

文章编号 1004-924X(2018)08-1904-06

## 高精度测温拉曼激光雷达光谱仪的光学设计

刘 洋<sup>1,2\*</sup>, 张天舒<sup>1</sup>, 赵雪松<sup>1</sup>, 项 衍<sup>1,2</sup>, 邓 潘<sup>1,2,3</sup>, 吕立慧<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230036;

3. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要:**为了抑制边缘纯转动拉曼光谱成像偏差,提出了一种高精度测温拉曼激光雷达光谱仪光学系统设计。该系统利用非球面透镜组对光谱仪成像球差进行校正,针对光谱仪 10 mm/nm 的线分辨率要求,采用双光栅结构设计并对测温拉曼光谱仪各参数进行光线追迹,拟合得到双光栅的入射角、准直镜焦距和聚焦镜焦距的最优值。将拟合最优化结果代入 Zemax 软件进行优化分析,结果显示单个成像光谱成像宽度控制在 0.771 5 mm,间隔 0.1 nm 的纯转动连续光谱成像中心间隔可以达到 1 mm,满足了线阵探测器对成像质量的要求。通过计算在 J=6 级的纯转动拉曼后向散射信号对瑞利-米散射信号实现了  $10^8$  抑制,达到了高精度纯转动拉曼激光雷达测温的目的,解决了目前双光栅光谱技术无法达到提取 355 nm 波段纯转动拉曼高光谱精度的要求,对测温拉曼激光雷达的技术发展有着深远的意义。

**关键词:**拉曼激光雷达;双光栅光谱仪;闪耀光栅;线分辨率

中图分类号: TN959.6 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182608.1904

## Optical design and analysis of laser radar spectrometer with high accuracy

LIU Yang<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Tian-shu<sup>1</sup>, ZHAO Xue-song<sup>1</sup>,  
XIANG Yan<sup>1,2</sup>, DENG Pan<sup>1,2,3</sup>, LÜ Li-hui<sup>1,2</sup>

(1. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*

2. *University of Science and Technology of China, Hefei 230036, China;*

3. *State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology,*

*Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: yangliu@aiofm.ac.cn*

**Abstract:** This paper presents the optical system design for a high precision, temperature measuring, Raman lidar spectrometer. Using an aspheric lens group on an imaging spectrometer with spherical aberration correction, the results show that the pure rotational Raman spectrum imaging deviation can be effectively suppressed. The 10 mm/nm line resolution requirements for a high precision spectrometer, with a double grating structure design, and the temperature parameters of a Raman spectrometer for ray tracing, are fitted with a double grating incidence angle, and optimal values for the collimating and focusing lens focal lengths. The optimization results were substituted into the Zemax software for

收稿日期:2018-04-04;修订日期:2018-04-25.

基金项目:国家重点研究计划资助项目(No. 2017YFC0209603);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB447900)

simulation analysis, and showed that a single spectral imaging width control in 0.771 5 nm, with 0.1 nm intervals of pure rotational continuous spectrum imaging center spacing, can reach 1 mm. By calculating the purely rotating Raman backscattering signal at  $J=6$ , the Rayleigh-Mie scattering signal was suppressed by  $10^8$ , satisfying the requirements of the linear array detector for image quality, and achieving the high precision of the pure rotational Raman lidar. This has solved the issue in which the double grating spectrum technique could not reach to extract the 355 nm band, which is the accuracy requirement of the high, pure, rotational, Raman spectrum. This indicates that the temperature measurement ability of the Raman lidar technology development is of far-reaching significance, and provides a more accurate basis for the analysis of urban heat island effect, and environmental pollution sources.

**Key words:** Raman lidar; double-grating spectrometer; blazed grating; Line per inch

## 1 引 言

温度对天气预报、气象研究和环境污染源解析的重要参数之一,是引起城市热岛效应的主要原因<sup>[1]</sup>。目前,拉曼技术已经在国内外取得一定的研究成果,作为拉曼激光雷达的核心部分之一,分光光谱仪一般采用金属蒸汽滤波片配合窄带滤光片、双窄带带通滤光片、棱镜分光技术和 532 nm 波段双光栅光谱仪来获取拉曼信号<sup>[2-4]</sup>。虽然近几年国内外均出现了双光栅光谱技术,但是获取的都是 532 nm 波段的纯转动拉曼信号<sup>[3-8]</sup>,线分辨率无法达到探测 355 nm 紫外波段纯转动拉曼信号的要求。

为了实现高光谱分辨率色散能力,本文提出利用两个高刻线密度光栅进行分光,通过分析像高、相邻光谱间隔及两者差值跟光栅入射角的关系找到最优化光栅的匹配条件,由准直镜焦距和聚焦镜焦距与光栅入射角和光纤像高关系得到准直镜焦距和聚焦镜的理论值,将最优化匹配参数代入 Zemax 光学软件进行模拟,所得到的结果满足实际探测需求。本研究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精度要求,对测温激光雷达技术的发展有着深远的意义,也对分析城市热岛效应和环境污染源解析提供一种更加精确的解析工具。

## 2 高精度光谱仪基本原理

纯转动拉曼测温激光雷达通过对大气中氮气和氧气分子高低量子数纯转动拉曼信号来反演,相邻纯转动拉曼相邻谱线波数是等间距的<sup>[9-10]</sup>,

其间距为:

$$V_{\nu_{v_j}} = 4B(J+2/3), J = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

式中  $B$  为分子转动常量。

光栅方程为:

$$\sin \alpha + \sin \beta = m\lambda/d, \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  分别代表光栅的入射角和衍射角;  $m$  为衍射级数;  $\lambda$  为波长;  $d$  为光栅刻线密度数。对于闪耀光栅其闪耀波长  $\lambda_i$  和闪耀角  $\alpha_i$  的关系为:

$$\sin \alpha_i = \frac{m\lambda_i}{2d}. \quad (3)$$

代入光栅方程可以得到双光栅光谱仪中的闪耀波长与闪耀角和光波波长与衍射角的关系如下:

$$\lambda_i = 2\lambda - 2d \sin \beta / m. \quad (4)$$

对上述光栅方程求导,得到线色散率为:

$$D_l = \frac{d_l}{d_\lambda} = \frac{mf}{d \cos \beta}, \quad (5)$$

式中:  $d_l$  代表相邻波长在成像面的分开能力,  $f$  为双谱仪聚焦镜的焦距。通过式(5)可以看出线色散能力跟聚焦镜焦距成正比,跟光栅刻线密度成反比。

如果相邻的两根谱线间隔为  $V_x$ , 对应两根谱线的波长差为  $V_\lambda$ , 则此时的线色散率表示为:

$$D_l = \frac{V_x}{V_\lambda}. \quad (6)$$

## 3 双光栅光谱仪参数确立

通过计算 354.7 nm 中心波长的氮气纯转动拉曼光谱间隔,得到光谱间隔为 0.1 nm, 远远低于 532 nm 中心波长的氮气纯转动拉曼光谱间隔 0.23 nm, 纯转动拉曼散射信号应用线阵光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)进行接收(像素面源宽度为 0.8 mm, 相邻两个像素的中心间

隔为 1 mm)。如何将 0.1 nm 的纯转动拉曼连续光谱成像在 1 mm 中心间隔的像素阵列 PMT 上,并且要进行边缘像素球差校正和单根谱线成像宽度控制在 0.8 mm 范围之内,这样高线分辨率的光谱仪在国内外都很难达到。

对接收光学系统进行空间滤波设计得到光纤芯径为 0.4 mm,为了达到光谱仪的最大衍射效率,选择光栅的衍射级次为 1。通过计算得到

354.7 nm 光源纯转动拉曼光谱间隔为 0.1 nm。要达到线色散率大于 10 mm/nm,在市场上很难找到对应紫外波段的高线密度光栅,所以采用双光栅设计,光栅线密度选择 3 600 l/mm。将上述参数代入上述公式中进行光线追迹,结果如图 1 所示。为了使光栅的衍射效率最大,光谱仪设置两个光栅入射角相等,通过图 1 可以看出光栅入射角接近 50°时为最优值。

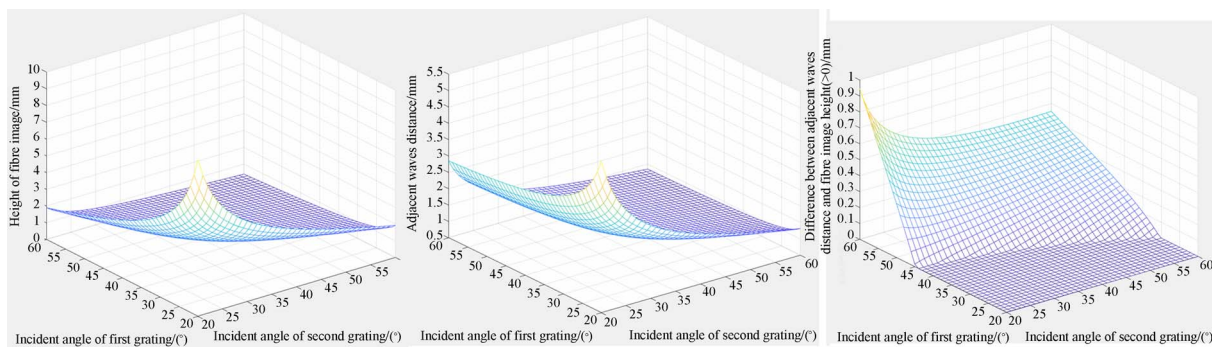


图 1 光纤像高、相邻光谱中心间隔及两者差值与两个光栅入射角的关系

Fig. 1 Relations of height of optical fiber image, interval of adjacent spectral center and their difference with two grating incident angle respectively

通过光线追迹可以得到光纤像高、准直镜焦距、聚焦镜焦距和光栅入射角之间的关系,如图 2 所示。通过图 2(a)可以看出准直镜焦距的最优

值在 425 mm,通过图 2(b)中聚焦镜焦距、准直镜焦距和光栅入射角的关系可以得到聚焦镜的焦距在 1 385 mm。

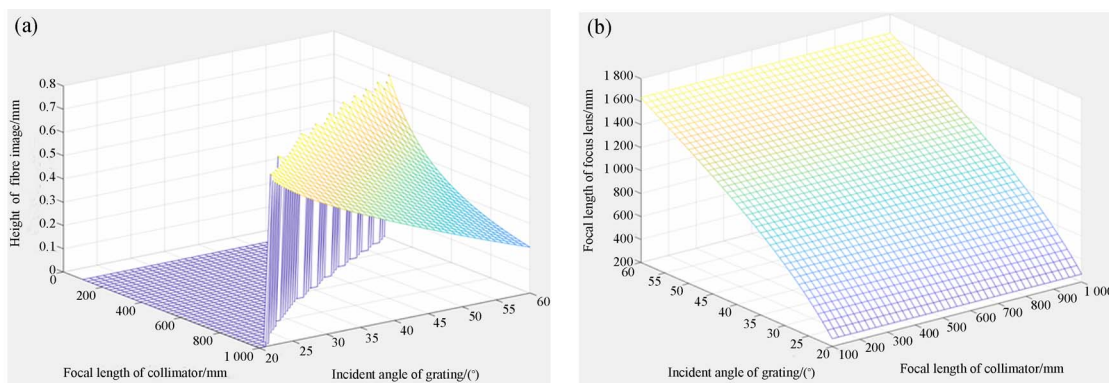


图 2 (a) 光纤像高、准直镜焦距和光栅入射角关系;(b) 聚焦镜焦距、准直镜焦距和光栅入射角关系

Fig. 2 (a)Relation among height of optical fiber image, focal length of collimator and grating incident angle;(b)Relation among focal length of focus lens, focal length of collimator and grating incident angle

#### 4 双光栅光谱仪模拟仿真

将最优化结果代入 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

0.1 nm,为了达到双光栅分光系统对  $J=1$  到  $J=12$  级 Stokes 谱线和  $J=-1$  到  $J=-12$  级 Anti-Stokes 谱线共 24 根谱线的成像质量要求,除了要控制中心的光谱成像偏差,还要控制边缘处的光谱成像偏差。本文通过在进入光栅光谱前加一

一个非球面透镜组,来实现对光谱球差的控制。通过 Zemax 软件模拟在加入非球面透镜组前后的成像偏差,结果如图 3 和 4 所示。中心处成像偏

差在加入非球面透镜组后没有太大变化,而边缘( $J=12$ )处的成像偏差得到了很大的改善,通过控制边缘的成像球差改善了边缘成像效果。

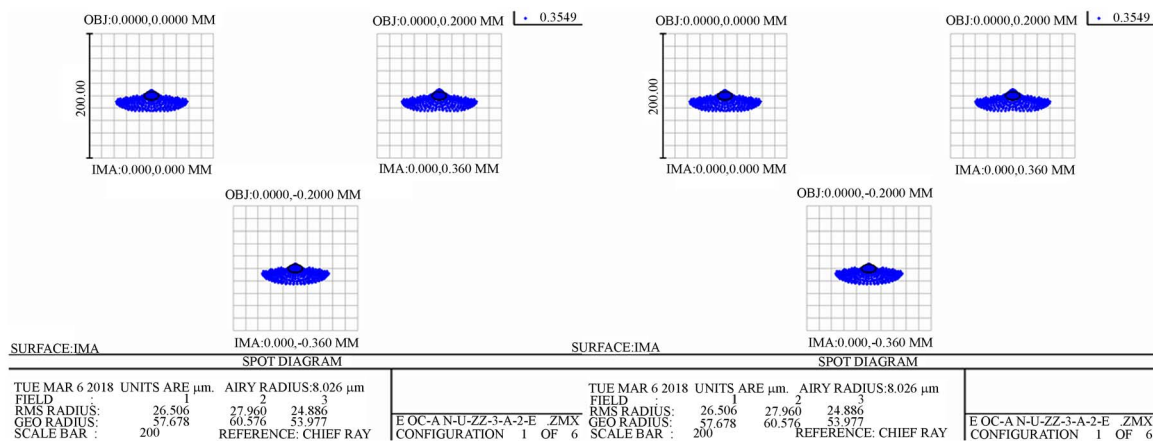


图 3 纯转动拉曼光谱中心处的成像偏差

Fig. 3 Aberration of purely rotational Raman spectral center

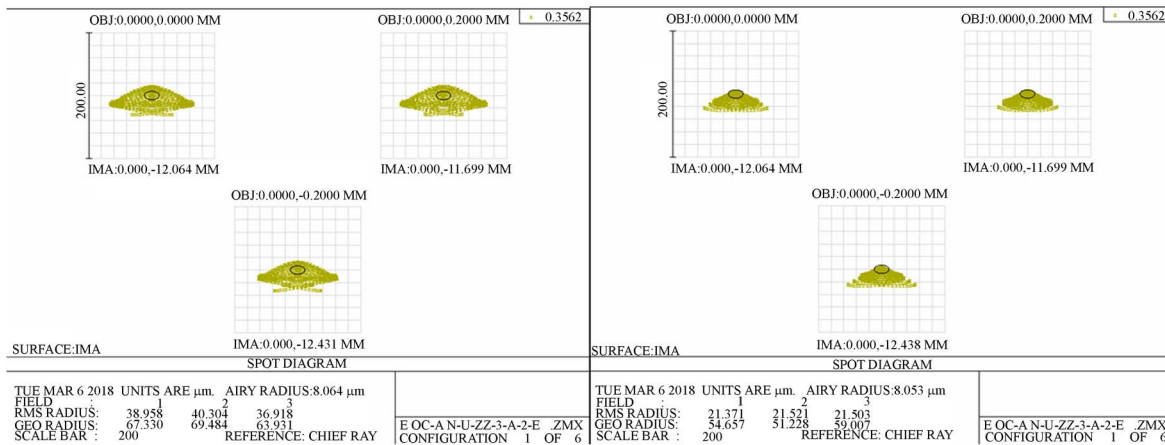


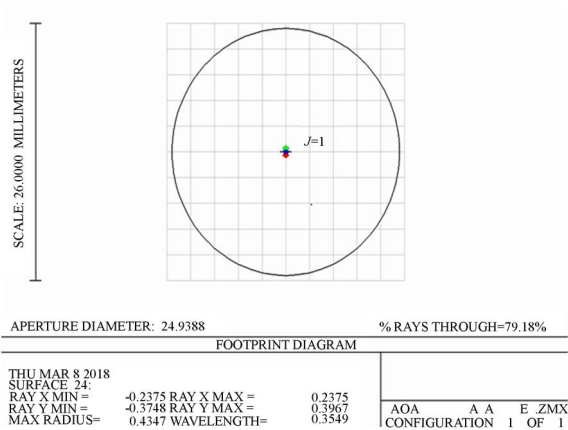
图 4 纯转动拉曼光谱边缘处的成像偏差

Fig. 4 Aberration of purely rotational Raman spectral edge

对优化后的点列图进行分析,模拟结果如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,单个测温拉曼光谱的光谱宽度在 0.771 5 mm;从图 5(b)可以看出,三个连续测温拉曼光谱光谱间隔在 1 mm,在连续光谱的光谱间隔为 0.1 nm 的情况下完成了 10 mm/nm 线色散率的双光栅分光光学系统设计;图 5(c)显示 24 根 Stokes 谱线和 Anti-Stokes 谱线的点列图。图 6 所示为 Zemax 软件的仿真结果,结果显示测温高色散率光谱仪系统达到了将

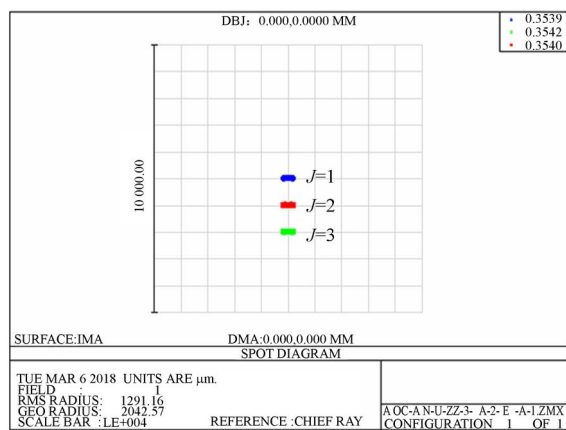
24 根 Stokes 谱线和 Anti-Stokes 谱线完全分开为目的,提高了测温激光雷达的测量精度。

表 1 所示为测温拉曼激光雷达光谱仪中心瑞利-米散射回波信号在纯转动拉曼谱各能级的强度分布,从表中可以看出,越靠近光谱中心,能量越强。瑞利-米散射回波信号强度在  $J=1$  级的纯转动拉曼光谱成像效果实现了  $10^6$  抑制;而在  $J=6$  级的抑制率可以达到  $10^8$ ,光谱仪实现了対瑞利-米散射信号高抑制的目的。



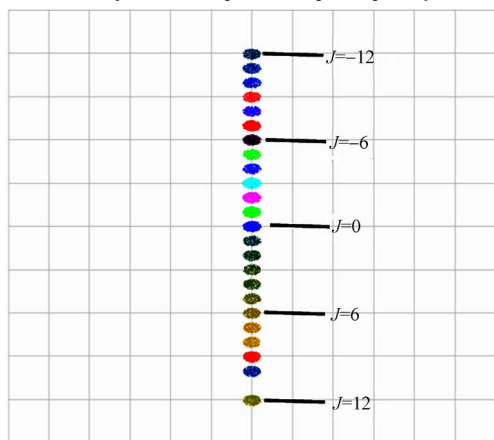
(a) 单个测温纯转动拉曼谱线

(a) Pure rotation Raman spectrum in single temperature measurement



(b) 相邻三个测温纯转动拉曼谱线

(b) Three adjacent temperature-pure purely rotating



(c) 24 根测温纯转动拉曼谱线

(c) 24 temperature-pure purely rotating Raman lines

图 5 不同根谱线处点列图

Fig. 5 Spot diagrams at different wavelengths

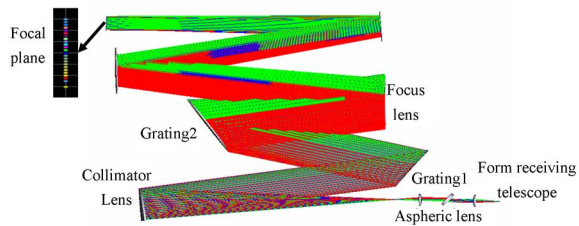


图 6 双光栅光谱仪仿真结果

Fig. 6 Simulation results of double-grating spectrometer

表 1 中心瑞利-米散射回波信号的强度分布

Tab. 1 Intensity of central Rayleigh-Mie scattering echo signal

级数	波长/nm	强度/J
$J = -12$	3.538	3.8354E-08
$J = -11$	3.539	1.93982E-08
$J = -10$	3.540	2.22722E-08
$J = -9$	3.541	5.57021E-08
$J = -8$	3.542	9.06947E-08
$J = -7$	3.543	5.24487E-08
$J = -6$	3.544	6.21979E-08
$J = -5$	3.545	3.8716E-08
$J = -4$	3.546	1.11596E-07
$J = -3$	3.547	2.73258E-07
$J = -2$	3.548	2.93856E-07
$J = -1$	3.549	2.7916E-07
$J = 0$	3.550	2.544333097
$J = 1$	3.551	1.73711E-06
$J = 2$	3.552	8.16556E-07
$J = 3$	3.553	6.60161E-07
$J = 4$	3.554	2.64663E-07
$J = 5$	3.555	5.76334E-08
$J = 6$	3.556	9.14903E-08
$J = 7$	3.557	6.34574E-08
$J = 8$	3.558	2.63687E-08
$J = 9$	3.559	5.06572E-08
$J = 10$	3.560	9.43924E-09
$J = 11$	3.561	3.5287E-08
$J = 12$	3.562	1.54399E-08

## 5 结 论

本文通过计算测温纯转动拉曼光谱间距,应用 355 nm 波长得到纯转动拉曼光谱间隔为 0.1 nm,对比目前测温激光雷达多采用 532 nm 波长进行探测,前者需要更高色散能力的光谱仪才能

达到高精度探测的目的。首先对光纤像高和相邻光谱间隔与光栅入射角的关系进行光线追迹,得到最优的两个光栅入射角。经过对光纤像高和光栅入射角与准直镜和聚焦镜的关系进行光线追迹,得到准直镜和聚焦镜焦距的最优值。

将拟合最优化结果代入 Zemax 软件进行优

化分析,结果显示单个成像光谱的成像宽度控制在 0.771 5 mm,间隔 0.1 nm 的纯转动连续光谱成像中心间隔可以达到 1 mm,满足高光谱线分辨率要求。通过计算在  $J=6$  级的纯转动拉曼后向散射信号对瑞利-米散射信号实现了  $10^8$  抑制,达到了高精度纯转动拉曼激光雷达测温的目的。

#### 参考文献:

- [1] MASAHARU I, HISAJI K, TADASHI K. Efficient ultraviolet rotational Raman lidar for temperature profiling of the planetary boundary layer[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(4):052401.
- [2] DUKHYEON K, HYUNGKICH. Pure rotational Raman lidar for atmospheric temperature measurements[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2001, 39(5):838-841.
- [3] ANSMANN A, ARSHINOV Y, BOBROVNIKOV S, et al.. Double grating on ochromator for a pure rotational Raman lidar[J]. *SPIE*, 1998, 3583:491-497.
- [4] NORTON E G, POVEY I M, SOUTH A M. Broad-band CCD detection system for rotational Raman lidar studies of the troposphere [J]. *SPIE*, 4153: 657-662.
- [5] 王宏伟,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):143-148.  
WANG H W, HUA D X, WANG Y F, et al.. The design and analysis of the new spectral spectro-
- scopic system for the water vapor detection Raman lidar [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12):143-148. (in Chinese)
- [6] 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.  
LIU Y L, ZHANG Y CH, SU J, et al.. A rotating Raman laser radar is used to detect the distribution of low-altitude atmospheric temperature [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(10):43-48. (in Chinese)
- [7] WANG S L, SU J, ZHAO P T, et al.. A pure rotational Raman lidar based on three-stage Fabry-Perot etalons for monitoring atmospheric temperature[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(6): 3941-3947.
- [8] RISTORI P, FROIDEVAUX M, DINOEV T, et al.. Development of a temperature and water vapor Raman lidar for turbulent observations[J]. *SPIE*, 2005, 5984:1-8.
- [9] KIM D, PARK S, CHA H, et al.. New multi-quantum number rotational Raman lidar for obtaining temperature and aerosol extinction and back-scattering scattering coefficients [J]. *Applied Physics B*, 2005, 82(1):1-4.

#### 作者简介:



刘 洋(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,2005年、2009年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: yangliu@aiofm. ac. cn

#### 导师简介:



张天舒(1976—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,主要从事激光雷达环境监测方面的研究。E-mail: tszhang@aiofm. ac. cn