m f_2}, \quad (14)$$

由式(1)可知 $\cos \beta$ 是波长 λ 的关系式,对不同的波长, $\cos \beta$ 不同,也就造成 $\delta\lambda'$ 不同。波长越小, $\cos \beta$ 越大, $\delta\lambda'$ 也就越大,探测器像元分辨力数值也就大,对波长细化能力也就越差。同时像元间距 p 越小, $\delta\lambda'$ 也就越小。本文中选用的探测器型号是 SLIS-2 048,其几何参数为: $2\ 048$ pixels; $7 \mu\text{m} \times 14\ 336 \mu\text{m}$ imaging area; $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ pixel on $7 \mu\text{m}$ pixel pitch; fill factor $> 99\%$ 。考虑到微小光纤光谱仪的安装和统一性需要,本系统中 $f_2 = f_1 = 36.895$ mm。基于以上参数并结合式(1)和式(14),用 MATLAB 做出像元分辨力 $\delta\lambda'$ 与波长 λ 的关系曲线如图 3 所示。

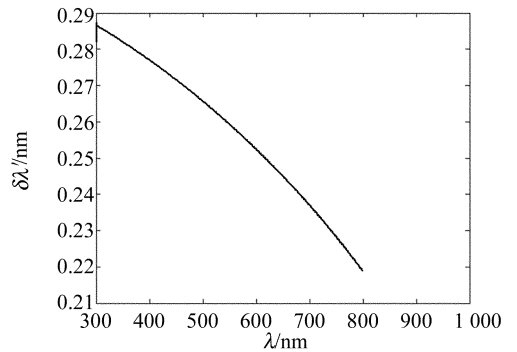


图 3 像元分辨力 $\delta\lambda'$ 与波长 λ 的关系曲线

Fig. 3 Relation between pixel resolution $\delta\lambda'$ and wavelength λ

像元分辨力的非线性必然会给波长的标定带来非线性。像元分辨力和波长的关系曲线为波长的标定提供了理论依据。

3 实验和分析

3.1 采集数据

用采用微硅片狭缝的新型微小型光纤光谱仪测试汞灯的谱线如图 4 所示,可以看出其汞双线 576.96 nm 和 579.07 nm 完全分开,表明采用机械加工工艺加工的硅片狭缝可以用于微小型光

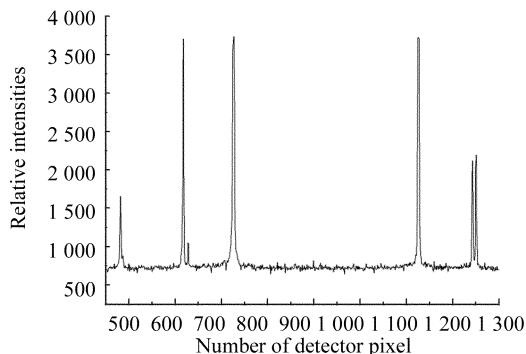


图 4 采集的汞灯谱线图

Fig. 4 Spectral line of the Hg-lamp

纤光谱仪,并且能得到很佳的结果。

3.2 波长-像元迭代关系的推导和验证

根据式(1)、(14)并结合像元分辨力推导波长-像元的迭代关系为

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} + \frac{dp\sqrt{1 - \left(\sin \alpha - \frac{m\lambda_{k-1}}{d}\right)^2}}{mf_2}, \quad (15)$$

其中 λ_k 为第 k 个像元对应的波长, λ_{k-1} 为第 $k-1$ 个像元对应的波长。理想状况下,若给出像元和波长的初始值,由波长-像元的迭代关系式就可以计算出波长对应于每一个像元对应的波长值。波长-像元的迭代关系为系统的波长的标定提供了理论和实际依据。考虑到光学元件和光学元件固定机构的实际加工误差,以及像差、焦平面弯曲等因素,实际的波长和像元之间并不能完全符合波长-像元的迭代关系。本文分别在 α 和 f_2 前面加修正系数以得出满足实际需要的波长-像元迭代公式,再对较多的已知点进行分段标定,从而把系统的波长更精确地标定出来。本方法和文献[7]中所提到的波长定标方法有所不同,文献[7]中所提到的方法是对采集的结果进行多次曲线拟合,而本方法采用的是预知加修正思想。

以采集的 365.01~546.08 nm 之间的数据为第一段,标定迭代修正公式为

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} + \frac{dp\sqrt{1 - \left(\sin 1.05\alpha - \frac{m\lambda_{k-1}}{d}\right)^2}}{0.9395mf_2}, \quad (16)$$

以 546.08~632.8 nm 之间的数据为第二段,标定迭代修正公式为

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} + \frac{dp\sqrt{1 - \left(\sin \alpha - \frac{m\lambda_{k-1}}{d}\right)^2}}{0.97575mf_2}, \quad (17)$$

将通过 MATLAB 编程计算得到的数据带入表 2 并进行对比。

表 2 波长-像元标定数据表

Tab. 2 Data of wavelength and pixel

像元 (pixel)	理论波长 λ_i (nm)	标定波长 λ_i' (nm)	标定残差 v_i (nm)
491	365.01	初始值	0
625	404.66	404.461474	-0.198526
733	435.84	435.818661	-0.021339
1125	546.08	546.0942103	-0.0142103
1242	576.96	576.9988651	0.0388651
1250	579.07	579.0936277	0.0246277
1458	632.8	632.735507	-0.064493

由贝塞尔公式^[8],得标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 v_i^2}{7-1}} = 0.0879 \text{ nm}$$

从以上的实验和实际的标定数据可以看出,通过对式(15)进行一定的修正,就得到了满足实际微小光纤光谱仪的波长标定公式。故通用的波长-像元的迭代关系式为

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} + \frac{dp\sqrt{1 - \left(\sin k_\alpha - \frac{m\lambda_{k-1}}{d}\right)^2}}{k_{f_2}mf_2}, \quad (18)$$

式中的 k_α 、 k_{f_2} 分别根据实际的数据对 α 、 f_2 进行修正。

3.3 分辨率的分析

由采集汞灯的谱线可以看出,采用微硅片狭缝的微小光纤光谱仪可以完全把汞灯汞双线分

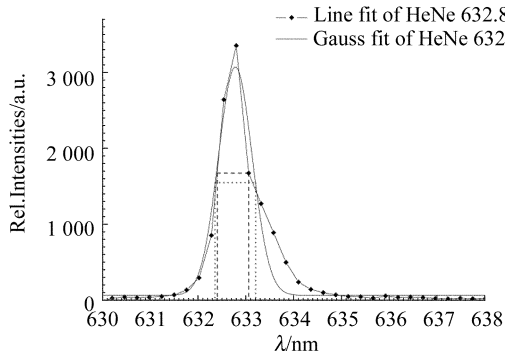


图 5 测量的 HeNe 激光谱线,线宽是 0.001 nm 的激光被光谱仪展宽

Fig. 5 Measured spectral line of a HeNe laser, laser line width in the picometer range, broadened by spectrometer

开。为了更好地测出本系统的分辨率,用本仪器测量线宽为 0.001 nm,波长为 632.8 nm 的 HeNe 激光器的光谱,读出的光谱采集点如图 5 所示。对采集的数据点进行处理,给出了 2 种拟合方法,方法一采用直线拟合,发现半峰全宽(FWHM)为 0.65 nm,好于前面分析的结果 0.82 nm,显然是不正确的。由于激光发出的光为高斯光斑,方法二采用高斯曲线拟合,其半峰全宽(FWHM)为 0.85 nm,符合实际。可以看出采用微硅片狭缝的微型光纤光谱仪分辨率接近理论分辨率。

4 结 论

微硅片狭缝是采用微型光纤光谱仪的关键技术,也是光谱探测仪器中的新颖技术。它的引

入解决了机械狭缝的加工装调复杂、体积大、精度有限等问题,使得狭缝的体积、质量大幅度减小且狭缝的平直度优于 0.1 μm 。通过分析引入狭缝宽度对光栅衍射方程的进一步推导,得到了含有狭缝宽度的分辨率公式,验证了狭缝平直度对系统分辨率的影响。进一步对像元分辨力进行分析,得到了波长-像元的迭代关系通用公式,用采集的汞灯和 HeNe 激光器的数据对公式进行一定的修正后,再对系统定标,用贝塞尔函数分析标定的残差的标准差仅为 0.087 9 nm,验证了提出波长-像元的迭代关系通用公式的合理性。通过分析系统的分辨率,进一步验证了采用微硅片狭缝的微型光纤光谱仪其分辨率接近理论分辨率,因此研制出了外型尺寸 50 mm \times 44 mm \times 14 mm,半峰全宽(FWHM)为 0.85 nm 的微型光纤光谱仪。

参考文献:

- [1] 于常青,刘杰,李家泽,等. 光学多通道分析仪的分辨率分析[J]. 光学技术,2001,27(2):97-99.
YU CH Q, LIU J, LI J Z, et al. The resolution of optic multichannel analyzer[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(2): 97-99. (in Chinese)
- [2] 鞠挥,吴一辉. 微型光谱仪的发展现状[J]. 光学 精密工程,2001,9(4):372-376.
JU H, WU Y H. The State of the art of micro spectrometers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4): 372-376. (in Chinese)
- [3] 赵育良,张青臣,李开瑞. 基于线阵 CCD 的全息光栅位移传感器[J]. 测试技术学报,2002,16(3):167-170.
ZHAO Y L, ZHANG Q CH, LI K D. The holographic grating displacement sensors based on linear CCD[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2002, 16(3): 167-170. (in Chinese)
- [4] 李昌厚. 光谱带宽与分析测试误差的关系[J]. 分析测试技术与仪器,2004,10(2):65-67.
LI CH H. Study on relationship between the spectrum band width and the absorbance error[J]. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 2004, 10(2): 65-67. (in Chinese)
- [5] 鞠挥. 用于生化分析的光谱仪微型化的研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2002.
JU H. *Study on miniaturization of spectrometer for biochemical use*[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- [6] 胡松,温志渝,等. 一种新型微型光谱仪的设计[J]. 压电与声光,2000,22(6):363-366.
HU S, WEN ZH Y, et al. Design of a novel mini-spectrometer[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2000, 22(6): 363-366. (in Chinese)
- [7] 徐中民,禹秉熙. 对 PC2000-PC/104 型光谱仪的波长定标[J]. 光学 精密工程,2004,12(1):11-14.
XU ZH M, YU B X. Wavelength calibration for PC2000-PC/104 spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(1): 11-14. (in Chinese)
- [8] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
FEI Y T. *Error theory and data processing*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000. (in Chinese)

作者简介:周连群(1981—),男,山东金乡人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室硕博连读生,主要研究方向为微光机电系统和微光谱仪。E-mail:lianqunzhou@sohu.com 或 zhllq@ciomp.ac.cn.