

# 臭氧激光雷达四通道光纤光谱仪设计

张建文<sup>1,2</sup>, 李博<sup>1\*</sup>, 林冠宇<sup>1</sup>, 顾国超<sup>1</sup>, 李寒霜<sup>1</sup>, 王晓旭<sup>1</sup>, 胡登辉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201200

**摘要** 为了实现差分吸收激光雷达对臭氧浓度和气溶胶的同时探测,对常见的三通道分光光谱仪进行改进优化。确定光谱仪初始结构后,使用光栅方程对四通道的摆放位置进行计算分析。使用球面镜和全息光栅,通过添加距离约束,将四个光谱通道控制在合理的机械结构范围内,最终设计了一款四通道分光、低 F 数的光谱仪系统。该系统使用圆阵列转线列光纤,提高了接收系统对大气回波信号的接收强度,实现了对 266, 289, 316, 532 nm 回波信号强度的精确探测。设计结果表明,光谱仪系统可连接 0.12 数值孔径的线列光纤,在 266, 289, 316 nm 光谱分辨率优于 0.5 nm,在 532 nm 处光谱分辨率优于 1 nm,满足激光雷达探测光谱分辨率的要求。分析了光谱仪出射狭缝的曲率半径和圆心位置。该设计可实现激光雷达对气溶胶和臭氧的同时探测,简化了系统结构。

**关键词** 激光雷达; 臭氧; 紫外; 光栅; 光谱仪和光谱仪器

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223138

## Optical Design of Ozone Lidar Four-Channel Fiber Spectrometer

Zhang Jianwen<sup>1,2</sup>, Li Bo<sup>1\*</sup>, Lin Guanyu<sup>1</sup>, Gu Guochao<sup>1</sup>, Li Hanshuang<sup>1</sup>, Wang Xiaoxu<sup>1</sup>,  
Hu Denghui<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, Jilin, China;

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

<sup>3</sup>Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201200, China

**Abstract** In this study, the common three-channel spectrometer was improved and optimized to realize the simultaneous detection of ozone and aerosol concentration using differential absorption lidar. First, the initial structure of the spectrometer is determined, followed by the calculation and analysis of the position of the four channels using the raster equation. Then, the four spectral channels are controlled within a reasonable mechanical structure range by adding distance constraints using a spherical mirror and a holographic grating. Finally, a four-channel and low F number spectrometer system is designed. The system uses circular array to linear fiber to improve the reception intensity of the receiving system for atmospheric echo signals and realizes accurate detection for 266, 289, 316, and 532 nm echo signal strength. The results show that the proposed spectrometer system can be connected to a linear fiber with a 0.12 NA. The obtained spectral resolution is better than 0.5 nm and 1 nm at 266, 289, 316 and 532 nm, respectively, thus, meeting the spectral resolution requirements of lidar detection. Moreover, the spectrometer's radius of curvature of the exit slit and the center position of the circle are analyzed. Our findings show that the proposed design can realize the simultaneous detection of aerosol and ozone by lidar and can also simplify the system structure.

**Key words** lidar; ozone; ultraviolet; grating; spectrometer and spectroscopic instrumentation

收稿日期: 2022-11-23; 修回日期: 2023-01-28; 录用日期: 2023-02-08; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(62005268)、黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28050102)

通信作者: \*libo0008429@163.com

## 1 引言

在大气中,作为痕量气体的臭氧总含量处于 $10^{-9}$ 数量级左右,适宜的臭氧浓度对地球的辐射收支平衡起到积极作用。然而,在我国城市化的推进过程中,在日常生活出行中及工业的发展运作下,产生了部分挥发性的有机物和氮氧化物,这些物质在太阳等环境和催化物质的作用下不断分解为臭氧,影响着对流层臭氧的平衡。激光雷达作为一种主动遥感探测系统,因灵敏度高、响应速率快、空间分辨率高,逐渐成为大气臭氧浓度垂直廓线探测的常见方式。2017年,美国国家航空航天局兰利研究中心 de Young 团队<sup>[1]</sup>改进了兰利移动式臭氧激光雷达,该雷达主要用于探测臭氧和气溶胶大气剖面,使用 286 nm 与 291 nm 激光测量臭氧以及使用 527 nm 激光测量气溶胶。整机采用两个独立的接收系统分别对气溶胶和臭氧进行探测,使用光谱分辨率为 1 nm 的光谱仪接收臭氧探测信号,使用窄带滤光片搭建的光路探测气溶胶通道,在提取气溶胶信号的同时,也可抑制大气背景噪声。俄罗斯科学院西伯利亚分院大气光学研究所 Kharchenko 团队<sup>[2]</sup>设计了臭氧垂直剖面激光雷达,利用激光雷达的激光发射模块内的光开关等元件实现 299/341 nm 和 308/353 nm 波长的交替变化。回波接收模块使用滤光片搭建,以此实现对气溶胶和臭氧垂直分布的交替探测。2018年,项衍团队<sup>[3]</sup>利用差分吸收激光雷达进行了杭州市臭氧浓度探测实验。该激光雷达的回波接收模块使用三通道光谱仪对回波信号进行分光,并模拟了大气臭氧时空分布和大气气象要素。2019年,王馨琦团队<sup>[4]</sup>研制了一款三通道光谱仪作为回波接收模块光学系统的差分吸收臭氧激光雷达,并使用该系统实现了对广州市臭氧垂直结构的观测。2022年,南京信息工程大学赵忆睿团队<sup>[5]</sup>开展了紫外多波长激光雷达的臭氧和气溶胶同步观测研究,该激光雷达使用 276 nm、287 nm 及 299 nm 三个波长作为臭氧激光雷达差分吸收的激光波长,回波接收模块使用三通道光栅光谱仪进行分光。该系统还包括一款 Mie 散射激光雷达,其激光发射模块的出射激光波长为 396 nm,主要用于探测气溶胶和大气分子因素对臭氧探测的影响,以此辅助三波长臭氧激光雷达完成对大气臭氧的探测。

国内外的激光雷达系统设计方案普遍为气溶胶与臭氧的独立探测,但臭氧探测与气溶胶探测之间又存在联系,即探测气溶胶也可以实时矫正臭氧探测的大气参数<sup>[6]</sup>。相比使用气溶胶和臭氧激光雷达进行单独探测的系统,或使用激光发射系统的光开关来实现交替探测的系统,使用臭氧和气溶胶的一体探测系统更具有优势,共用同一激光回波接收模块,可以消除由于光学系统不同而产生的探测误差。

为实现气溶胶和臭氧的一体探测,对回波接收模块的设计方案提出了一定的要求。如果直接使用滤光片

与分束镜,由于有 4 个光谱通道,会显著降低各部分的接收能量;而使用光开关进行差分吸收波长的切换,又会影响激光发射模块和处理系统的设计,提高了整体设计难度。故,应当考虑一种可同时实现四通道信号接收的光谱仪系统作为回波接收模块的光学系统部分。本文设计了一款四通道光谱仪,拥有 266, 289, 316, 532 nm 四个探测通道,简化了激光发射模块和回波接收模块的设计,实现了对臭氧与气溶胶的同时探测。

## 2 方法内容

### 2.1 基本原理

激光雷达包括激光发射模块、回波接收模块及数据处理模块。臭氧差分吸收激光雷达的原理为:激光发射模块向探测目标发射吸收带内波段的激光和吸收带外的激光,回波接收模块接收探测目标的回波信号,接收信号及各模块的参数转移至数据处理模块,使用差分吸收法对探测目标浓度进行计算分析。

现阶段激光雷达普遍采用三波长双差分的反演方法,即使用三个波长组成两组波长对。该方案可降低气溶胶对臭氧探测的影响,从而得到较为精确的臭氧浓度廓线。其后向散射项和消光项对臭氧浓度探测的影响之和为

$$N = \frac{d}{dz} \ln \frac{\beta_{\lambda_1}}{\beta_{\lambda_2}} - 2(\alpha_{\lambda_1} - \alpha_{\lambda_2}) + C \times \left[ 2(\alpha_{\lambda_2} - \alpha_{\lambda_3}) - \frac{d}{dz} \ln \frac{\beta_{\lambda_2}}{\beta_{\lambda_3}} \right], \quad (1)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  分别对应从强到弱的臭氧吸收波段; $C$  为引入的经验因子项,可以通过实验及模拟得出,以此削弱气溶胶的影响; $\beta$  和  $\alpha$  分别为气溶胶的后向散射系数和消光系数,取值与探测距离有关。四通道方案即在原有的三波长通道内加入 532 nm 的探测通道。532 nm 波长不在臭氧吸收带内,不受臭氧吸收的影响。结合三波长双差分的臭氧吸收波段,根据大气数据库内的探测曲线,拟合气溶胶及臭氧的吸收截面,实现对臭氧与气溶胶的同时探测。

激光雷达结构示意图如图 1 所示。差分吸收激光雷达选用 266, 289, 316, 532 nm 波长作为 4 个差分吸收波长以实现气溶胶和臭氧浓度的探测。该系统的激光发射模块使用 266 nm 激光,通过一个充氙气的拉曼管<sup>[7]</sup>产生 289 nm 与 316 nm 激光。532 nm 激光是 266 nm 激光通过非线性晶体引发倍频效应产生的。回波接收模块采用四通道光栅光谱仪,以实现 266, 289, 316, 532 nm 四个波长的回波激光信号接收。

该激光雷达的相关指标如表 1 所示。激光雷达的探测距离为 0.4~3 km。激光发射模块的出射波长分别为 266, 289, 316, 532 nm, 激光发散角 $\leq 0.2$  mrad。回波接收模块接收口径为 300 mm,接收系统类型为卡塞格林结构,接收视场角 $\leq 1.5$  mrad 且可调节。



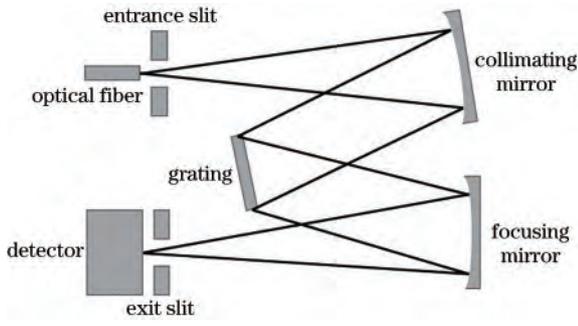


图 2 Czerny-Turner 光谱仪结构

Fig. 2 Czerny-Turner spectrometer structure

关系,如图 3 所示。由图 3 可得,532 nm 光的衍射角较大,衍射情况可分为两种情况:一种是小入射角时,入射光在 532 nm 衍射光与 266 nm 衍射光之间;一种是大入射角时,入射光在衍射光以外。当入射光在衍射光以外时,532 nm 衍射光与 266 nm 衍射光夹角大致为 37°,对聚焦镜的口径要求较高或需要安置多个聚焦镜,这无疑增加了光谱仪的成本。故采用小入射角设计,使用光谱仪的准直镜同时实现对 532 nm 波长光的准直和会聚。

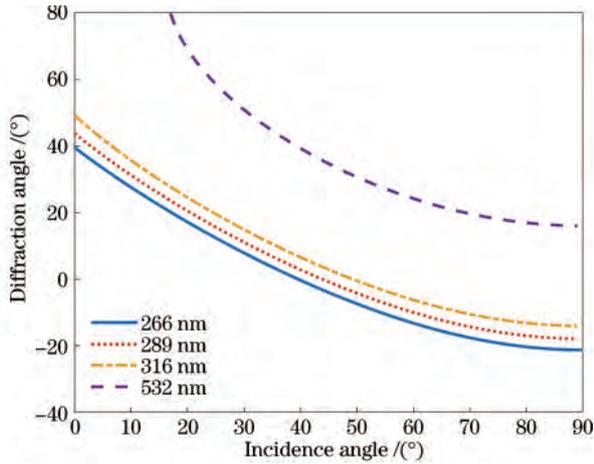


图 3 光栅衍射角与入射角的关系

Fig. 3 Relation between grating diffraction angle and incident angle

光谱仪最终结构如图 4 所示。其中 M1 为光谱仪准直聚焦镜,负责对 266, 289, 316, 532 nm 的入射光进行准直,以及将 532 nm 波长光聚焦于探测器。M2 为光谱仪聚焦镜,负责将 266, 289, 316 nm 波长光聚焦于探测器。G 表示光栅的长度,  $f_1, f_2, f_3$  分别是 M1 到焦点的距离、M2 到探测器的距离、M1 到探测器的距离,  $h_{12}, h_{11}, h_{23}, h_{13}$  分别为 M1 入射光到光栅边缘的最短距离、M1 到 M2 的最短距离、光栅边缘到 M2 出射光的最短距离、532 nm 入射光与出射光的最短距离。

为匹配接收系统大小,选用 50 mm × 50 mm 的平面光栅,根据光路可逆原则,可得

$$f \leq D/2N_A, \quad (4)$$

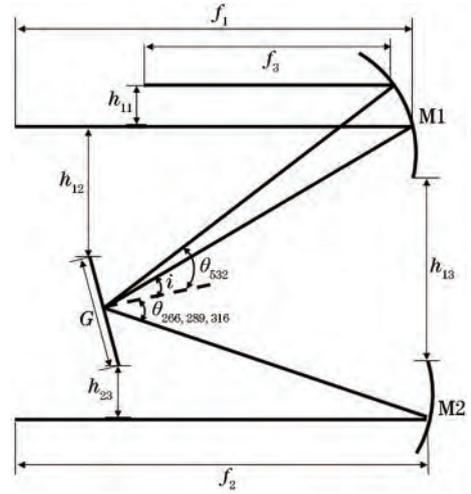


图 4 Czerny-Turner 光谱仪的最终结构

Fig. 4 Final structure of the Czerny-Turner spectrometer

式中:  $f$  为焦距;  $D$  为入射孔径;  $N_A$  为物方数值孔径。由光谱仪反射镜性质可得,其焦距应当不大于 208 mm。球面镜球差的波像差<sup>[11]</sup>为

$$W_s = \frac{D^4}{1024f^3} \leq \frac{\lambda}{4}, \quad (5)$$

式中:  $W_s$  为球差的波像差。为减小球差,应适当地降低光谱仪的焦距。为实现对光谱仪初始结构的确定,还应确定出射狭缝宽度和长度。光谱带宽<sup>[12]</sup>为

$$R_s = \frac{ds}{d\lambda} a', \quad (6)$$

式中:  $a'$  为出射狭缝宽度。线色散可以通过角色散计算得到<sup>[13]</sup>,可得光纤光谱仪的出射狭缝宽度为

$$a' = R_s \frac{d \cos \theta}{mf_2}. \quad (7)$$

由此得出射狭缝宽度在 266 nm 到 316 nm 约为 0.2 mm,即截止频率为 5 lp/mm;在 532 nm 约为 0.4 mm,即截止频率为 1.25 lp/mm。出射狭缝的长度与线光纤长度成一定的倍率关系,具体计算公式为

$$l' = R_{sh}(l_f - d_f), \quad (8)$$

式中:  $R_{sh}$  为系统缩小比;  $l_f$  为线光纤长度;  $d_f$  为光纤包层直径。对初始结构和参数进行进一步仿真设计。将计算出的初始结构导入光学设计软件内,添加每毫米 2400 刻线的长宽皆为 50 mm 的矩形全息光栅,添加物方数值孔径作为约束条件。在优化设计过程中,对光谱仪进行距离约束,分别约束图 4 中的 M1 入射光到光栅边缘的最短距离、M1 到 M2 的最短距离、光栅边缘到 M2 出射光的最短距离、532 nm 入射光与出射光的最短距离,使它们控制在合适的范围内,便于安置机械结构且光束无遮挡。最后反复调整权重和参数,以保证光谱仪光束无遮挡,留有足够的空间安置机械结构<sup>[14]</sup>。

优化完成后,对 532 nm 和 289 nm 波长通道的光路进行折转,提高设计的空间利用率,保证机械结构安置空间充足。最后对优化结构内的反射镜和光路折转

镜的孔径进行裁剪,得出一个合理的反射镜大小。最终优化结构如图 5 所示。

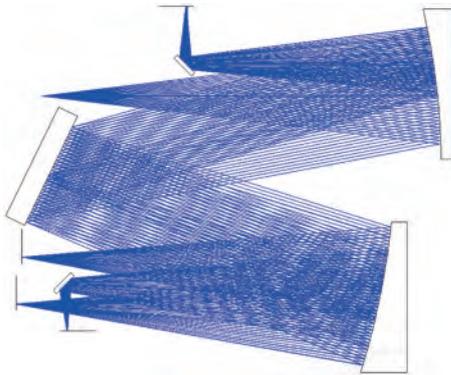


图 5 光谱仪光学设计结果  
Fig. 5 Optical design of the spectrometer

### 3 光学系统分析

#### 3.1 MTF 及光谱分辨率分析

根据光电探测器的接收区域大小可得,设计系统时应当尽可能考虑光谱维方向的调制传递函数(MTF)质量,以提高能量集中度。最终设计的衍射 MTF 如图 6 所示<sup>[15]</sup>。

OBJH 表示物方物高,对应物方连接的线阵光纤。0 mm 对应线阵光纤的线列中线。由图 6 可看出,光谱

仪在全视场下各个光谱通道的 MTF 在对应线对数内皆大于 0.6。为减小邻近波长对探测的影响,应对光谱分辨率进行计算分析。根据各个波长光束衍射角度以及准直聚焦镜和聚焦镜的设计焦距,通过线色散公式,

$$\frac{ds}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta} f_2, \quad (9)$$

可得,532 nm 处线色散为 0.46 mm/nm,综合狭缝宽度,可得对应波长光谱分辨率优于 1 nm;266 nm 到 316 nm 处线色散为 0.43 mm/nm,对应波长光谱分辨率优于 0.5 nm。考虑后向散射信号的杂散光分布,该分辨率可满足探测需求。

#### 3.2 出射狭缝及能量分布分析

光谱仪在使用线阵光纤后,像面会产生弯曲,为保证光谱仪的光学效率,应当对出射狭缝的弯曲程度进行拟合<sup>[16]</sup>。选取所有视场内像点的成像位置,利用最小二乘法进行圆拟合得到各波长的狭缝弯曲曲率半径,拟合结果如图 7 所示。

根据拟合结果,设 Y 方向为光谱维方向,X 方向为空间维方向,得到出射狭缝的曲率半径和圆心位置,确定出射狭缝的形状。以光纤入射口为基准坐标。532 nm 通道的狭缝曲率半径约为 132 mm,其圆心坐标为(0,41,221);316 nm 通道的狭缝曲率半径约为 227 mm,其圆心坐标为(0,81,-9);289 nm 通道的狭

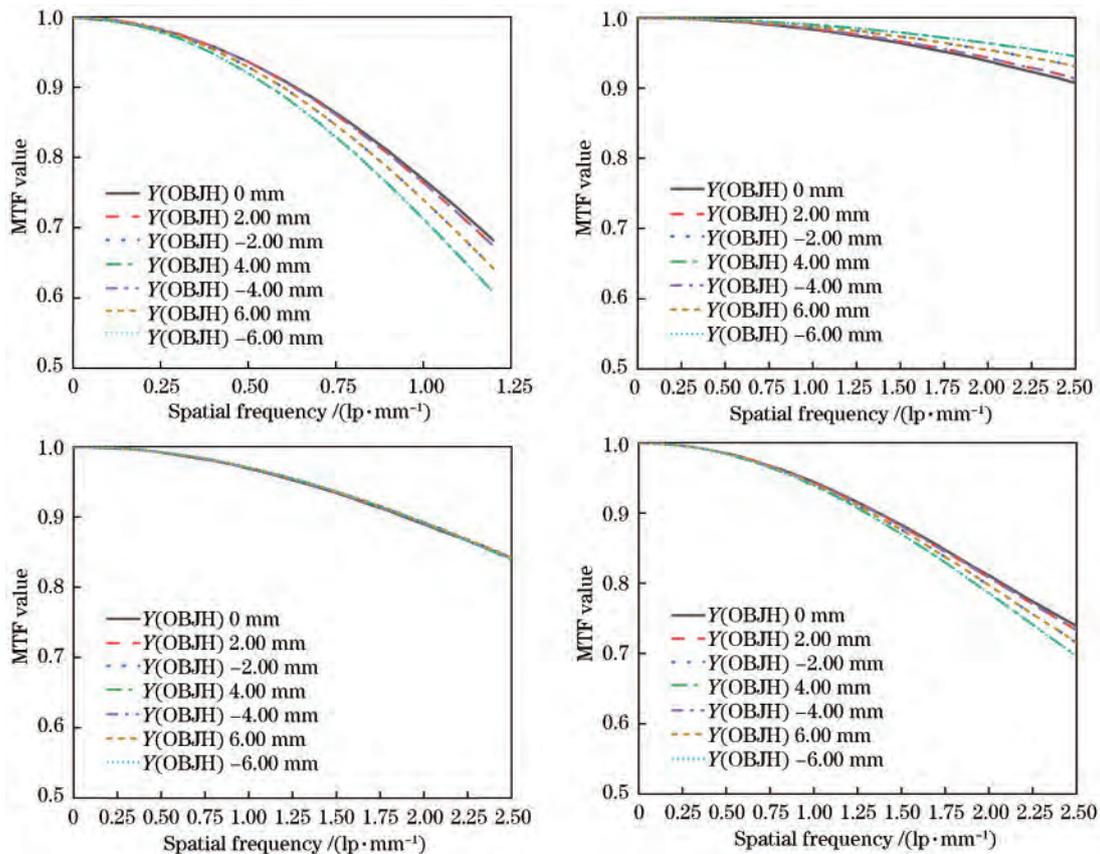


图 6 光谱仪各波长与视场 MTF 曲线。(a) 532 nm; (b) 316 nm; (c) 289 nm; (d) 266 nm

Fig. 6 MTF curves of spectrometer at different wavelengths and FOVs. (a) 532 nm; (b) 316 nm; (c) 289 nm; (d) 266 nm

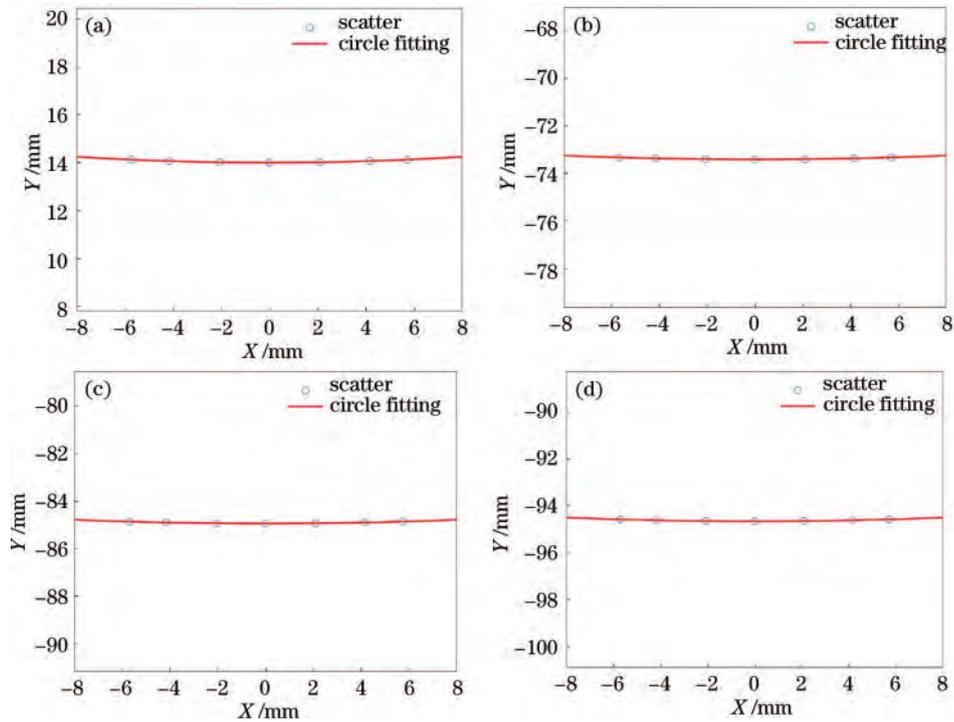


图 7 出射狭缝曲率拟合示意图。(a) 532 nm; (b) 316 nm; (c) 289 nm; (d) 266 nm

Fig. 7 Curvature fitting of exit slit. (a) 532 nm; (b) 316 nm; (c) 289 nm; (d) 266 nm

缝曲率半径约为 235 mm,其圆心坐标为(0, -107, -138);266 nm 通道的狭缝曲率半径约为 242 mm,其圆心坐标为(0, 52, -12)。根据圆心坐标和曲率半径,可为后续装调提供基准点。

对于非成像型光谱仪,光学系统成像的离散斑大小不需要严格小于衍射极限,但应当保证探测器接收

区域大于离散斑。该光谱仪采用的探测器的接收区域为 4 mm×13 mm 的矩形,其中 Y 方向为光谱维方向,接收区域为 4 mm, X 方向为空间维方向,接收区域为 13 mm。该系统的 532, 316, 289, 266 nm 四个波长通道的 Y 方向归一化能量密度分布如图 8 所示。

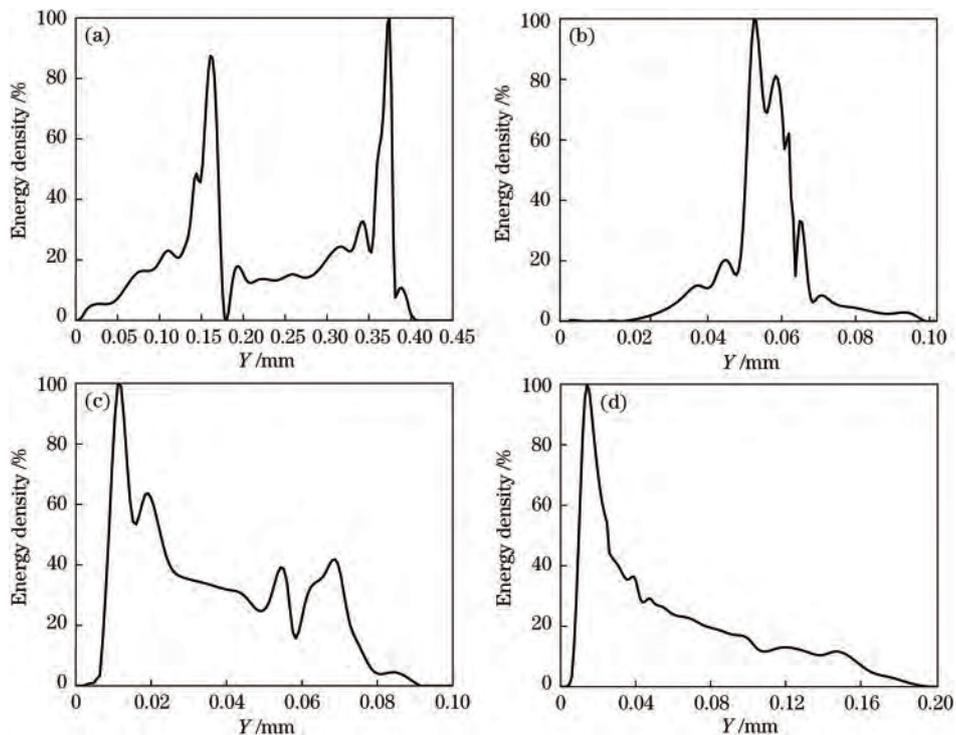


图 8 能量密度分布拟合图。(a) 532 nm; (b) 316 nm; (c) 289 nm; (d) 266 nm

Fig. 8 Fitting of the energy density distribution. (a) 532 nm; (b) 316 nm; (c) 289 nm; (d) 266 nm

由图 8 可以看出,成像区域的 Y 方向能量皆集中于 0.5 mm 以内,且由图 7 可知,考虑出射光束的弯曲情况,该光谱仪的像面大小仍小于该光谱仪使用的探测器的接收面积。另外,532,316,289,266 nm 四个波长通道的成像区域的 X 方向整体长度皆小于 13 mm。因此,该光谱仪可以满足 4 mm×13 mm 矩形接收面使用的要求。

## 4 结 论

利用光栅方程,得到在不同波长下的衍射角与入射角的关系,并在满足大气探测激光雷达分光需求的前提下,利用波像差理论和初始结构计算,设计了一款四通道紫外分光光谱仪,给出了多通道光谱仪的设计思路。该光谱仪可同时得到 266,289,316,532 nm 四个波段的光谱数据,各个波段光谱分辨率最高可达 0.5 nm。相比臭氧与气溶胶单独探测的系统,使用四通道探测实现了对气溶胶和臭氧的同时探测。分析了光谱仪出射狭缝弯曲程度,得到出射狭缝弯曲曲率与圆心位置,进一步提高了总体光学效率。该设计通过对光谱仪光路结构的改进,相比滤光片多通道设计和三通道光谱仪设计,在不增加其他元件的基础上,实现激光雷达光学系统探测的光谱分光需求。

## 参 考 文 献

- [1] de Young R, Carrion W, Ganoe R, et al. Langley mobile ozone lidar: ozone and aerosol atmospheric profiling for air quality research[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 721-730.
- [2] Dolgii S, Nevzorov A A, Nevzorov A V, et al. Measurements of ozone vertical profiles in the upper troposphere-stratosphere over western Siberia by DIAL, MLS, and IASI[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(2): 196.
- [3] 项衍, 刘建国, 张天舒, 等. 基于差分吸收激光雷达和数值模式探测杭州夏季臭氧分布[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1882-1887.  
Xiang Y, Liu J G, Zhang T S, et al. Differential absorption lidar combined with numerical model used for detecting distribution of ozone during summer in Hangzhou [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1882-1887.
- [4] 王馨琦, 张天舒, 裴成磊, 等. 差分吸收激光雷达监测广州市臭氧垂直分布特征[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1211003.  
Wang X Q, Zhang T S, Pei C L, et al. Monitoring of vertical distribution of ozone using differential absorption lidar in Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1211003.
- [5] 赵忆睿, 曹念文, 贾鹏程, 等. 紫外多波长激光雷达的臭氧和气溶胶同步观测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 1601001.  
Zhao Y R, Cao N W, Jia P C, et al. Simultaneous observation of ozone and aerosol via ultraviolet multi-wavelength lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(16): 1601001.
- [6] 孟鑫, 王丽, 王静静, 等. 全固态 266 nm 激光拉曼光谱仪研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1530002.  
Meng X, Wang L, Wang J J, et al. All solid-state 266 nm laser Raman spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1530002.
- [7] Gao W, Fan W H, Ju P, et al. Effective suppression of mode distortion induced by stimulated Raman scattering in high-power fiber amplifiers[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e20.
- [8] Qian X L, Fan W, Lu X H, et al. Smooth pulse recovery based on hybrid wavelet threshold denoising and first derivative adaptive smoothing filter[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e15.
- [9] Zhou Q, Zou Z Y. Astigmatism-free Czerny-Turner spectrometer with a low f-number by a bicylinder lens[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(27): 7985-7990.
- [10] Wang C, Chen H, Zhang Y C, et al. Optical design of a crossed Czerny-Turner spectrometer with a linear array photomultiplier tube[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(28): 7789-7794.
- [11] Xue Q S, Lu F Q, Duan M Z, et al. Optical design of double-grating and double wave band spectrometers using a common CCD[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(23): 6823-6830.
- [12] Wu F X, Hu J B, Liu X Y, et al. Dispersion management for a 100 PW level laser using a mismatched-grating compressor[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10: e38.
- [13] Liu D Y, Hennelly B M. Improved wavelength calibration by modeling the spectrometer[J]. *Applied Spectroscopy*, 2022, 76(11): 1283-1299.
- [14] Qian L Y, Wu D C, Zhou X J, et al. Optical system design for a hyperspectral imaging lidar using supercontinuum laser and its preliminary performance[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 17542-17553.
- [15] Chen L, Gao Z S, Ye J F, et al. Construction method through multiple off-axis parabolic surfaces expansion and mixing to design an easy-aligned freeform spectrometer [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25994-26013.
- [16] Wu S, Wang T, Huang C, et al. Advanced optical design of Czerny-Turner spectrometer with high flux and low aberration in broadband[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(11): 3077-3083.