

文章编号 1674-2915(2012)05-0470-06

## 交叉型消像散 Czerny-Turner 结构光谱仪设计

安岩<sup>1,2</sup>, 孙强<sup>1\*</sup>, 刘英<sup>1</sup>, 李淳<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 130049)

**摘要:**以相对孔径为 1:8, 工作波段为 780 ~ 1 014 nm 为初始光学参数, 首次推导出交叉型 Czerny-Turner (C-T) 结构光谱仪的一阶消像散条件, 搭建了交叉型消像散 C-T 结构和交叉型消彗差 C-T 结构。利用 ZEMAX 软件对两种初始结构进行了优化和比较。结果表明:交叉型消像散 C-T 结构具有更优越的光学性能, 其均方根半径仅是消彗差 C-T 结构的 12% ~ 52%。消像散 C-T 结构不仅在沿狭缝方向上能量更为集中, 利于设计大聚光能力的分光系统, 而且在沿垂直于狭缝方向上点斑更小, 具有更高的光谱分辨率。

**关键词:**光学设计; 切尔尼-特纳 (C-T) 结构; 交叉型光谱仪; 消像散结构; 消彗差结构

**中图分类号:** TH744.1; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120505.0470

## Design of astigmatism-free crossed Czerny-Turner spectrometer

AN Yan<sup>1,2</sup>, SUN Qiang<sup>1\*</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1</sup>

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

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

\* *Corresponding author, E-mail: sunq@ciomp.an.cn*

**Abstract:** The first-order astigmatism-free conditions in a crossed Czerny-Turner (C-T) structure spectrometer are derived in this paper and the optical parameters determined for a relative aperture of 1:8 and a working range of 780 nm to 1 014 nm. An astigmatism-free crossed C-T spectrometer is built up with ZEMAX software, and a corresponding coma-free crossed C-T spectrometer is also built up for the comparison. The initial structures for the two types of crossed C-T optical systems are then optimized, and the performance merits are compared. It is shown that the astigmatism-free crossed C-T structure has superior optical performance with an RMS for the spot diagram only 12% to 52%, compared with that of the corresponding coma-free C-T structure over the working range. This indicates that the astigmatism-free crossed C-T structure possesses not only a better energy concentration along the slit direction, which is beneficial to spectrometers requiring larger condenser

收稿日期: 2012-06-21; 修订日期: 2012-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60977001); 吉林省与中国科学院合作长吉图开发开放先导区科技创新合作专项基金资助项目 (No. 2011CJT0004); 吉林省科技厅资助项目 (No. 20106015; No. 20100310); 长春市科技局支撑计划资助项目 (No. 10023UN100)

capacity, but also a smaller spot diameter along the direction perpendicular to the slit indicating that a higher spectrum resolution is achievable.

**Key words:** optical design; Czerny-Turner structure; crossed spectrometer; coma-free structure; astigmatism-free structure

## 1 引言

传统的 Czerny-Turner (C-T) 结构光谱仪考虑了消球差条件和消彗差条件<sup>[1-2]</sup>,它采用两镜分离的方式,避免了 Ebert-Fastie 结构的二次和多次衍射所带来的问题。现在 C-T 结构的分光系统以其简单的结构和良好的光谱分辨率,已广泛应用于拉曼光谱等微弱信号检测和大气遥感等领域<sup>[3-5]</sup>。对于以光电倍增管作探测器的一维光谱仪系统,可以忽略像散所带来的影响,但是对于能量利用率敏感的高速线阵 CCD 和 CMOS 探测器,像散的影响却不容忽视,在二维成像光谱仪中,像散更是致命的缺点。人们在传统 C-T 结构的光学系统基础上,做了很多方面的改进,例如将两个球面镜改变为椭球面或者超环面<sup>[6]</sup>,在探测器前面加入柱镜<sup>[7]</sup>,在入射狭缝之前加入凹面镜<sup>[8]</sup>等。特别是 M. W. McDowell 提出的发散照明条件,利用光栅的像散来补偿两球面镜所带来的像散,实现了单一波长的消像散即零阶消像散条件<sup>[9]</sup>。而后 D. R. Austin 又进一步研究了宽光谱波段的消像散,即一阶消像散条件<sup>[10]</sup>,该类型的分光结构无额外的光学元件<sup>[11]</sup>,只需调整结构参数就可以达到消像散目的。

检测微弱信号时,要求光学系统有较强的聚

光能力,而光谱仪的聚光能力受限于光栅尺寸,大口径光栅不利于系统的小型化。与传统的 C-T 结构相比较,交叉型 C-T 结构具有相对孔径大和聚光能力强的优势,同时又具有杂散光小的特点。通常的交叉型结构也能满足消彗差条件,但是大像散是此类系统固有的缺点。如何实现交叉型 C-T 结构的消像散,特别是只需调整结构参数来实现消像散,迄今尚未有相关的报导。针对此问题,本文研究了交叉型 C-T 结构的一阶消像散条件,基于相同初始光学参数搭建了交叉型消像散和交叉型消彗差 C-T 结构,并对两种初始结构进行了优化和比较,最后给出了比较结果。

## 2 消像散条件

### 2.1 零阶消像散条件

对于物在有限距离的球面镜,其子午像面距离和弧矢像面距离是不同的,其大小与入射角和曲率半径有关;而处于非平行光路中的光栅也可以产生像散,其大小与光栅入射角和衍射角有关,因此,在传统 C-T 结构中,人们曾提出了零阶消像散条件,即利用光栅所带来的像散补偿系统中两个反射镜带来的像散。按照光线传播方向,光线经过准直物镜、光栅、聚光物镜,可以得出子午像面距离  $S_T$  和弧矢像面距离  $S_S$ :

$$\begin{cases} S_T = \frac{R_1 R_2 S}{2S(R_1 \sec \theta_2 + R_2 \sec \theta_1 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}) - R_1 R_2 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}}, \\ S_S = \frac{R_1 R_2 S}{2S(R_1 \sec \theta_2 + R_2 \sec \theta_1) - R_1 R_2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $S$  是入射狭缝到准直物镜的距离, $\theta_1$  是准直物镜的入射角度, $\theta_2$  是聚光物镜的入射角度, $\alpha$  是光栅入射角, $\beta$  为光栅衍射角, $R_1$  是准直物镜的曲

率半径, $R_2$  是聚光物镜的曲率半径。零阶消像散条件(即单波长消像散条件)为  $S_T = S_S$ , 得出满足该条件下的  $S$  值:

$$S = \left[ \frac{0.5 \times R_1 R_2 \left( \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} - 1 \right)}{R_1 (\sec \theta_2 - \cos \theta_1) + R_2 \left( \sec \theta_1 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} - \cos \theta_1 \right)} \right]. \quad (2)$$

虽然交叉型 C-T 结构与传统型 C-T 结构的形式不同,但是光线传播的顺序是相同的,因此式(2)也可以用于交叉型 C-T 结构的单波长零阶消像散。

## 2.2 一阶消像散条件

针对交叉型 C-T 结构的特点,利用与文献[9]相似的方法进行了一阶消像散条件的推导。交叉型 C-T 结构的几何结构如图 1 所示,其中  $L_{xz}$  是狭缝到准直物镜的距离,  $L_{zg}$  是准直物镜到光栅的距离,  $L_{gj}$  和  $L'_{gj}$  是中心波长光线和相邻波长光线分别经过光栅到聚光物镜的距离,  $L_{jd}$  和  $L'_{jd}$  是中心波长光线和相邻波长光线分别经过聚光物镜到像面的距离,  $\beta_1$  和  $\beta'_1$  分别是中心波长光线和相邻波长光线的光栅衍射方向与水平方向夹角,  $\theta_2$  是像面倾斜角度,  $d$  是中心波长光线与相邻波长光线在像面的距离,  $O$  是聚光物镜的球心。  $X$  是入射光线与光栅的交点,  $A$ 、 $A'$  是中心波长光线和相邻波长光线分别与聚光物镜的交点,  $B$  和  $B'$  是中心波长光线和相邻波长光线分别与像面的交点。

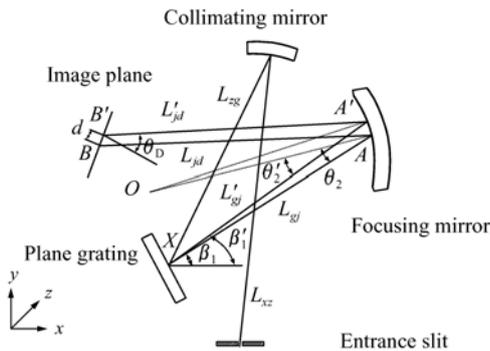


图 1 交叉型 C-T 光谱仪光路示意图

Fig. 1 Layout of crossed C-T spectrometer

由于光栅对不同波长的衍射角度不同,导致不同波长的像散不同,一阶消像散条件就是通过调整光学元件之间的距离和角度参数,使得光学系统的像散变化与衍射角无关:

$$\frac{dS_T}{d\beta} = \frac{dS_S}{d\beta} = \frac{dL_{jd}}{d\beta} \quad (3)$$

根据式(1)可以看出,子午距离、弧矢距离以及聚光物镜入射角均与光栅衍射角有关,式(3)中的分量可改写为:

$$\begin{cases} \frac{dS_S}{d\beta_1} = \frac{\partial S_S}{\partial \theta_2} \frac{d\theta_2}{d\beta_1} \\ \frac{dS_T}{d\beta_1} = \frac{\partial S_T}{\partial \beta_1} + \frac{\partial S_T}{\partial \theta_2} \frac{d\theta_2}{d\beta_1} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)带入式(3)可以得到:

$$\frac{d\theta_2}{d\beta_1} = \frac{\frac{\partial S_T}{\partial \beta_1}}{\frac{\partial S_S}{\partial \theta_2} - \frac{\partial S_T}{\partial \theta_2}} \quad (5)$$

同时,在交叉型 C-T 几何结构中根据矢量和公式,可以计算出:

$$\frac{dL_{gj}}{d\beta_1} = L_{gj} \tan \theta_2, \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_2}{d\beta_1} = 1 - \frac{L_{gj}}{R_2 \cos \theta_2}, \quad (7)$$

$$\frac{dd}{d\beta_1} = \sec \theta_D (L_{gj} - L_{jd} + \frac{2L_{jd}L_{gj}}{R_2 \cos \theta_2}), \quad (8)$$

$$\frac{dL_{jd}}{d\beta_1} = \tan \theta_D (L_{jd} - L_{gj} - \frac{2L_{jd}L_{gj}}{R_2 \cos \theta_2}) + L_{gj} \tan \theta_2. \quad (9)$$

通过式(5)和式(7)联立,可以求解出光栅到聚光物镜的距离  $L_{gj}$ ,从而找到满足一阶消像散条件的结构参数设置。

对比交叉型和传统型消像散 C-T 结构的一阶消像散公式,可以看到,交叉型消像散 C-T 结构所确定的式(6)、(7)与传统型消像散 C-T 结构中对应的公式相同,但对式(8)和式(9)却有一定区别,根据线色散公式:

$$\frac{dd}{d\lambda} = \frac{\partial \beta_1}{\partial \lambda} \frac{dd}{d\beta_1} = \frac{m}{d \cos \beta_1} \frac{dd}{d\beta_1}, \quad (10)$$

式中:  $m$  是光栅衍射级次,  $d$  是光栅常数。利用式(10),可以计算出不同光栅入射角时,交叉型消像散结构与传统型消像散结构的线色散,并以最大色散值进行归一化,得到两种结构的归一化线色散随光栅入射角的变化曲线,如图 2 所示。其中十字曲线代表传统型 C-T 结构,圆圈曲线代表交叉型 C-T 结构。可以看出,在不同光栅入射角的情况下,传统型 C-T 结构的色散变化比较平稳,在  $-16 \sim 44^\circ$  入射角内,归一化色散在  $0 \sim 45\%$  之间,而交叉型 C-T 结构的色散在  $0 \sim 100\%$  之间。

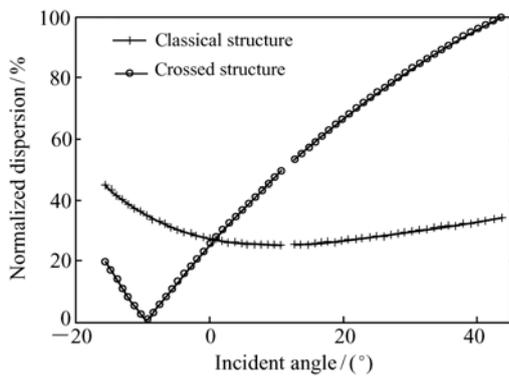


图2 两种 C-T 结构的归一化色散随光栅入射角变化

Fig.2 Variations of the normalized dispersion as incident angle of grating for two types of C-T structures

### 3 结构对比

#### 3.1 像散弥散高度计算

满足零阶和一阶消像散条件的 C-T 结构,可以保证在中心波长处消像散并在一定波长范围内的像散变化与光栅衍射角无关,但系统在其余波长下仍残留一定的像散。对于物距为有限距离的反射镜,其子午像面和弧矢像面如图 3 所示,图中  $R$  是反射镜曲率半径, $l$  是物距, $\theta$  是反射镜入射角, $l_t$  是子午像面距离, $l_s$  是弧矢像面距离, $D$  是反射镜上有效光束口径, $\Delta L_T$  是子午像面上的像散弥散高度。由于反射镜在离轴条件下使用,子午像面距离和弧矢像面距离不等。从图 3 的几何关

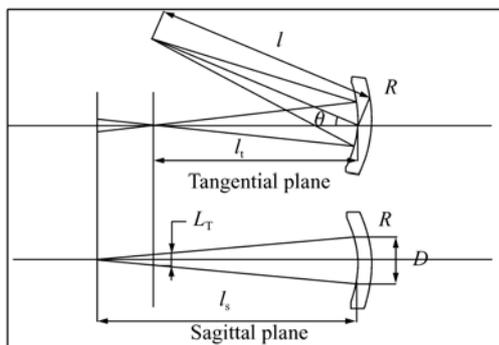


图3 离轴反射镜的子午距离和弧矢距离

Fig.3 Sagittal and tangential image distances of off-axis mirror

系可知,子午像面上的像散弥散高度  $\Delta L_T$  为:

$$\Delta L_T = \frac{l_s - l_t}{l_s} D \quad (11)$$

式中, $l_t$  和  $l_s$  可以利用细光束子午和弧矢公式获得,因此,选择了不同波长下的像散弥散高度作为结构比较的理论模型。

#### 3.2 消像散结构对比

为了说明满足消像散条件的交叉型 C-T 结构的优越性,以表 1 为初始结构条件,对按照消像散原理设计得到的参数(见表 2)进行了对比;同样以表 1 为参考,利用相关理论<sup>[12]</sup>,计算了满足消彗差条件的交叉型 C-T 结构的初始结构参数,设计结果如表 2 所示,经光学软件仿真的光学结构分别如图 4 和图 5 所示。

表 1 系统初始光学结构参数

Tab.1 Initial structural parameters of optical system

初始结构参数	参数值
波长范围/nm	780 ~ 1 014
中心波长/nm	898
光栅常数/(lp · mm <sup>-1</sup> )	1/450
准直物镜半径 $R_1$ /mm	100
聚光物镜半径 $R_2$ /mm	100
相对孔径	1:8

表 2 消像散以及消彗差结构参数

Tab.2 Structural parameters of astigmatism-free and coma-free crossed Czerny-Turner spectrometer

结构参数	消像散 C-T 结构	消彗差 C-T 结构
$L_{xz}$ /mm	43.50	50.00
$L_{zg}$ /mm	41.81	42.30
$L_{gj}$ /mm	39.62	42.30
$L_{jd}$ /mm	60.17	50.00
$i$ /(°)	-3.86	-3.86
$\theta_1$ /(°)	8	8
$\theta_2$ /(°)	8	8

对于两种不同的交叉型结构,将相关参数代入式(11),计算像散弥散高度,以间隔 10 nm 进行取点采样,得到像散弥散高度随波长的变化曲线,如图 6 所示,其中十字代表消彗差结构的像散

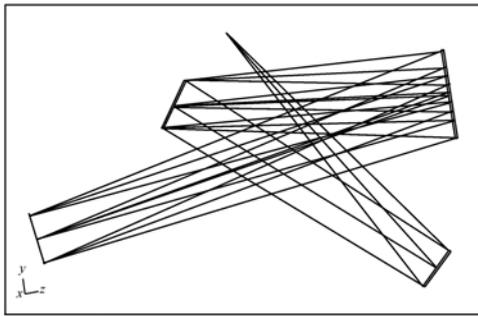


图4 交叉型消像散 C-T 结构

Fig. 4 Diagram of astigmatism-free crossed C-T structure

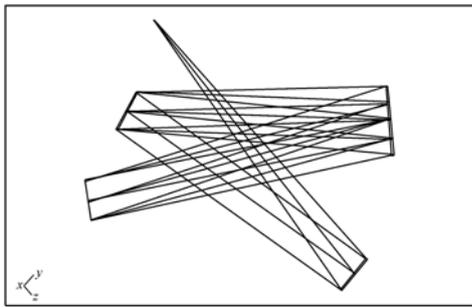


图5 交叉型消彗差 C-T 结构

Fig. 5 Diagram of coma-free crossed C-T structure

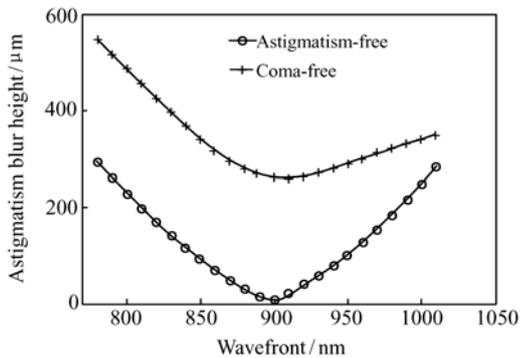


图6 两种结构的像散弥散高度与波长关系

Fig. 6 Astigmatism blur height as a function of wavelength for two structures

弥散高度曲线,圆圈代表消像散结构的像散弥散高度曲线。可以看到,在消像散 C-T 结构中,像散带来的影响并非在全波段上完全消除,在其它波长下的成像仍有剩余像散,在中心波长附近,消像散结构的像散弥散高度接近于零。随着波长偏离中心波长,像散弥散高度逐渐增加,形成一个“V”

型曲线,在消彗差 C-T 结构中,像面设定在子午像面和弧矢像面中间的某一位置,在全波段范围内,其像散弥散高度的值都很大,即使中心波长下也有着大于消像散结构的像散弥散高度值,证明了消像散 C-T 结构是较好的交叉型结构。

### 3.3 结构优化

利用 ZEMAX 软件,优化消彗差和消像散 C-T 结构后,对二者的点列图进行了比较。以 10 nm 为采样间隔,取优化之后两结构的均方根半径作为纵坐标,制作点列图结果如图 7 所示。通过图 6 和图 7 比较,在全波段内,对于像散弥散高度为 300  $\mu\text{m}$  的消像散结构,实际优化之后的均方根半径均在 40  $\mu\text{m}$  以下,最小的均方根半径为 8.39  $\mu\text{m}$ ,而消彗差结构在初始像散弥散高度 600  $\mu\text{m}$  数量级上,经实际优化之后的均方根半径在 60  $\mu\text{m}$ ,最小的均方根半径为 33.57  $\mu\text{m}$ ,两种结构优化之后,系统性能均得到了提高。但消像散结构在整体在优化之后的光学性能仍要优于消彗差结构,其均方根半径仅是消彗差 C-T 结构的 12% ~ 52%,在同等条件的交叉型结构中,消像散结构中光学性能提升空间更大,进一步优化的效果更好,在全波段内,可以获得更小的系统点斑。

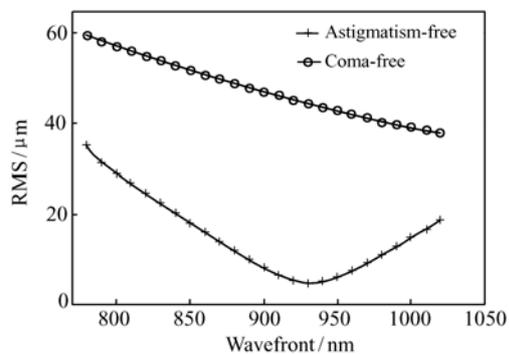


图7 结构优化后的两结构点列图

Fig. 7 RMSs of spot diagrams of two optical systems after optimization

## 4 结 论

本文推导了交叉型 C-T 结构的一阶消像散条件,指出了与传统型消像散 C-T 结构在线色散方面的差别。利用推导公式,以相对孔径 1:8、全波

段为 780 ~ 1 014 nm,光栅常数为 1/450 lp/mm 为初始光学参数,搭建了交叉型消像散 C-T 结构和交叉型消彗差 C-T 结构,对像散弥散高度的理论计算和经软件优化之后的对比结果显示,消像散交叉型 C-T 结构有更优越的光学性能,其均方根半径仅是消彗差 C-T 结构的 12% ~ 52%。结果

表明:交叉型消像散结构不仅在初始结构计算有着较好的光学性能,其优化之后的点列图有着更好的光学性能,这对设计大聚光能力的分光系统以及得到更高的光谱分辨率有着更好的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] SHAFER A B, MEGILL L R, DROPPLEMAN L. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, 54(7): 879-887.
- [2] SHAFER A B. Correcting for astigmatism in the Czerny-Turner spectrometer and spectrograph[J]. *Appl. Opt.*, 1967, 6(1): 159-160.
- [3] 薛庆生, 王淑荣, 李福田, 等. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 824-831.  
XUE Q SH, WANG SH R, LI F T, *et al.*. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 824-831. (in Chinese)
- [4] 余典, 李笑, 杨成龙, 等. 光电直读光谱仪标定方法的研究[J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(4): 88-91.  
YU D, LI X, YANG CH L, *et al.*. Study on the calibration method of direct-reading spectrometer[J]. *Opt. Optoelectronic Technol.*, 2011, 9(4): 88-91. (in Chinese)
- [5] HAGEN N, BRADY D J. Coded-aperture DUV spectrometer for standoff Raman spectroscopy[J]. *SPIE*, 2009, 7319: 73190D
- [6] XUE Q S, WANG S R, LI F T. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(1): 11-16.
- [7] LEE K S, THOMPSON K P, ROLLAND J P. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(22): 23378-23384.
- [8] ROSENDAHL G R. Contributions to the optics of mirror systems and gratings with oblique incidence. III. some applications [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, 52(4): 412-415.
- [9] MCDOWELL M. Design of Czerny-Turner spectrographs using divergent grating illumination[J]. *Opt. Acta.*, 1975, 2: 473-475.
- [10] AUSTIN D R, WITTING T, WALMSLEY I A. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(19): 3846-3853.
- [11] 陈万英, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 微型平像场近红外光谱仪的消杂散光设计[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(3): 263-267.  
CHEN W Y, TANG Y G, Bayanheshig, *et al.*. Suppression of stray light in micro flat-field near-infrared spectrometer[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(3): 263-267. (in Chinese)
- [12] 林中, 范世福. 光谱仪器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.  
LIN ZH, FAN SH F. *Spectroscopic Instrumentology*[M]. Beijing: Machine Industry Press, 1989. (in Chinese)

作者简介:安岩(1986—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事光谱仪系统设计等方面的研究。

E-mail: onesincere\_7@yahoo.com.cn

孙强(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,主要从事现代红外光学仪器、光谱仪器、红外系统仿真等方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn

刘英(1980—),女,山东滨州人,助理研究员,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: liuy613@163.com

李淳(1982—),男,山东烟台人,助理研究员,主要从事光学设计、图像处理等方面的研究。

E-mail: xlf-0830@163.com