

# 一种高线色散率测温激光雷达双光栅光谱仪

刘洋<sup>1,2\*\*</sup>, 张天舒<sup>1\*</sup>, 赵雪松<sup>1</sup>, 钟刘军<sup>1</sup>, 付毅宾<sup>1</sup>, 陈臻懿<sup>1</sup>, 董云生<sup>1</sup>, 范广强<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>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230036

**摘要** 与目前广泛应用的 532 nm 波段的发射波长相比, 采用 355 nm 波段发射波长进行大气温度观测对分光光谱仪的精度要求更高, 分光光谱仪的线色散率要达到 0.1 nm/mm。提出了一种新型高线色散率纯转动拉曼激光雷达分光光谱仪, 通过设计双光栅结构来达到激光雷达纯转动拉曼回波信号分光的目的。利用 Zemax 软件进行设计, 模拟分析结果显示: 间隔 0.1 nm 的两个相邻光谱在分光光谱仪聚焦透镜平面处两个相邻谱线中心可以分开 1 mm, 满足测温纯转动拉曼分光光谱仪线色散率达到 0.1 nm/mm 的要求。将实验得到的斯托克斯回波信号强度与理论计算结果进行对比, 验证了纯转动拉曼雷达中应用双光栅光谱仪的可行性。

**关键词** 光谱学; 测温激光雷达; 纯转动拉曼光谱; 双光栅光谱仪; 线色散率

中图分类号 TN959.6

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0911015

## A Temperature Measuring Lidar Double Gratings Spectrometer with High Linear Dispersion

Liu Yang<sup>1,2\*\*</sup>, Zhang Tianshu<sup>1\*</sup>, Zhao Xuesong<sup>1</sup>, Zhong Liujun<sup>1</sup>,  
Fu Yibin<sup>1</sup>, Chen Zhenyi<sup>1</sup>, Dong Yunsheng<sup>1</sup>, Fan Guangqiang<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230036, China

**Abstract** Compared with the widely used emission wavelength of 532 nm, the atmospheric temperature observation using the emission wavelength of 355 nm requires higher precision of the spectroscopic spectrometer, and the line dispersion rate of the spectroscopic spectrometer should reach 0.1 nm/mm. A new high linear dispersion pure rotational Raman laser lidar spectrophotometer is proposed, which uses the double grating structure to achieve the purpose of laser lidar pure rotational Raman echo signal separation. Zemax software is used to design, simulation results show that the interval of 0.1 nm in two adjacent spectrum spectral optical system focus lens focal plane in the center of two adjacent line can be separated from 1 mm, which satisfies the requirement of line dispersion rate of temperature measuring pure rotational Raman spectroscopic spectrometer to reach 0.1 nm/mm. Comparing the experimental Stokes echo signal strength with theoretical calculation, the feasibility of the double grating spectrometer in the pure rotational Raman lidar is verified.

**Key words** spectroscopy; temperature measuring lidar; pure rotational Raman spectroscopy; double gratings spectrometer; linear dispersion

**OCIS codes** 010.1290; 010.1310; 290.5870

## 1 引 言

温度是天气预报和气象研究的重要参数之一, 也是很多大气模式的重要参量, 所以准确测量大气温度具有重要意义。现有的纯转动拉曼技术已有几

年的发展历史<sup>[1-3]</sup>, 分光光谱仪主要采用金属蒸气滤波片配合窄带滤波片、双窄带带通滤波片、棱镜分光技术和 532 nm 波段双光栅分光光谱仪等技术来获取拉曼谱线, 虽然已出现了双光栅分光光谱仪<sup>[4-7]</sup>, 但它们都是获取 532 nm 波段纯转动拉曼信号的分

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-09; 录用日期: 2018-04-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0804900)、国家重点基础研究发展计划(2014CB447900)

\* E-mail: tszhang@aiofm.ac.cn(通信作者); \*\* E-mail: yangliu@aiofm.ac.cn

光光谱仪,色散率无法达到探测 355 nm 紫外波段纯转动拉曼信号的要求。大多数激光光源都是采用 355 nm 波段,这样可以解决后向散射信号强度弱的问题,同时还可以满足人眼安全的需求。

为了实现测温分光光谱仪高色散率的要求,本研究利用两个高刻线密度光栅进行分光,利用 Zemax 光学软件进行模拟,所得结果满足实际探测需求。将初步观测的回波信号数据与理论计算得到的纯转动拉曼谱线后向散射强度进行对比,结果显示具有良好的一致性,验证了所设计的纯转动拉曼测温激光雷达双光栅分光系统的线色散能力,实现了对大气温度的高精度测量,解决了目前双光栅光谱技术无法达到提取 355 nm 波段纯转动拉曼光谱的难题,对测温激光雷达技术的发展具有深远意义,也为天气预报、气象研究和大气模式等研究提供了一种更加精确的解析依据。

## 2 纯转动拉曼测温工作原理

纯转动拉曼测温激光雷达通过获取大气分子高低量子数的纯转动拉曼后向散射信号来实现温度廓线的反演,谱线后向散射强度表示为<sup>[8-9]</sup>

$$I(J, T) = I_0 \frac{A\gamma^2\nu_j^4 g_1(J) N_0 B_0 hc (2J+1) |H_{J'}^{J'}|^2}{(2I_i+1)^2 kT} \times \exp\left\{-\frac{B_0 hc J(J+1)}{kT} \left[1 - \frac{D_0}{B_0} J(J+1)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中: $I_0$  为激光发射强度; $A$  为常数; $\gamma^2$  为分子偏振强度的各项异性参量; $\nu_j$  为第  $J$  级谱线的波数; $g_1(J)$  为核自选统计权重; $N_0$  为基态分子数密度; $B_0$  为分子转动常数; $h$  为普朗克常量; $c$  为真空中光传播的速率; $k$  为玻尔兹曼常数; $D_0$  为离心畸变常数; $T$  为温度; $J$  为转动量子数; $I_i$  为核自旋量子数; $|H_{J'}^{J'}|^2$  为转动跃迁态矩阵元的平方。

斯托克斯谱线中的  $|H_{J'}^{J'}|^2$  可以表示为

$$(2J+1) |H_{J'}^{J'}|^2 = \frac{3(J+1)(J+2)}{2(2J+3)}, \quad J=1,2,3,\dots \quad (2)$$

氮气( $N_2$ )的统计权重因子  $g_{N_2}(J)$  可表示为

$$g_{N_2}(J) = 6 - 3 \left[ J - 2 \text{trunc} \left( \frac{J}{2} \right) \right], \quad (3)$$

式中: $\text{trunc}(\cdot)$  表示取整数<sup>[10]</sup>。氧气( $O_2$ )的统计权重因子  $g_{O_2}(J)$  则表示为

$$g_{O_2}(J) = J - \left[ J - 2 \text{trunc} \left( \frac{J}{2} \right) \right]. \quad (4)$$

斯托克斯谱线的谱线波数可表示为

$$\nu_j = \nu_0 - \left[ (4B_0 - 6D_0) \left( J + \frac{3}{2} \right) - 8D_0 \left( J + \frac{3}{2} \right)^3 \right], \quad J=1,2,3,\dots \quad (5)$$

式中: $\nu_0$  为激发光波数,为激发波长  $\lambda_0$  的倒数。

反斯托克斯谱线波数可表示为

$$\nu_j = \nu_0 + \left[ (4B_0 - 6D_0) \left( J - \frac{1}{2} \right) - 8D_0 \left( J - \frac{1}{2} \right)^3 \right], \quad J=1,2,3,\dots \quad (6)$$

应用 355 nm 光源激发的  $N_2$  纯转动拉曼谱线间隔 0.1 nm,计算得到  $N_2$  纯转动拉曼谱线后向散射强度,结果如图 1 所示。根据斯托克斯谱线后向散射强度的分布可以看出,波长不同,强度也随之变化,不同温度下拉曼后向散射强度的变化具有一致性。从图 1 中可以看出,在转动量子数为 6 时,  $N_2$  的后向散射强度最大,所以在测温激光雷达技术中一般提取转动量子数为 6 的谱线的回波信号。

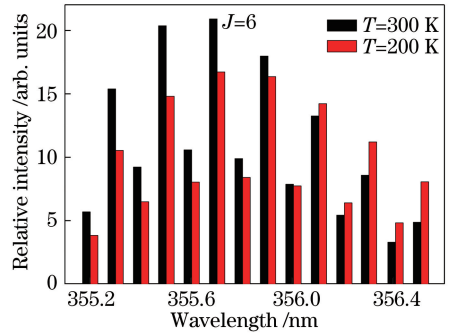


图 1  $N_2$  分子在 355 nm 波长激发温度分别为 200 K 和 300 K 时的纯转动拉曼后向散射谱线

Fig. 1 Pure rotational Raman backscattering lines of  $N_2$  at 355 nm when excitation temperature is 200 K or 300 K

## 3 双光栅分光系统结构设计和模拟仿真

### 3.1 双光栅分光系统的结构设计

系统采用双光栅分光设计,目的是实现对测温激光雷达回波信号的高精度分光。图 2 为测温转动拉曼双光栅分光光谱仪的结构图,该分光光谱仪主要由光栅 1、光栅 2、消球差透镜组、准直镜和聚焦镜等组成。双光栅长焦聚焦镜和消球差透镜能够提取纯转动拉曼的斯托克斯和反斯托克斯的高、低阶光谱谱线。测温激光雷达回波信号经过非球面消球差透镜组后进入准直镜 1,然后经过两个光栅进行分光之后,再通过长焦聚焦镜将纯转动拉曼光谱进行分离,目的是实现对测温纯转动拉曼回波信号的高精度提取,同时达到带外抑制和高光谱分辨的效果。

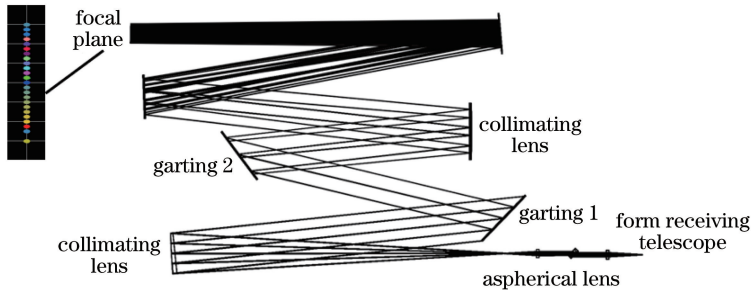


图 2 测温纯转动拉曼双光栅分光光谱仪的结构图

Fig. 2 Structure diagram of temperature measuring pure rotational Raman laser lidar double gratings spectrophotometer

### 3.2 双光栅分光系统的模拟仿真

为了获取纯度较高的纯转动拉曼回波信号,采用双光栅分光设计。由于系统采用 355 nm 波段,所以 N<sub>2</sub> 纯转动拉曼光谱的间隔为 0.1 nm。在单光栅无法达到色散要求的基础上采用双光栅设计方案,光栅刻线密度为 3600 line/mm。为了提高整个双光栅光谱仪的衍射效率,令光栅闪耀级次为 1 级<sup>[10]</sup>。分光系统输入端光纤芯径选取 0.4 mm,准直镜焦距与光纤数值孔径成反比,同时考虑到光栅的入射角,为了提高效率,要求光栅入射角要尽量接近布儒斯特角。图 3 示出了光纤像高与两个光栅入射角的关系,可以看出,在光纤像高为 0.4 mm 时,两个光栅入射角的最优值为 50°左右。

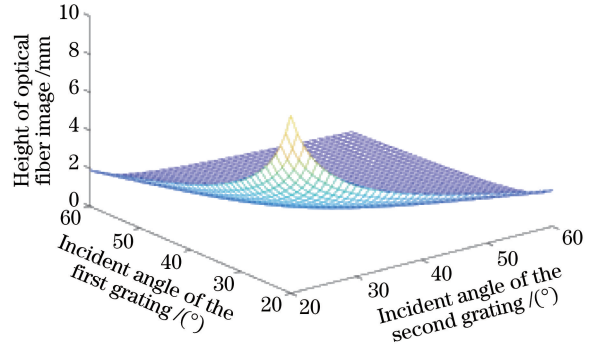


图 3 光纤像高与光栅入射角的关系

Fig. 3 Relationship between height of optical fiber image and incident angle of gratings

表 1 双光栅光谱仪的设计参数表

Table 1 Design parameter table of double gratings spectrometer

Parameter	Values
Spectral region /nm	353.8-356.5
Spectrum interval /nm	0.1
Gratings line density / (line·mm <sup>-1</sup> )	3600
Object height /mm	0.4
Imaging width /mm	≤0.8
Adjacent spectral line imaging interval /mm	1
Grating diffraction angle / (°)	50
Line dispersion / (nm·mm <sup>-1</sup> )	0.1

如表 1 所示,将最优化的结果代入 Zemax 软件中进行模拟分析,由于测温雷达的纯转动拉曼光谱谱线间隔为 0.1 nm,为了达到双光栅分光光谱仪 0.1 nm/mm 线色散率的要求,除了要控制中心光谱的成像偏差外,还要控制边缘处光谱的成像偏差。

在进入光栅光谱前加一个非球面透镜组,目的是实现对光谱球差的控制。通过 Zemax 软件模拟后可知,加入非球面透镜组之后,谱线中心处和边缘处的球差都得到了很好的校正,如图 4 所示。

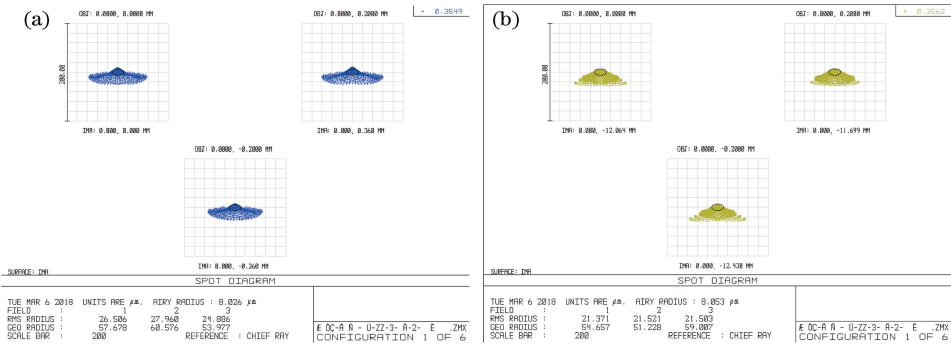


图 4 纯转动拉曼光谱中心处和边缘处的成像偏差。(a)谱线中心处;(b)谱线边缘处

Fig. 4 Imaging deviations in center and edge of pure rotational Raman spectral lines.

(a) Center of spectral line; (b) edge of spectral line

对优化后的点列图进行分析,模拟结果如图 5 所示。图 5(a)~(c)依次为任意取单个测温纯转动拉曼谱线、相邻 3 条拉曼谱线和 24 条拉曼谱线对应线色散率指标下的点列图。从图中 5(a)中可以看出,单个测温拉曼光谱的光谱宽度为 0.7715 mm。从图 5(b)中可以看出,3 条连续测温拉曼光谱间隔

为 1 mm,在连续光谱间隔为 0.1 nm 的情况下完成了 0.1 nm/mm 线色散率的双光栅分光光谱仪设计。由图 5(c)所示的 24 条斯托克斯谱线和反斯托克斯谱线点列图可以看出,高线色散率分光光谱仪达到了将其分开的目的,提高了测温激光雷达的测量精度。

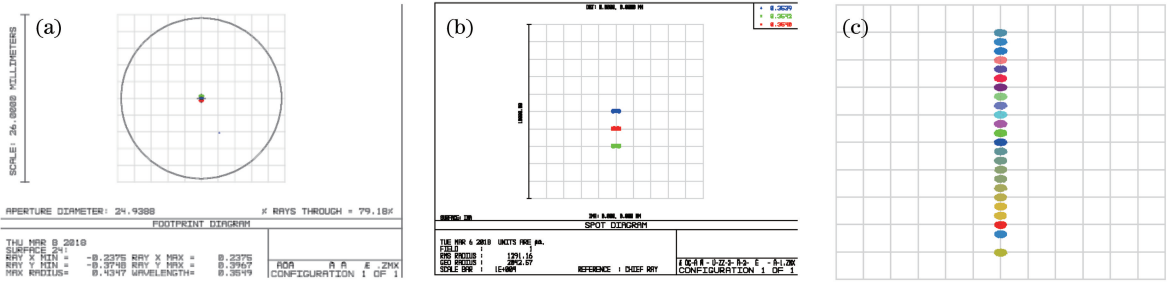


图 5 不同谱线处的点列图。(a)单个测温纯转动拉曼谱线;(b)相邻 3 条测温纯转动拉曼谱线;(c) 24 条测温纯转动拉曼谱线  
 Fig. 5 Spot diagrams at different spectral lines. (a) Single temperature measuring pure rotational Raman line; (b) 3 adjacent temperature pure rotational Raman spectral lines; (c) 24 pure rotational Raman spectral lines

### 4 实验验证

如图 6 所示,本课题组自行研制的测温双光栅光谱仪放置在合肥市蜀山区科学岛中国科学院安徽光学精密机械研究所综合楼内,利用其进行连续观测验证实验。

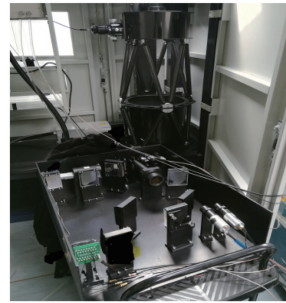


图 6 测温雷达双光栅分光光谱仪  
 Fig. 6 Temperature measuring lidar of double gratings spectrophotometer  
 中双光栅分光系统的可行性。

测温激光雷达系统探测得到的斯托克斯通道原始信号如图 7(a)所示。对原始信号进行匹配处理后,与  $N_2$  和  $O_2$  纯转动拉曼后向散射强度进行对比,结果如图 7(b)所示。结果显示,实际测量信号的变化趋势与理论计算结果具有良好的一致性,验证了上述 Zemax 分析结果的正确性和纯转动拉曼雷达

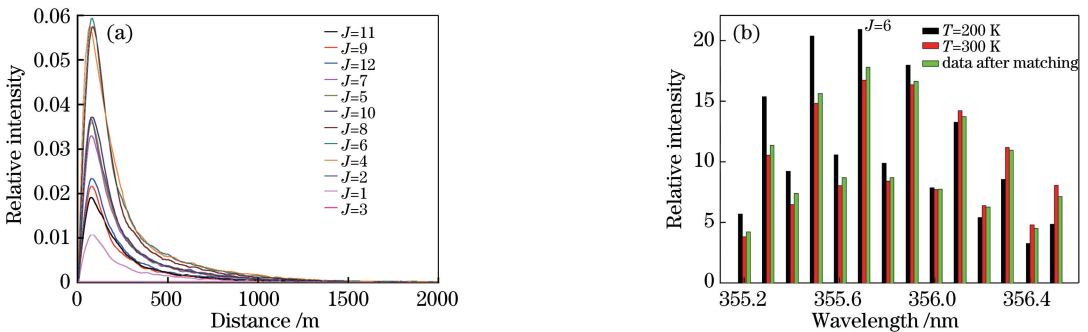


图 7 测温雷达实测数据与理论计算  $N_2$  后向散射强度的对比结果。  
 (a)测温纯转动拉曼回波信号;(b)实测数据与  $N_2$  理论计算的对比

Fig. 7 Comparison of measured data and backscattering intensity of  $N_2$  for temperature measuring lidar.  
 (a) Temperature measuring pure rotational Raman echo signal; (b) comparison between measured data and theoretical calculation of  $N_2$

## 5 结 论

本研究通过计算测温纯转动拉曼信号强度得到了不同温度下  $N_2$  和  $O_2$  的后向散射强度,并在 355 nm 光源纯转动拉曼光谱线色散率要求 0.1 nm/mm 的基础上,设计了测温激光雷达高色散能力双光栅分光光谱仪。利用 Zemax 软件进行设计和模拟分析,结果显示:两条相邻纯转动拉曼光谱间隔 0.1 nm 的谱线,经过双光栅分光光谱仪后在焦平面上成像的谱线宽度为 0.8 mm,两条相邻谱线的中心间隔为 1 mm,满足测温纯转动拉曼分光光谱仪线色散率为 0.1 nm/mm 的要求。

对测温激光雷达进行连续观测实验,提取斯托克斯谱线中后向散射的原始信号,与理论计算值进行对比后可知,各谱线的强度具有良好的一致性。实验数据验证了上述 Zemax 分析结果的正确性以及纯转动拉曼雷达中双光栅光谱仪的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] Arshinov Y F, Bobrovnikov S M, Zuev V E, *et al.* Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(19): 2984-2990.
- [2] Nedeljkovic D, Hauchecorne A, Chanin M L. Rotational Raman lidar to measure the atmospheric temperature from the ground to 30 km [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 90-101.
- [3] Ansmann A, Arshinov Y, Bobrovnikov S M, *et al.* Double-grating monochromator for a pure rotational Raman lidar[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3583: 491-497.
- [4] Norton E G, Povey I M, South A M, *et al.* Broadband CCD detection system for rotational Raman lidar studies of the troposphere [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4153: 657-663.
- [5] Wang H W, Hua D X, Wang Y F, *et al.* Design and analysis of new spectroscopic system of Raman lidar for detection of atmospheric water vapor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12): 120701.  
王红伟, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 水汽探测拉曼激光雷达的新型光谱分光系统设计与分析 [J]. *物理学报*, 2013, 62(12): 120701.
- [6] Liu Y L, Zhang Y C, Su J, *et al.* Rotational Raman lidar for atmospheric temperature profiles measurements in the lower-air [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(10): 43-48.  
刘玉丽, 张寅超, 苏嘉, 等. 探测低空大气温度分布的转动拉曼激光雷达 [J]. *光电工程*, 2006, 33(10): 43-48.
- [7] Imaki M, Kawai H, Kato T, *et al.* Efficient ultraviolet rotational Raman lidar for temperature profiling of the planetary boundary layer [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51: 052401.
- [8] Ristori P, Froidevaux M, Dineev T, *et al.* Development of a temperature and water vapor Raman lidar for turbulent observations [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5984: 59840F.
- [9] Kim D, Park S, Cha H, *et al.* New multi-quantum number rotational Raman lidar for obtaining temperature and aerosol extinction and backscattering scattering coefficients [J]. *Applied Physics B*, 2006, 82(1): 1-4.
- [10] Hao A H, He F T, Li L B, *et al.* Design of wide-field and flat-spectrum holographic concave grating spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0230003.  
郝爱花, 贺锋涛, 李立波, 等. 宽场平谱面全息凹面光栅光谱仪的设计 [J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0230003.