

# 光学学报

## 共轴 PGP 型光谱仪的玻璃选择与优化

郭宝泽<sup>1,2,3,4\*</sup>, 石恩涛<sup>1,2,3</sup>, 王咏梅<sup>1,2,3</sup>, 张贤国<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; <sup>2</sup> 天基环境探测北京重点实验室, 北京 100190;

<sup>3</sup>中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190; <sup>4</sup> 中国科学院大学, 北京 100190

**摘要** 针对棱镜-光栅-棱镜(PGP)型成像光谱仪装调难度大的问题,通过校正 PGP 成像光谱仪色差的方法保证探测器像面与光轴垂直,并设计了一款宽波段复消色差的 PGP 系统。从宽波段复消色差理论出发,计算了三种玻璃材料组合理论色差的最小值,为光学设计的复消色差提供了理论支持。利用光学设计软件优化得到的初始结构,结果表明,PGP 系统的二级光谱得到了很好的校正,且探测器的 CCD 无需倾斜,更方便后期装调。覆盖谱宽为 400~1000 nm,视场为 9.2 mm,空间分辨率优于 10  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率优于 2.8 nm,光学传递函数大于 0.7,接近衍射极限,满足成像要求。

**关键词** 光学设计; 成像光谱仪; 消色差; 二级光谱

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0222003

### Glass Selection and Optimization of Coaxial PGP Spectrometer

Guo Baoze<sup>1,2,3,4\*</sup>, Shi Entao<sup>1,2,3</sup>, Wang Yongmei<sup>1,2,3</sup>, Zhang Xianguo<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>4</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** Aiming at the problem of difficult adjustment of prism-grating-prism (PGP) imaging spectrometer, the method of correcting the chromatic aberration of PGP imaging spectrometer is used to ensure that the detector image plane is perpendicular to the optical axis, and a wide-band achromatic PGP system is designed in this paper. Starting from the wide-band apochromatic theory, the minimum theoretical chromatic aberration of the three glass material combinations is calculated, which provides theoretical support for the apochromatic optical design. Using the optical design software to optimize the initial structure, the results show that the secondary spectrum of the PGP system has been well corrected, and the CCD of the detector does not need to be tilted, which is more convenient for later installation and adjustment. The coverage spectrum width is 400–1000 nm, the field of view is 9.2 mm, the spatial resolution is better than 10  $\mu\text{m}$ , the spectral resolution is better than 2.8 nm, and the optical transfer function is greater than 0.7, which is close to the diffraction limit, meeting imaging requirements.

**Key words** optical design; imaging spectrometer; achromatic; secondary spectrum

**OCIS codes** 220.0220; 220.1000; 220.2740

## 1 引言

成像光谱仪能同时探测二维空间信息和一维光

谱信息,其中,色散型光谱仪的应用最广泛。棱镜-光栅-棱镜(PGP)型光谱成像系统将棱镜和体全息光栅相结合,实现了系统的直线型设计,大幅提升了

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-07-22; 录用日期: 2020-08-28

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA1535010204)

\* E-mail: 1024785056@qq.com

光谱成像系统的光学性能和机械性能。Braam 等<sup>[1-2]</sup>发明了 PGP 型的分光组件,并在芬兰、美国、欧洲获得专利。但 PGP 型光谱成像系统大多依靠像面倾斜提高像质,不利于装调,为了使像面与光轴垂直,必须要消除系统的轴向色差。

光学系统消色差的研究一直是光学设计的热点,人们已经提出了多种用于选择最佳玻璃组合以校正色差的图形和数学方法<sup>[4-13]</sup>。其中,基于图形的方法依赖设计经验,玻璃组合的选择结果不够精确;基于数学的方法多使用两种玻璃材料,存在设计局限。针对上述问题,本文提出了一种新的消色差玻璃选择方法,首先,初步筛选玻璃材料,利用 Hoogland's 图<sup>[10]</sup>缩小样本集,以方便后期对结果进行处理。然后,计算筛选后每种玻璃组

合的理想最小色差值,并结合 PGP 系统的特点选择出合适的玻璃组合。最后,利用 ZEMAX 软件优化得到复消色差共轴 PGP 系统,使探测器的像面与光轴垂直。

## 2 PGP 系统消色差的玻璃材料

依据工程应用的需求,PGP 系统的光谱范围为 400~1000 nm,覆盖可见波段和近红外波段。一方面,在折射系统中,随着光谱范围的拓宽,系统的位置色差、二级光谱等因素都会影响光学系统的成像质量,导致探测过程中产生光谱串扰。另一方面,传统 PGP 系统中存在位置色差,主要靠倾斜探测器进行平衡,不利于后期装调,如图 1 所示。因此,有必要对 PGP 系统进行消色差设计。

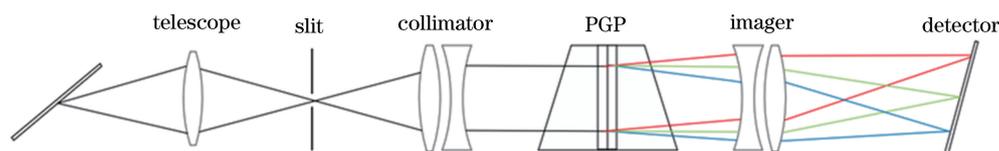


图 1 传统 PGP 光谱仪

Fig. 1 Structure of the traditional PGP spectrometer

### 2.1 复消色差玻璃材料的初步筛选

设系统的工作波段为  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ , 且  $\lambda_1 < \lambda_2$ 。实验主要讨论消除轴向色差(纵向色差),轴向色差是不同波长的光线在轴向上成像位置的差,可表示为<sup>[3]</sup>

$$\Delta l'_\lambda = M^2 \Delta l_\lambda - l' \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i(\lambda_0)}{v_i}, \quad (1)$$

式中,  $\lambda_0$  为光学系统的中心波长,  $M$  为系统的横向放大率,  $v_i$  为第  $i$  个材料的阿贝数,  $\varphi_i$  为薄透镜的光焦度,  $l'$  为光学系统的像距,  $l_\lambda$  为光学系统的物距,  $N$  为光学系统中的透镜个数,  $\Delta l'_\lambda$  为光学系统的近轴向色差。考虑到薄透镜系统应在给定的波长范围内校正横向像差,当物体处于无穷远处,消色差条件可表示为

$$\sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i}{v_i} P_i = 0, \quad (2)$$

式中,  $P_i$  为第  $i$  个材料的相对部分色散。由(2)式可知,要使系统色差接近零,在光焦度合理分配的情况下,使用的玻璃材料阿贝数相差要大,部分色散的相差要小。对 400~1000 nm 范围内的玻璃材料用 Hoogland's 图进行拟合分析, Hoogland's 图的纵坐标  $y = 1/v$ , 横坐标  $x = -(P - b)/v$ , 其中,  $b$  为阿贝图拟合直线的常数项。用 Hoogland's 图表示玻璃材料消色差的能力,可将通过原点落在同一直线上的玻璃材料组合认为能使色差为零或具有较强的消

色差能力,即相对部分色散  $P$  较小。令  $r_a, r_b$  分别为从坐标原点到玻璃材料  $a, b$  的径向距离,  $\varphi_a, \varphi_b$  为玻璃材料  $a, b$  的光焦度,则不同材料光焦度的比率与径向距离的比率成反比,即  $\varphi_a/\varphi_b = r_b/r_a$ 。可以发现,径向距离相差较大时光学材料的  $v$  相差较大,可在一个图中诠释消色差条件下  $\varphi, P, v$  之间的关系,从而找到所需的玻璃材料,得到的玻璃材料分布如图 2 所示。

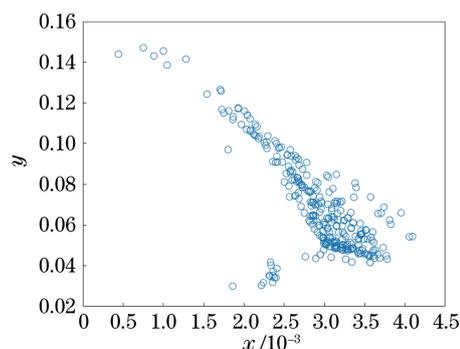


图 2 Hoogland's 图

Fig. 2 Hoogland's diagram

综上所述,对于光谱范围为 400~1000 nm 的设计需求,  $y$  轴的坐标值需小于 0.071, 图 2 中的点径向距离相差较大时,玻璃材料有较好的消色差能力。根据该方法,从肖特玻璃库 355 种玻璃材料中初步筛选出 180 种玻璃材料。

### 2.2 物镜整体消色差材料的确定

物镜结构采用双胶合和单镜片组合的结构,可根据初步筛选结果,进一步计算玻璃材料的消色差能力。考虑到 PGP 系统的特点以及透镜组和棱镜色差的互补,可找到理论上最合适的消色差玻璃材料组合。PGP 系统是双远心光路,要求 PGP 分光组件上光线沿光轴平行入射和出射,如图 3 所示。其中,P1、P2 为棱镜,G 为光栅。棱镜材料采用 H-K9L,根据几何关系和折射定律,得到 PGP 分光组件棱镜的倾角  $\alpha_1=13.77^\circ$ 、 $\alpha_2=13.87^\circ$ 。

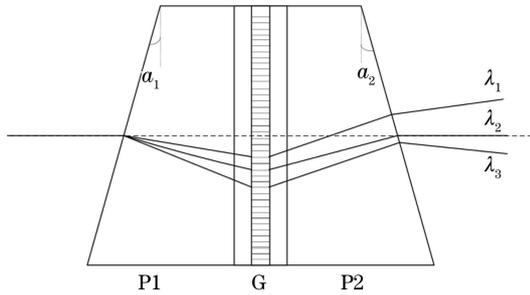


图 3 PGP 系统的色散原理

Fig. 3 Dispersion principle of the PGP system

PGP 系统中棱镜部分产生的轴向色差也会影响最终系统的消色差结果,如图 4 所示。因此,还需通过相关计算得出棱镜的轴向色差,以光轴上的光线为例,由折射定律可知, $n_0 \sin \beta_1 = n(\lambda) \sin \theta_\lambda$ ,通过计算得到  $\theta_{0.4 \text{ nm}} = 8.736^\circ$ ,  $\theta_{1 \text{ nm}} = 8.865^\circ$ 。其中, $n_0$  为空气的折射率, $\beta_1$  为入射角, $\theta_\lambda$  是波长为  $\lambda$  时材料的折射角,棱镜的中心厚度为 4 mm,计算得到材料的轴向色差为 0.017 mm。

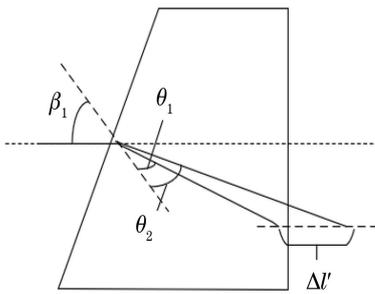


图 4 色散原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the dispersion

透镜组对于某个波段  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  而言,位置色差可以表示为最长波长  $\lambda_1$  和最短波长  $\lambda_2$  在光轴上焦点的差值。两个波长光线成像的像方截距为  $l'_{\lambda_1}$ 、 $l'_{\lambda_2}$ ,位置色差可表示为

$$\Delta l'_{\lambda_1 \lambda_2} = l'_{\lambda_1} - l'_{\lambda_2} \quad (3)$$

系统是物方远心结构,因此,(3)式可用焦距表示为

$$\Delta l'_{\lambda_1 \lambda_2} = f'_{\lambda_1} - f'_{\lambda_2} = \frac{1}{\varphi_{\lambda_1}} - \frac{1}{\varphi_{\lambda_2}} \quad (4)$$

式中, $f_{\lambda_1}$ 、 $f_{\lambda_2}$  为波长  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  的系统焦距, $\varphi_{\lambda_1}$ 、 $\varphi_{\lambda_2}$  为波长  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  的光焦度。对于单个透镜, $\varphi_{\lambda_n} = \varphi_{\lambda_{n+1}}$  时没有意义,但讨论透镜组的消色差问题是很有必要的。根据  $\varphi_{\lambda_n} = \varphi_{\lambda_{n+1}}$  选择合适的玻璃材料以消除轴向色差,由于材料的折射率随波长的变化而变化,在 365.01~1013.98 nm 的光谱范围内,利用色散公式得到不同波长的折射率为

$$n^2 - 1 = \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3} \quad (5)$$

式中, $K_1 \sim K_3$ 、 $L_1 \sim L_3$  为计算常数, $\lambda$  为波长。

在光学系统中,单个透镜的光焦度<sup>[7]</sup>可表示为

$$\varphi(\lambda) = \varphi(\lambda_0) + D(\lambda) \times \varphi(\lambda_0) \quad (6)$$

式中, $\lambda_0$  为中心波长, $D(\lambda)$  为对应波长  $\lambda$  的色散,且

$$D(\lambda) = [n(\lambda) - n_0] / (n_0 - 1) \quad (7)$$

若构成物镜的玻璃材料有三种,则三种材料的总光焦度可表示为

$$\Phi(\lambda) = [\varphi_1(\lambda_0) + \varphi_2(\lambda_0) + \varphi_3(\lambda_0)] + \varphi_1(\lambda_0) \times D_1(\lambda) + \varphi_2(\lambda_0) \times D_2(\lambda) + \varphi_3(\lambda_0) \times D_3(\lambda) \quad (8)$$

式中, $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$  分别为三种材料的光焦度。

当系统没有轴向色差时

$$\Phi(\lambda_j) - \Phi(\lambda_{j+1}) = 0 \quad (9)$$

式中, $j$  为第  $j$  个波长。可将(9)式表示为矩阵的形式

$$\Phi \cdot D^T = 0 \quad (10)$$

式中,

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$D =$$

$$\begin{bmatrix} D_1(\lambda_1) - D_1(\lambda_2) & \cdots & D_1(\lambda_j) - D_1(\lambda_{j+1}) \\ \vdots & & \vdots \\ D_3(\lambda_1) - D_3(\lambda_2) & \cdots & D_3(\lambda_j) - D_3(\lambda_{j+1}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

为了方便计算,将系统焦距归一化,可表示为

$$\varphi_1(\lambda) + \varphi_2(\lambda) + \varphi_3(\lambda) = 1 \quad (13)$$

引入一个矩阵  $X$ ,使

$$X \cdot \Phi = 1 \quad (14)$$

根据(12)式和(14)式,得到

$$\begin{bmatrix} X \\ D^T \end{bmatrix} \cdot \Phi = \bar{e} \quad (15)$$

式中, $\bar{e} = [1, 0, \dots, 0]^T$  为  $j \times 1$  的列向量。

令  $J = \begin{bmatrix} X \\ D \end{bmatrix}$ , 则  $\tilde{\Phi} = (J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T \cdot \bar{e}$ , 通过

不同玻璃的折射率, 得出消色差效果最佳时的光焦度分配, 将  $\tilde{\Phi}$  代入 (12) 式, 就能得到不同玻璃组合的最小色差, 即  $\Delta L = \tilde{\Phi} \cdot D$ 。

镜头结构采用单片、双胶合的方式, 玻璃材料选用三种, 在肖特玻璃库中筛选玻璃组合。通过穷举

的方式, 180 种玻璃材料组合方式共 191790 种。分别计算 191790 种结果的光焦度之和, 以  $G$  (系统透镜光焦度的绝对值和) 作为第一次筛选标准, 即  $G = \sum_{i=1}^k |\varphi_i(\lambda)|$ 。根据文献 [6, 12] 可知, 光焦度较大时, 不利于系统校准二级光谱, 因此选择  $G < 13$  的组合进行对比, 部分数据如表 1 所示。

表 1 三种玻璃材料的光焦度和焦点色位移

Table 1 Optical power and the minimum chromatic change of the three glass

Glass1	Glass2	Glass3	$G$	$\Delta L$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
N-KZFS11	BASF52	PSK52	12.197	$2.32 \times 10^{-4}$	-5.598	3.461	3.138
N-KZFS11	N-FK51	PSK52	8.746	$1.87 \times 10^{-4}$	0.139	4.734	-3.873
N-BAK4	BAFN6	FK51	10.425	$6.98 \times 10^{-4}$	-4.712	1.896	3.817
N-BAK4	N-FK51	SK5	7.458	$2.29 \times 10^{-4}$	0.491	3.738	-3.229
N-BAK2	FK51	LASFN30	10.173	$1.80 \times 10^{-4}$	-4.587	4.480	1.107
N-BAK1	LAF20	PK51A	10.717	$2.32 \times 10^{-4}$	-4.859	1.128	4.731
N-BAK1	P-LASF47	N-PK52	9.964	$1.02 \times 10^{-4}$	-4.482	0.911	4.571
K10	N-FK51	KZFSN4	11.526	$2.06 \times 10^{-4}$	-5.263	4.470	1.794
N-PK52A	P-LAK35	LLF2	8.322	$2.41 \times 10^{-5}$	3.329	-3.661	1.332
N-PK52A	N-PSK53	KZFSN4	12.720	$2.88 \times 10^{-5}$	6.052	-5.860	0.807
N-FK51	LLF6HT	SK5	7.018	$2.10 \times 10^{-4}$	3.783	0.226	-3.009
N-LAK33A	FK51	LAFN28	10.925	$2.34 \times 10^{-4}$	-4.962	3.008	2.955
BAF3	FK51	N-SK18	9.580	$1.12 \times 10^{-4}$	1.531	3.758	-4.290
BAF8	FK51	LAKN6	8.244	$6.65 \times 10^{-5}$	0.850	3.772	-3.622

设计中选择的光栅刻线数为 360 g/mm (每 1 mm 刻 360 条线), 光栅一级衍射光处中心参考波长的角距离为  $\theta$ , 所选探测器的光谱维长度  $S = \theta \times f$ , 其中,  $f$  为聚焦镜焦距。已知, 光谱维长度 (光谱色散的宽度) 为 6 mm, 可确定聚焦镜焦距近似为 26 mm。一个系统可容忍的焦点色位移  $\Delta f = \pm 2\lambda F^2$ , 其中  $F$  为系统的  $F$  数,  $\lambda$  为  $0.7 \mu\text{m}$ , 得到  $\Delta f = 0.0115 \text{ mm}$ 。

考虑到 PGP 系统棱镜的色散影响, 根据已知棱镜结构, 计算得到材料的轴向色差为 0.017 mm。由表 1 中的数据可知, 在消色差允许范围内, 有多组玻璃组合符合条件, 但 BAF8、FK51 和 LAKN6 玻璃组合的光焦度差值较大, 不利于光学系统的优化。因此, 最终选用光焦度分配均衡的 N-KZFS11、PSK52 和 BASF52 玻璃材料组合。

### 3 光学系统设计

#### 3.1 系统参数

实验主要针对 PGP 光谱系统进行设计, 系统的准直镜和聚焦镜关于孔径光阑对称, 系统放大率为 1。光栅采用体全息相位光栅, 刻线数为 360 g/mm, 光栅的基底材料为 b270, 探测器 CCD 的像元大小为  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ , 将  $2 \times 2$  个像元合并使用。PGP 光谱系统的主要参数指标如表 2 所示,

其中, RMS 为均方根值。

表 2 PGP 系统的主要参数

Table 2 Main parameters of the PGP system

Performance parameter	Value
Spectral range / nm	400-1000
Spectral resolution / nm	2.8
$F$ number	2.8
Slit / ( $\mu\text{m} \times \text{mm}$ )	$20 \times 9.2$
Spatial resolution / $\mu\text{m}$	RMS: spot radius less than 9.5

#### 3.2 设计结果

利用 ZEMAX<sup>[13]</sup> 软件分析上文得到的镜头数据和玻璃材料, 在双胶合和单片式结构上进行优化, 控制空气间隔、玻璃中心厚度、系统总长使结构更加紧凑。在保证像面光线和像面垂直的情况下, 增加对应的透镜原件, 调整系统的高级像差。在空间维  $X$  方向上, 消除轴向色差、二级光谱, 优化整体结构, 降低残余的高级球差、畸变等。得到的最终设计结果如图 5 所示, 共采用了 7 个透镜设计物镜结构, 其中, N-KZFS11、PSK52 为双胶合透镜。

设计的消色差聚焦镜光路总长为 54 mm, 焦距为 25.7 mm。图 6 为聚焦镜的调制传递函数 (MTF) 曲线, 将  $2 \times 2$  个像元合并使用, 得到系统的截止频率为 25 lp/mm, 可以看出, 在截至频率处, MTF 大于 0.7, 接近衍射极限, 满足成像要求。

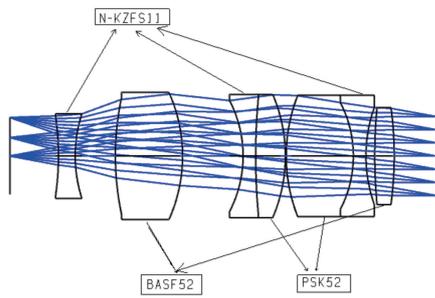


图 5 消色差聚焦镜光路图

Fig. 5 Optical layout of the achromatic focus lens

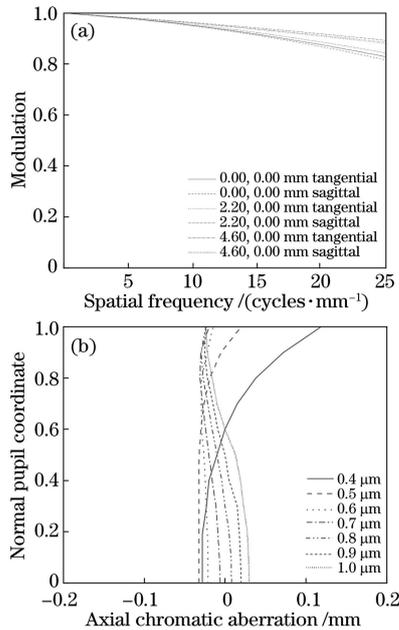


图 6 MTF 曲线和轴向色差。(a) MTF 曲线;(b)轴向色差  
Fig. 6 MTF curve and axial chromatic aberration. (a) MTF curve; (b) axial chromatic aberration

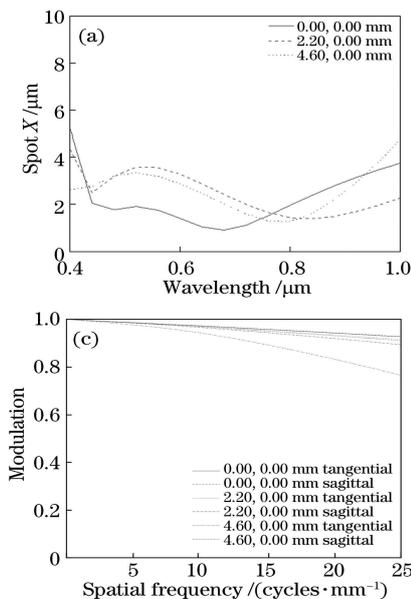


图 9 Spot X 曲线和不同波长的 MTF 曲线。(a) Spot X 曲线;(b) 0.4  $\mu m$ ;(c) 0.7  $\mu m$ ;(d) 1.0  $\mu m$

Fig. 9 Spot X curve and MTF curves of different wavelengths. (a) Spot X curve; (b) 0.4  $\mu m$ ; (c) 0.7  $\mu m$ ; (d) 1.0  $\mu m$

在保证像面垂直于光轴的情况下,系统总长为 102 mm,  $F$  数为 2.8, 设计的光路图如图 7 所示, 图 8 为光斑印迹图。可以看出, 在 400 nm 和 1000 nm 处光谱分辨率均优于 2.8 nm。图 9 为 PGP 整体系统的 Spot X 曲线图和三个特征波长下的 MTF 曲线图, 可以发现, 在系统特征频率处, 空间方向的 MTF 均大于 0.7, 接近衍射极限; 且空间方向的弥散斑半径小于 5  $\mu m$ , 符合技术指标要求。

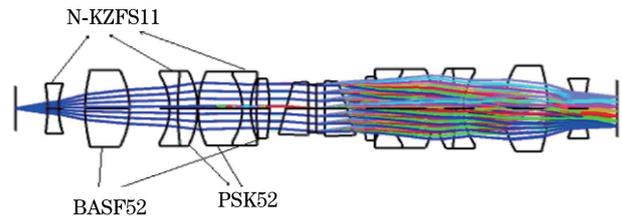


图 7 PGP 型成像光谱仪系统光路图

Fig. 7 Optical layout of PGP imaging spectrometer system

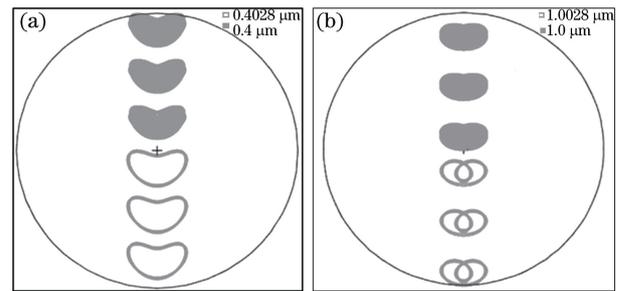
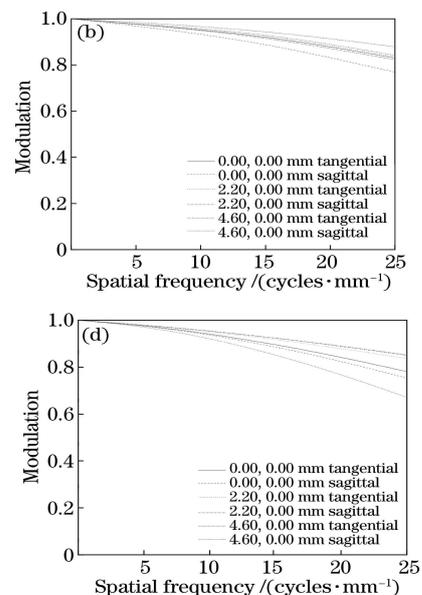


图 8 分辨率为 2.8 nm 时系统的光斑印迹图。

(a) 0.4  $\mu m$ ;(b) 1.0  $\mu m$

Fig. 8 System's light spot print at resolution of 2.8 nm.

(a) 0.4  $\mu m$ ;(b) 1.0  $\mu m$



## 4 结 论

设计了一种 PGP 型宽光谱消色差系统,并针对系统中存在的二级光谱、轴向色差进行了优化设计,提出了一种成像光谱仪复消色差方法。从宽波段消色差理论出发,采用 Hoogland's 图对所有玻璃材料进行初步筛选,降低初始样本集;再计算所有玻璃组合的理论最小色差值和 PGP 分光组件产生的轴向色差,得到最优的玻璃组合,为 PGP 复消色差系统的玻璃材料选择提供了理论指导。避免了材料选择的盲目性,使设计结果更加准确高效。仿真实验结果表明,PGP 光谱系统的分辨率优于 2.8 nm,MTF 大于 0.7,接近衍射极限;且成像清晰,满足光谱探测的要求,方便后期加工与装调;从设计过程来看,实验采用的玻璃选择方式更精准、数据分析量较小,为成像光谱仪的复消色差设计提供了新的思路。

## 参 考 文 献

- [1] Braam B M, Okkonen J T, Aikio M, et al. Design and first test results of the Finnish airborne imaging spectrometer for different applications (AISA) [J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1937: 142-151.
- [2] Aikio M. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph[D]. Oulu: University of Oulu, 2001.
- [3] Xue J L, Gong Y, Li D M. Optical design of the N. A.0.75 plan-apochromatic microscope objective[J]. Chinese Optics, 2015, 8(6): 957-963.  
薛金来, 巩岩, 李佃蒙. N.A.0.75 平场复消色差显微物镜光学设计[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 957-963.
- [4] Rayces J L, Rosete-Aguilar M. Selection of glasses for achromatic doublets with reduced secondary spectrum. I. tolerance conditions for secondary spectrum, spherochromatism, and fifth-order spherical aberration[J]. Applied Optics, 2001, 40(31): 5663-5676.
- [5] Sigler R D. Glass selection for airspaced apochromats using the Buchdahl dispersion equation[J]. Applied Optics, 1986, 25(23): 4311-4320.
- [6] Xu L, Ji Y, Shen W, et al. Optical design of wide waveband compact imaging spectrometer with fast speed [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8200: 82000C.
- [7] Albuquerque B F C D, Sasian J, Sousa F L D, et al. Method of glass selection for color correction in optical system design [J]. Optics Express, 2012, 20(13): 13592-13611.
- [8] Hu Y X, Zhou S X, Xiangli B, et al. Design of athermal optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1386-1391.  
胡玉禧, 周绍祥, 相里斌, 等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1386-1391.
- [9] Qu R, Deng J, Peng X L, et al. 0.4-1.7  $\mu\text{m}$  wide-band fast  $F$ -number optical system design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822007.  
曲锐, 邓键, 彭晓乐, 等. 0.4~1.7  $\mu\text{m}$  宽波段大相对孔径光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822007.
- [10] Rayces J L, Rosete-Aguilar M. Selection of glasses for achromatic doublets with reduced secondary color [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4093: 36-46.
- [11] Wang Y, Xu Y Y, Liu A Y, et al. Design and simulation of long-wavelength infrared microscopic imaging optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0622001.  
王宇, 许阳阳, 刘爱云, 等. 长波红外显微成像光学系统的设计与仿真[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0622001.
- [12] Wang J F, Cui Q F. Calibration method of tertiary spectrum for broadband optical systems [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1122002.  
王靖锋, 崔庆丰. 宽波段光学系统三级光谱的校正方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1122002.
- [13] Geary J M. Introduction to lens design: with practical ZEMAX examples[M]. Virginia: Willmann-Bell Inc., 2002: 15-18.