

绝对测温转动拉曼激光雷达分光系统设计及性能

李启蒙 李仕春 秦宇丽 胡向龙 赵静 宋跃辉 华灯鑫

Design and performance of spectroscopic filter of rotational Raman temperature lidar for absolute measurement

Li Qi-Meng Li Shi-Chun Qin Yu-Li Hu Xiang-Long Zhao Jing Song Yue-Hui Hua Deng-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 014207 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171834

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171834>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高光谱分辨率激光雷达鉴频器的设计与分析

Design and analysis of high-spectral resolution lidar discriminator

物理学报.2017, 66(18): 184202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.184202>

远距离探测拉曼光谱特性

Characteristics of Raman spectrum from stand-off detection

物理学报.2016, 65(5): 054206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054206>

抑制光束抖动的压电倾斜镜高带宽控制

High-bandwidth control of piezoelectric steering mirror for suppression of laser beam jitter

物理学报.2016, 65(2): 024209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024209>

非均匀采样的功率谱反演大气湍流相位屏的快速模拟

Fast simulation of atmospheric turbulence phase screen based on non-uniform sampling

物理学报.2015, 64(22): 224217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224217>

变形镜高斯函数指数对迭代法自适应光学系统的影响

Influence of Gaussian function index of deformable mirror on iterative algorithm adaptive optical system

物理学报.2015, 64(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094207>

绝对测温转动拉曼激光雷达分光系统设计及性能*

李启蒙 李仕春† 秦宇丽 胡向龙 赵静 宋跃辉 华灯鑫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2017年8月14日收到; 2017年10月7日收到修改稿)

为实现转动拉曼激光雷达的绝对测量温度技术, 设计并测试了多通道转动拉曼分光系统. 提出了一阶闪耀光栅与光纤 Bragg 光栅组成的两级并行多通道拉曼分光系统, 优化了其核心级联器件(微米级光纤阵列)的参数及光路结构; 仿真分析了一级分光系统的分光光路, 转动拉曼谱线最大离心伸缩量约为 0.0031 nm, 离心伸缩比为 0.69%; 实验测试表明一级分光系统各转动拉曼通道的通道系数均在 0.75 以上, 提取到拉曼光谱的实测中心波长与理论值的最大偏差约为 0.0398 nm, 偏离度为 8.86%, 可提供对弹性散射信号 27 dB 以上的有效抑制, 结合已有光纤 Bragg 光栅二级分光实现高达 62 dB 弹性散射的抑制效果, 可以实现对单条偶转动量子数转动拉曼谱线的精细光谱提取.

关键词: 测温激光雷达, 转动拉曼光谱, 一阶闪耀光栅, 多通道光纤阵列

PACS: 42.68.Wt, 33.20.Fb, 42.79.Dj, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.67.20171834

1 引言

大气温度是描述大气物理状态的重要参数之一, 可表征空气的冷热程度, 与太阳辐射、海拔高度、大气湿度及压力等密切相关, 是天气分析与预报以及大气环境监测的重要气象参数之一^[1]. 在大气科学领域中, 分层研究大气结构主要依据不同高度处温度的变化关系, 大气中发生的热力过程^[2]和水汽凝结现象也与大气温度密切相关. 垂直方向上的明显大气温度变化可引起大气在垂直方向上的热运动, 使得大气密度、湿度等性质发生明显变化, 从而会影响到云雾、降水、沙尘的聚散等重要天气现象^[3]. 近年来, 由于人为干预自然对大气环境的影响, 例如大规模使用石油、煤等非绿色能源, 使得 CO₂ 的排放量急剧增加, 温室效应以及城市热岛效应等异常现象频繁发生. 因此, 对于大气科学的深入分析和高精度长时效的数值天气预报, 研究具备高时空分辨率的大气温度精细探测技术有着重要的科学价值^[4]和社会意义.

激光雷达作为一种主动遥感技术, 已广泛应用于大气和海洋等探测领域^[5], 是现代雷达技术从厘米波、毫米波向光波的延伸发展, 实现了遥感技术向高时空分辨率、高精度领域的发展^[6]. 转动拉曼激光雷达作为探测大气温度激光雷达的一个分支, 其设计研究主要集中于拉曼光谱分光系统, 由于米-瑞利散射截面相对转动拉曼散射要高 3—4 个数量级, 欲精细提取出微弱的转动拉曼信号, 需要对强烈弹性散射信号提供 60—70 dB 抑制^[7,8], 故合理且高效的拉曼分光系统成为拉曼激光雷达得以应用的关键. 为此, 国内外学者大多采用两级分光串联的系统结构, 设计并实现了采用双衍射光栅^[9–11]、双干涉滤光片^[1,12]、衍射光栅结合原子蒸气滤波器^[13]和光纤光栅^[14,15]为核心光学滤波器件的转动拉曼分光系统. 然而, 上述分光系统都是通过提取两路温度敏感性相反的转动拉曼信号, 利用两者的比值获得大气温度廓线^[16], 可称为拉曼相对测温^[17], 反演过程中需借助其他并行设备进行数据校正. 通常由于大气状态的不可重复性, 限制了激光雷达系统校正过程的精确性, 进

* 国家自然科学基金(批准号: 61308106, 41627807)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lsczqz@xaut.edu.cn

而影响拉曼激光雷达的探测精度. 2001年, 英国剑桥大学的研究人员曾提出利用携有温度信息的转动拉曼谱线直接反演大气温度的, 实现绝对探测技术^[18], 使得绝对测温转动拉曼激光雷达的分光系统设计成为转动拉曼激光雷达领域的重要研究方向. 相对于拉曼相对测温, 绝对测温技术可避免校正过程中引入系统误差, 提高探测精度, 但高精度的拉曼光谱分光要求是制约绝对测温技术发展的难题.

基于课题组在全光纤转动拉曼光谱分光领域的研究成果和衍射光栅分光系统的研究进程^[14,17], 本文依据拉曼光谱频移特性和衍射光栅分光原理, 仿真计算氮气分子相邻转动拉曼谱线间的波长差以及经一阶闪耀光栅分光后的衍射位置分布, 分析相邻谱线的波长差与衍射位移差的对应关系, 设计并搭建了基于一阶闪耀光栅对接多通道光纤阵列的一级分光系统; 实验测试各光纤通道的通道系数和带外抑制率以及拉曼光谱与多通道光纤阵列的匹配一致性, 验证了级联光纤 Bragg 光栅二级分光组成的两级多通道拉曼分光系统的分光性能. 其中一阶闪耀光栅的衍射效率约为80%, 光栅 Bragg 光栅的透过率高于90%, 所以两级分光系统的理论透过率约为70%, 然而系统构建时存在空间光与小芯径(数微米)光纤的低耦合效率问题^[19,20]. 虽然这会限制系统的探测距离, 但是该分光系统可实现精细提取单条转动拉曼谱线, 为绝对探测大气温度转动拉曼激光雷达提供了合理且高效的分光方法与技术支撑.

2 转动拉曼激光雷达分光系统

用于绝对测温的转动拉曼激光雷达系统结构如图1所示, 采用两级分光系统拼接的方法实现对弹性散射信号60—70 dB的抑制. 图2为两级分光系统的具体分光光路示意图, 采用一阶闪耀光栅作为一级分光的主要分光器件, 本课题组在国内首次研制成功的可见光波段光纤 Bragg 光栅作为二级分光核心器件, 通过微米级光纤阵列实现两级分光系统的级联对接. 大气回波信号通过光纤阵列的输入光纤(CH2)进入一级分光系统, 经透镜准直入射到一阶闪耀光栅, 不同波长的光信号由于一阶闪耀光栅的色散作用而发生光谱分离, 再经透镜聚焦排列在处于焦平面处的光纤阵列端面, 由光纤通道(CH1和CH3—CH12)对应接收, 之后级联到二级分光系统(FBG)进行二次分光. 其中光纤阵列作为对接两级分光系统的关键结构, 直接影响着整个分光系统的工作性能, 因此光纤阵列的结构设计及光纤参数的选择至关重要.

3 拉曼分光光路分析

由于氮气和氧气分子的转动拉曼谱线呈现交叉分布, 且相邻谱线的间距微小, 对提取单条氮气分子的拉曼谱线形成强烈干扰, 所以探究氮气分子拉曼散射频移以及相邻转动拉曼谱线间距是分光系统设计的必要过程. 转动拉曼光谱中, 双原子分子对应 anti-Stokes 分支的拉曼频移^[21] 关系为

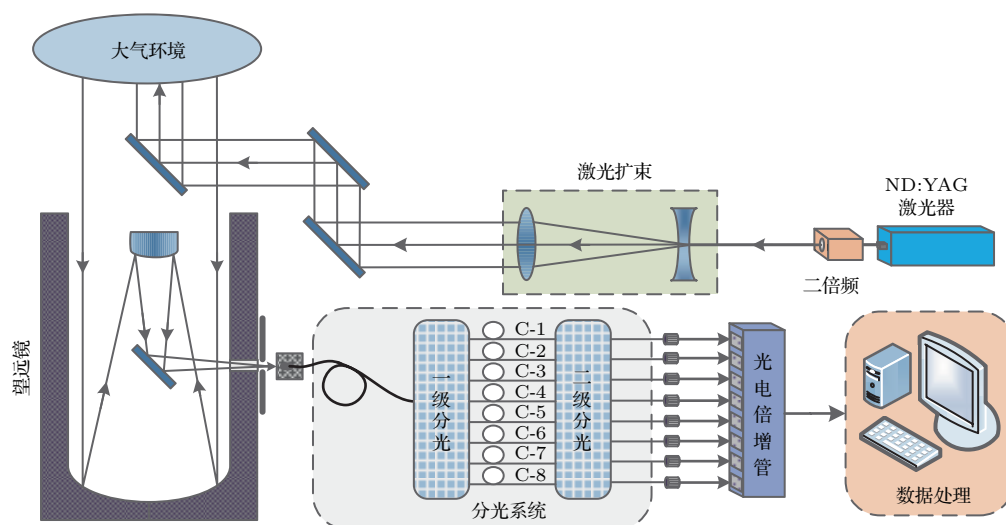


图1 绝对测温转动拉曼激光雷达系统

Fig. 1. Rotational Raman temperature lidar for absolute measurement.

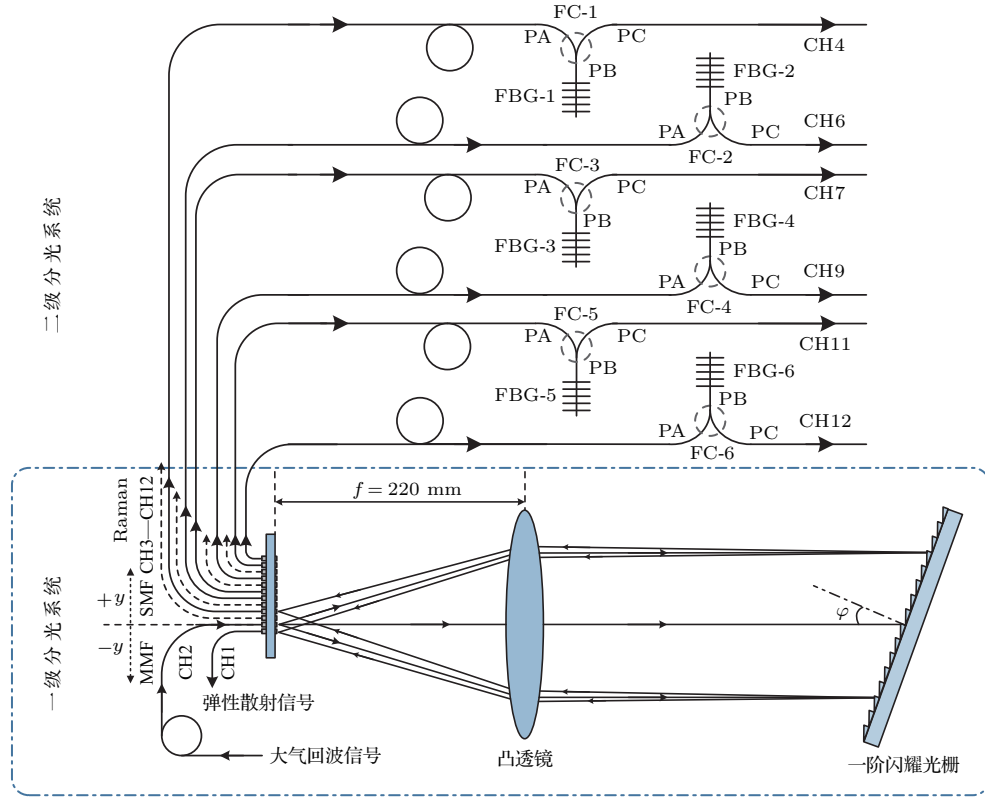


图2 两级拉曼分光系统分光光路

Fig. 2. Optical path of two-stage Raman spectroscopic filter.

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{\nu}(J) &= \tilde{\nu}(J) - \tilde{\nu}_0 \\ &= 2B_0(2J-1) - D_0[3(2J-1) + (2J-1)^3] \\ (J &= 2, 3, 4, \dots), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\tilde{\nu}(J)$ 为转动拉曼波数, $\tilde{\nu}_0$ 为弹性散射波数, J 为初始转动角动量子数 (简称转动量子数); B_0 和 D_0 分别为振动基态的转动系数和离心伸缩系数, 取值 1.989500 cm^{-1} 和 $5.48 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$. 转动拉曼谱线的中心波长 λ 可表示为

$$\lambda(J) = \lambda_0 - \lambda_0^2 \Delta\tilde{\nu}(J), \quad (2)$$

式中 λ_0 为弹性散射信号的中心波长. 由于拉曼频移关系式中 $D_0[3(2J-1) + (2J-1)^3]$ (简称 D_0 项) 的存在, 使得氮气分子相邻转动拉曼谱线间距随转动量子数 J 增大而呈现递减趋势, 为观察 D_0 项对拉曼频移的影响, 假设拉曼频移关系中不含 D_0 项, 得出相邻偶转动量子数拉曼谱线间的波长差 $\Delta\lambda'(J) = \lambda'(J) - \lambda'(J-2) = 0.4506 \text{ nm}$, 与原拉曼频移关系 (含 D_0 项) 得出的相邻波长差进行对比, 从而获知 D_0 项在拉曼频移中所占的权重.

anti-Stokes 分支中氮气与氧气分子的转动拉曼光谱强度分布及相邻偶转动量子数转动拉曼谱

线的波长差如图 3 所示, 图中红色方形实点和蓝色圆形实点分别表示温度在 300 K 时, 氮气 (N_2) 和氧气 (O_2) 分子的转动拉曼频移关系及散射截面强度; 右起第一个黑色菱形实点为转动量子数 $J = 2$ 的转动拉曼谱线与弹性散射波长 λ_0 的波长差, 其余表示氮气分子相邻偶转动量子数转动拉曼谱线间的波长差, 例如右起第二个点描述的是转动量子数 $J = 4$ 相对于 $J = 2$ 转动拉曼谱线的波长差, 黑色带箭头实线表示弹性散射信号的中心波长位置.

由图 3 可知, 氮气与氧气分子的相邻转动拉曼谱线间距微小, 部分谱线存在重叠现象, 为避免相邻光谱串扰, 故选择性地提取氮气分子对应转动量子数 $J = 6, 10, 12, 16, 20, 22$ 的转动拉曼谱线^[17]. 氮气分子相邻偶转动量子数的转动拉曼谱线间波长关系表明, 波长差 $\Delta\lambda$ 由 0.4506 nm 到 0.4475 nm 逐渐递减, 平均值约为 0.4494 nm , 浮动区间为 $-0.0012 \sim +0.0019 \text{ nm}$, 对比 $\Delta\lambda'(J) = 0.4506 \text{ nm}$, 可得出 D_0 项引入的最大离心伸缩量 Δl 约为 0.0031 nm , 定义离心伸缩比 $\xi_D = \Delta l / \Delta\lambda' = 0.69\%$.

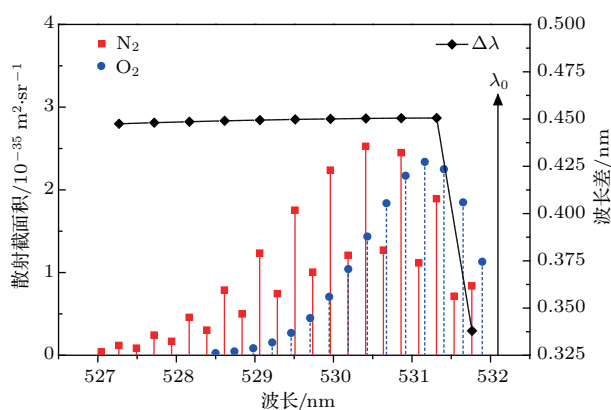


图3 温度为300 K时,氮气和氧气分子转动拉曼光谱强度分布及相邻偶转动量子数拉曼谱线波长差

Fig. 3. Distribution of rotational Raman spectra intensity of Nitrogen and Oxygen molecules at 300 K temperature and the wavelength difference of Raman spectra of adjacent rotational quantum number.

衍射光栅会导致不同波长的入射光发生色散是一阶闪耀光栅分光的根本依据,其中光栅的线色散是指不同波长的光谱在聚焦镜的焦平面上能分开的距离.在正透镜焦平面上,波长 λ 的色散距离 $L_{\text{dis}}(\lambda)$ 为

$$L_{\text{dis}}(\lambda) = f \frac{m}{d \cos(\theta)}, \quad (3)$$

式中, f 是凸透镜的焦距, d 和 m 分别是光栅常数和衍射级次(本文取 $m = 1$), θ 是不同入射波长 λ 对应的衍射角.波长 λ 的衍射会聚点相对闪耀波长 λ_b 会聚点的线距离 L_d 可表示为

$$L_d(\lambda) = \int_{\lambda_b}^{\lambda} L_{\text{dis}}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_b}^{\lambda} f \frac{m}{d \cos(\theta)} d\lambda, \quad (4)$$

直线距离 L_d 越长,对应焦平面上的空间分辨能力越强.

基于衍射光栅的分光原理,仿真计算了经一阶闪耀光栅分光后的理论衍射位移差,其中主要仿真参数:激光波长 $\lambda_0 = 532.1$ nm,闪耀光栅的光栅常数 $d = 1200$ lines/mm,准直透镜焦距 $f = 220$ mm.氮气分子偶转动量子数拉曼谱线的衍射位置分布及相邻谱线间的衍射位移差如图4所示,图中黑色圆点表示氮气分子偶转动量子数的转动拉曼谱线对应焦平面上的衍射位置;上三角形表示比相应转动拉曼谱线波长更短谱线的衍射位移差(即左邻位移差),而下三角形箭头表示比相应转动拉曼谱线波长更长谱线的衍射位移差(即右邻位移差),三角形旁边的数字和字母表示经过衍射光栅分光后相邻谱线属性,例如,转动量子数 $J = 6$ 谱线的上三角形和 9O_2 ,表示该谱线的左边相邻谱线是转动量子数 $J = 9$ 的氧气分子谱线,而下三角形和 7O_2 ,表示该谱线的右边相邻谱线是转动量子数 $J = 7$ 的氧气分子谱线;图中标示出衍射位移差为 ± 25 μm 的两条水平虚线,可称为谱线分离禁带.

由图4可看出,欲提取的转动拉曼谱线与相邻谱线的衍射位移差值皆大于25 μm ,相邻拉曼谱线的衍射位移差近似为125 μm .为提取单条转动拉曼光谱且避免谱线间的相邻串扰,光纤阵列中用于接收转动拉曼光谱的光纤间距应为125 μm .入射光纤芯径不宜过大,应避免转动拉曼光谱的衍射会聚点中心位置 ± 25 μm 范围内混入其他干扰光谱,故入射光纤芯径应控制在50 μm 内,以保证分光光路中的逆向光斑尺寸.

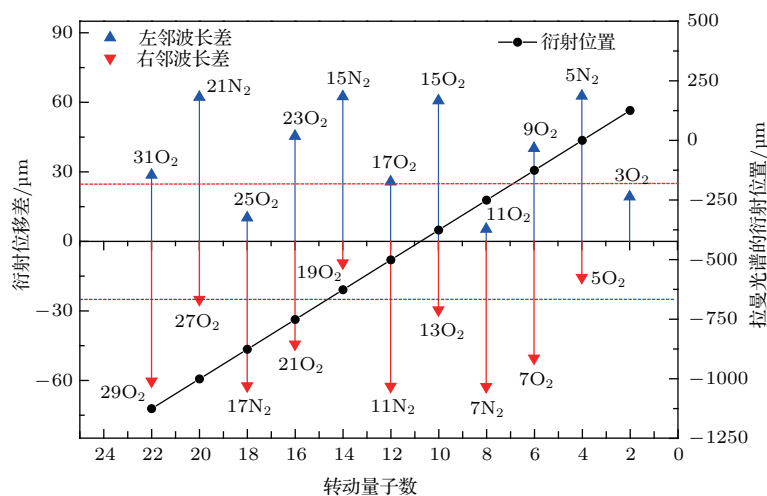


图4 相邻偶转动量子数转动拉曼光谱的衍射位移差及衍射位置分布

Fig. 4. Diffraction displacement difference and the distribution of diffraction position of rotational Raman spectra of adjacent rotational quantum number.

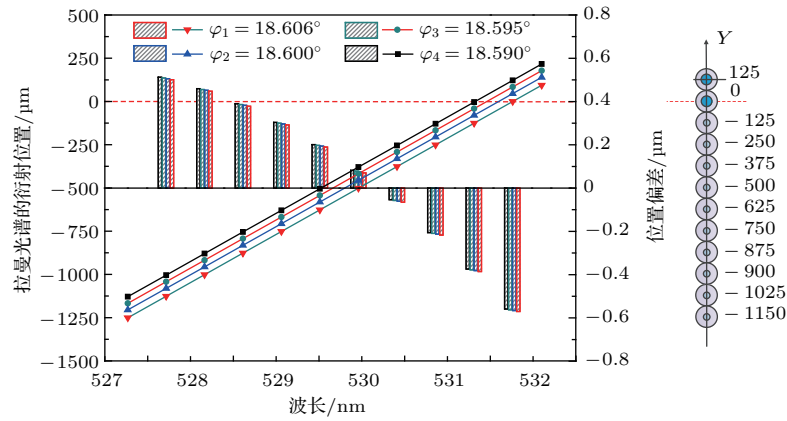
图5 不同入射角 φ 条件下相邻转动拉曼光谱的衍射位置变化关系

Fig. 5. The relationship between the diffraction positions of adjacent rotational Raman spectra under different incidence angle φ .

根据 Littrow 自准直法则, 改变入射角会造成衍射位移的基准波长发生偏移, 相邻谱线的衍射位移差也会发生不同程度的改变. 仿真计算不同入射角 φ 条件下转动拉曼谱线的衍射位置分布情况, 如图 5 所示, 图中下三角、上三角、圆形和方形实点分别表示入射角 18.606° , 18.600° , 18.595° 和 18.590° 时转动拉曼谱线的衍射位置, 参考左侧纵向坐标轴; 不同颜色的柱状图分别对应不同入射角条件下相邻转动拉曼谱线的衍射位移差 ΔL 与定值 $125 \mu\text{m}$ 的差值, 例如右起第一列柱状图表示, 在不同入射角条件下, 转动量子数 $J = 2$ (531.76 nm) 与 $J = 4$ (531.31 nm) 转动拉曼谱线的衍射位移差与 $125 \mu\text{m}$ 的差值; 图右侧标示出入射角条件为 18.606° 时, 光纤阵列与转动拉曼光谱的位置匹配关系.

由图 5 可知, 弹性散射信号和转动拉曼信号分居入射光纤两侧, 在入射角 φ 发生变化时, 转动拉曼光谱的衍射位置出现整体偏移现象, 致使光纤阵列与转动拉曼光谱的匹配关系发生改变, 然而各

拉曼谱线会聚位置呈现均匀分布, 相邻谱线间的衍射位移差 ΔL 相对于定值 $125 \mu\text{m}$ 的浮动范围为 $-0.57 \sim +0.51 \mu\text{m}$, 其浮动数值小于光纤阵列的加工误差 $\pm 2 \mu\text{m}$. 以此推断, 当入射角 φ 变化很小时, 相邻谱线间的衍射位移差 ΔL 近似恒定, 空间衍射位置均匀分布, 并且可以通过微调入射角度改变转动拉曼光谱与多通道光纤阵列的匹配关系, 提高多通道光纤阵列的利用率, 故用于对接两级分光系统的多通道光纤阵列可设计为线性排列的均匀分布式结构.

4 拉曼分光系统性能测试

拉曼光谱与多通道光纤阵列的匹配一致性以及各光纤通道的带外抑制率和通道系数是并行多通道分光系统的主要性能指标, 是验证分光系统分光性能的重要依据. 其中带外抑制率性能除了涉及本文重点讨论的抑制强烈的弹性散射信号外, 该系统还能抑制转动拉曼谱线间的太阳背景光谱, 故该

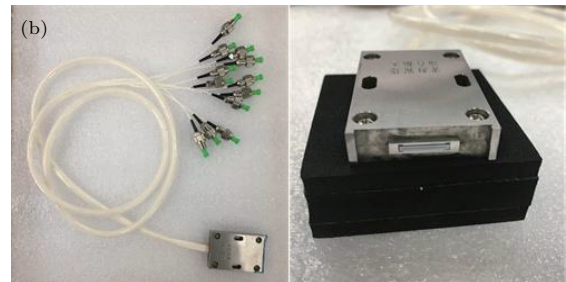
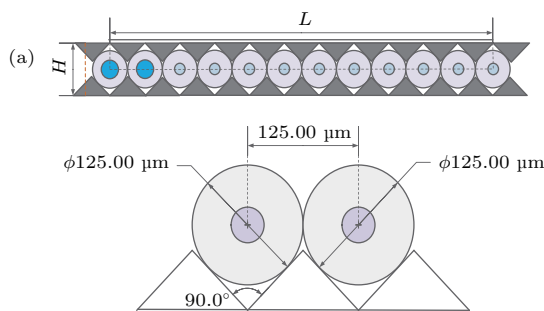


图6 12通道光纤阵列示意图 (a) 光纤排列结构; (b) 实物图

Fig. 6. The schematic diagram of 12-channel fiber array: (a) The structure of fiber array; (b) physical picture.

分光系统可能具备较好的白天温度探测能力. 带外抑制率测试需要模拟转动拉曼信号和弹性散射信号, 分析及实验均表明, 很难将太阳背景光耦合进可见光波段的单模光纤, 因此本文利用宽谱光源与半导体激光器(LD)光源作为输入光源, 搭建由一阶闪耀光栅、多通道光纤阵列与凸透镜组成的一级

分光系统, 并测试其系统参数和光谱性能, 主要器件参数如表1所列. 通过仿真分析可设计出线性排列的均匀分布式12通道光纤阵列, 如图6所示, 其中光纤直径为125 μm , 左起第1, 2根为50 μm 芯径的多模光纤(MMF), 其余为芯径为9 μm 的单模光纤(SMF).

表1 一级分光系统和输入光源的主要参数

Table 1. The main parameters of primary spectroscopy and input light source.

器件	主要参数	作用
多通道光纤阵列	MMF: 50/125 μm	用于精细匹配接收转动拉曼光谱, 级联二级分光系统
	SMF: 9/125 μm	
	光纤间距: 125 μm ($\leq \pm 2 \mu\text{m}$) 数值孔径: $NA = 0.12$	
宽谱光源	光谱范围: 170—2100 nm	模拟转动拉曼光谱
半导体激光器(LD)	中心波长: (532.0 $\pm$ 0.05)nm	模拟弹性散射信号
一阶闪耀光栅	光栅刻线: 1200 lines/mm 闪耀角: 17°27'	用于精细分离拉曼光谱
凸透镜	焦距: $f = 220 \text{ mm}$	准直, 聚焦

4.1 通道系数及匹配一致性测试

多通道光纤阵列与单条转动拉曼光谱的精准匹配是绝对反演大气温度的重要条件, 因此测试各光纤通道的通道系数及拉曼光谱与多通道光纤阵列的匹配一致性是很有必要的. 利用宽谱光源作为输入光源, 模拟大气回波信号中的转动拉曼光谱, 通过法兰盘直接耦合到光纤阵列的输入纤, 依次测试各出射光纤通道的输出光谱, 结合输入光谱条件分析其光谱特性. 图7给出了第1根光纤通道($n = 1$)及第4, 6, 7, 9, 11和12根所对应接收到的输出光谱, 即对应转动量子数 $J = 6, 10, 12, 16, 20, 22$ 的转动拉曼光谱, 黑色粗实线为原始数据, 蓝色细实线是对宽带光源光谱归一化处理后的数据, 红色虚线为其高斯拟合曲线, 红色箭头虚线表示弹性散射信号的理论光谱中心位置.

图7表明, 各出射光纤通道的输出光谱与欲提取的转动拉曼光谱逐次对应, 相邻谱线之间的波长差与理论值相当, 符合度较高, 具体数值关系参照表2, 其中理论值为仿真计算所得各通道对应的中心波长位置, 同时各通道可有效地抑制相邻拉曼谱线间的相互串扰和光纤通道的带外背景噪声. 由表2可知, 第1根光纤($n = 1$)对应的实测中心波长为532.2185 nm, 与弹性散射波长 λ_0 的偏差较大, 相对偏差为0.1185 nm, 此种现象是光纤阵列的均匀排列结构所致, 因为如图5中红色下三角所示, 入射角条件为18.606°时, 第2根入射纤

与弹性散射波长 λ_0 对应衍射位置的理论间距约为94.15 μm , 对应波长差为0.3380 nm, 并非光纤间距125 μm 对应的波长差0.4490 nm, 故实测波长偏长波方向; 波长为532.2185 nm的光谱与转动量子数 $J = 6$ (对应光纤通道 $n = 4$)拉曼光谱的理论衍射位移差为378.11 μm , 其值与光纤阵列第1根与第4根光纤通道的线距离375.00 μm 相差3.11 μm , 对比光纤阵列各光纤通道的加工误差 $\pm 2 \mu\text{m}$ 可知, 该实测数据的误差在期望误差范围内, 与理论值相符; 其余实测中心波长与理论波长偏差的绝对值在0.0029—0.0398 nm之间, 相对于相邻偶转动量子数转动拉曼谱线的平均波长差0.4490 nm, 其最大偏离度为 $\gamma = 0.0398/0.4490 = 8.86\%$.

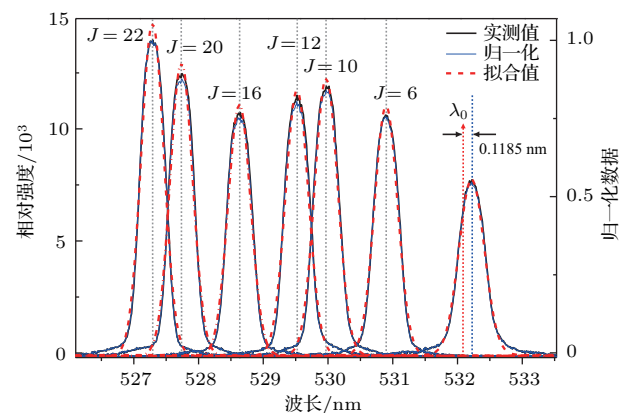


图7 $\varphi = 18.606^\circ$ 时, 部分光纤通道的输出光谱
Fig. 7. The output spectrum of partial fiber channel when $\varphi = 18.606^\circ$.

表2 部分光纤通道的通道系数及匹配一致性参数

Table 2. The channel coefficient and matching consistency parameters of partial fiber channel.

光纤序号	1	4	6	7	9	11	12
转动量子数	—	6	10	12	16	20	22
理论值/nm	532.1000	530.8610	529.9606	529.5110	528.6123	527.7156	527.2681
实测值/nm	532.2185	530.8722	529.9460	529.5081	528.5910	527.6830	527.2283
偏差/nm	0.1185	0.0112	-0.0146	-0.0029	-0.0213	-0.0326	-0.0398
偏离度/%	—	2.49	3.25	0.65	4.74	7.26	8.86
通道系数	0.53	0.75	0.85	0.82	0.77	0.89	1.00

以第12根光纤通道作为参考基准,转动拉曼通道系数 η 可表示为

$$\eta(J) = \frac{I_R(J) \cdot I'_0}{I_0(J) \cdot I_{R22}} \quad (J = 6, 10, 12, 16, 20, 22), \quad (5)$$

式中, $I_0(J)$ 和 $I_R(J)$ 分别表示与偶转动量子数拉曼谱线波长相等的入射光谱强度和各光纤通道提取到的出射光谱强度, I'_0 为与 $J = 22$ 的转动拉曼谱线波长相等的入射光谱强度, I_{R22} 为第12根(即 $J = 22$)光纤通道提取到的出射光谱强度.由(5)式计算出各转动拉曼通道系数均在0.75以上,如表2所列.

4.2 弹性散射信号抑制率测试

由于弹性散射截面相对转动拉曼散射要高3—4个数量级,欲精细提取出微弱的转动拉曼信

号,需要对强烈的弹性散射信号至少提供60 dB的抑制,其中光纤Bragg光栅作为二级分光核心器件具有35 dB的抑制效果^[14],因此一级分光系统对弹性散射的抑制能力会直接影响两级分光系统的整体光谱性能.为了分析出射光纤通道的带外抑制率,构建如图8所示的实验测试系统,利用耦合器FC对宽带光源与半导体激光器(LD)的输出光谱进行耦合,其中LD的输出光谱强度高出宽带光源至少3个量级,以模拟大气回波信号,通过光谱仪直接测试FC输出端1(OUT1)的输出光谱,获得一级分光系统的输入光谱条件;将OUT1通过法兰盘FP3耦合进光纤阵列的输入纤(即第2根多模光纤),依次测试各路出射光纤通道的输出光谱.整个实验过程中,利用光功率计监测耦合器输出端2(OUT2)的输出功率,保证OUT1的输出条件恒定.

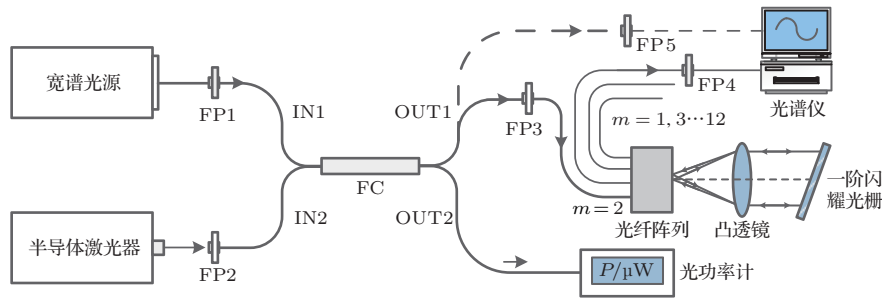


图8 带外抑制率测试方案

Fig. 8. The test scheme of out-of-band suppression.

图9给出了第4, 6, 7, 9, 11和12路光纤通道的输出光谱实测值(黑色细实线)及其拟合曲线(红色虚线),并给出了一级分光系统的输入光谱实测值(黑色粗实线)及其拟合曲线(蓝色点划线),以对比分析输入光谱与输出光谱间关系.

由图9可看出,红色虚线531.9 nm位置附近的相对强度峰值逐渐减小,此现象符合光纤传输的高

斯特征分布.光纤通道的带外抑制率(suppression)为各光纤通道对其带外干扰噪声的抑制能力,可表示为

$$Sup(n) = -10 \lg \frac{I_O(n) \cdot I_{IR}(n)}{I_I(n) \cdot I_{OR}(n)} \quad (n = 4, 6, 7, 9, 11, 12), \quad (6)$$

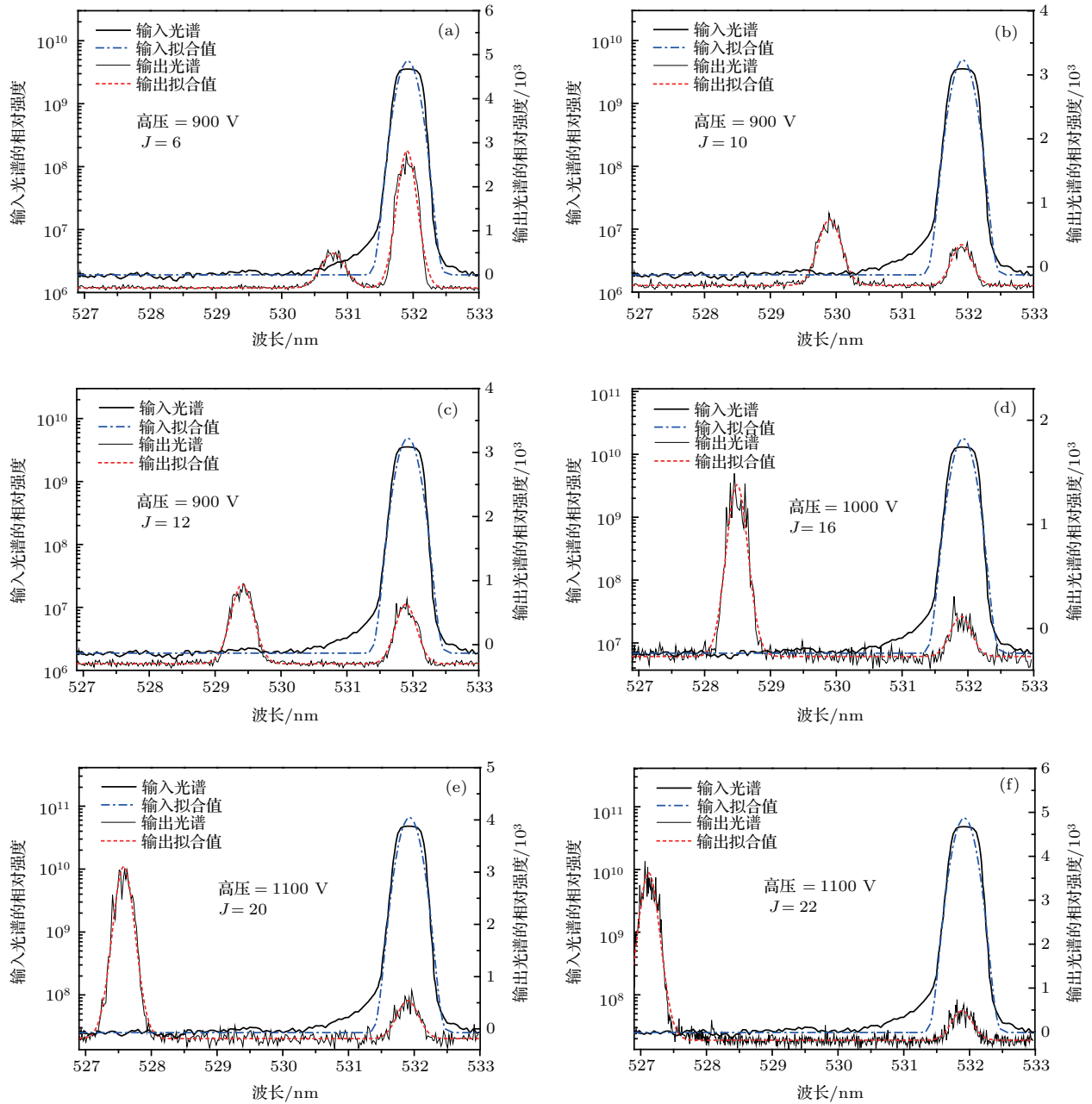


图9 部分光纤通道的输入与输出光谱 (a)–(f) 分别为转动量子数 $J = 6, 10, 12, 16, 20, 22$ 对应的光纤通道
 Fig. 9. The input and output spectra of partial fiber channel: (a)–(f) are the fiber channel with rotational quantum number of $J = 6, 10, 12, 16, 20, 22$.

式中, n 为光纤通道序号, $I_I(n)$ 和 $I_O(n)$ 分别是一级分光系统的输入和输出光谱强度, $I_{IR}(n)$ 和 $I_{OR}(n)$ 分别表示与偶转动量子数拉曼谱线波长相等的输入光谱强度和输出光谱强度.

根据 (6) 式可计算出各光纤通道的带外抑制率, 如图 10 所示, 阴影柱形表示对应转动量子数 $J = 6, 10, 12, 16, 20, 22$ 的转动拉曼通道, 对弹性散射信号的有效抑制分别为 27.0, 35.0, 30.5, 39.3, 39.5 和 40.5 dB, 可看出各通道的带外抑制率较高,

除 $n = 4$ 外, 其他通道对弹性散射信号的抑制均高于 30 dB, 当级联基于光纤 Bragg 光栅的二级分光系统后, 各光纤通道至少可实现对弹性散射信号的有效抑制高达 62 dB. 无阴影柱形为其余系统方案不予以采用的光纤通道, 故对其带外抑制率不做分析. 本系统由于提取单条转动拉曼谱线, 可有效滤除转动拉曼通道的带外背景噪声, 从而降低混入转动拉曼信号的太阳背景光噪声, 可用来绝对探测白天的大气温度.

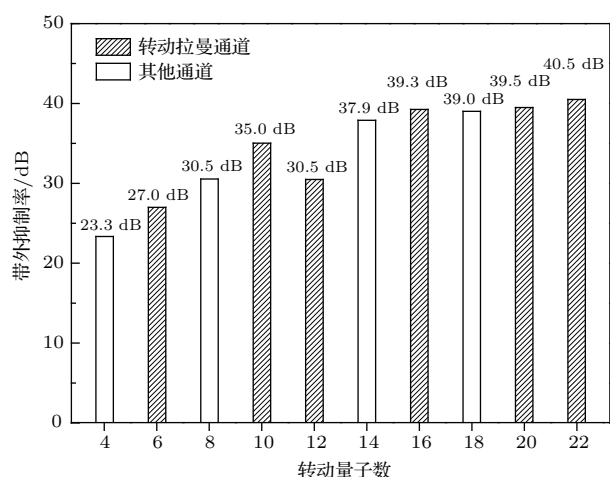


图10 带外抑制率测试结果

Fig. 10. The result of out-of-band suppression.

5 结 论

针对绝对测温的转动拉曼激光雷达系统, 仿真分析了一级分光系统的分光光路, 获得相邻转动拉曼谱线间的平均波长差约为0.4490 nm, 各转动拉曼谱线的最大离心伸缩量约为0.0031 nm, 离心伸缩比为0.69%, 经一阶闪耀光栅作用后的平均衍射位移差约为125 μm ; 设计了利用微米级光纤阵列作为级联器件, 一阶闪耀光栅与光纤Bragg光栅组成的两级并行多通道分光系统; 实验测试得出一级分光系统各转动拉曼通道的通道系数均在0.75以上, 提取到转动拉曼谱线的实测中心波长与理论值的最大偏差约为0.0398 nm, 偏离度为8.86%, 各光纤通道至少可提供对弹性散射信号27 dB的有效抑制, 结合基于光纤Bragg光栅的二级分光系统可实现高达62 dB的抑制效果, 满足精细提取单条转动拉曼光谱的技术要求. 因此, 一阶闪耀光栅级联光纤Bragg光栅组成的两级并行多通道分光系统为转动拉曼激光雷达绝对探测大气温度提供了有效的方法论证与技术支撑, 可为大气温度的高精度激光遥感探测提供新的探测手段和校正方法.

参考文献

[1] Li Y J, Song S L, Li F Q, Cheng X W, Chen Z W, Liu L M, Yang Y, Gong S S 2015 *Chin. J. Geophys.* **58** 313

(in Chinese) [李亚娟, 宋沙磊, 李发泉, 程学武, 陈振威, 刘林美, 杨勇, 龚顺生 2015 地球物理学报 **58** 313]

[2] Yang J, Liu Q Q, Dai W, Mao X L, Zhang J H, Li M 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 094209 (in Chinese) [杨杰, 刘清槐, 戴伟, 冒晓莉, 张加宏, 李敏 2016 物理学报 **65** 094209]

[3] Cooney J 1972 *J. Appl. Meteorol.* **11** 108

[4] Hua D X, Uchida M, Kobayashi T 2005 *Appl. Opt.* **44** 1305

[5] Shi J L, Guo P F, Huang Y, Qian J C, Wang H P, Liu J, He X D 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024215 (in Chinese) [史久林, 郭鹏峰, 黄育, 钱佳成, 王泓鹏, 刘娟, 何兴道 2015 物理学报 **64** 024215]

[6] Hua D X, Song X Q 2008 *Infrar. Laser Eng.* **38** 21 (in Chinese) [华灯鑫, 宋小全 2008 红外与激光工程 **38** 21]

[7] Li S C, Hua D X, Hu L L, Yan Q, Tian X Y 2014 *Spectrosc. Lett.* **47** 244

[8] Arshinov Y, Bobrovnikov S, Serikov I, Ansmann A, Wandinger U, Althausen D, Mattis I, Müller D 2005 *Appl. Opt.* **44** 3593

[9] Balin I, Serikov I, Bobrovnikov S, Simeonov V, Calpini B, Arshinov Y, van den Bergh H 2004 *Appl. Phys. B* **9** 775

[10] Chen S, Qiu Z, Zhang Y, Chen H, Wang Y 2011 *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* **112** 304

[11] Su J, Zhang Y C, Zhao Y F, Liu Y L, Hong G L, Zhao P T, Qu K F, Xie J 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 94 (in Chinese) [苏嘉, 张寅超, 赵曰峰, 刘玉丽, 洪光烈, 赵培涛, 屈凯峰, 谢军 2007 红外与激光工程 **34** 94]

[12] Behrendt A, Nakamura T, Tsuda T 2004 *Appl. Opt.* **43** 2930

[13] Zeyn J, Lahmann W, Weitkamp C 1996 *Opt. Lett.* **21** 1301

[14] Li S C, Hua D X, Wang Y F, Gao F, Yan Q, Shi X J 2015 *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* **153** 113

[15] Mao J D, Hua D X, Huo L L, Wang Y F, Wang L 2010 *Acta Optic. Sin.* **30** 8 (in Chinese) [毛建东, 华灯鑫, 胡辽林, 王玉峰, 汪丽 2010 光学学报 **30** 8]

[16] Radlach M, Behrendt A, Wulfmeyer V 2008 *Atmos. Chem. Phys.* **8** 159

[17] Li S C, Wang D L, Li Q M, Song Y H, Liu L J, Hua D X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 143301 (in Chinese) [李仕春, 王大龙, 李启蒙, 宋跃辉, 刘丽娟, 华灯鑫 2016 物理学报 **65** 143301]

[18] Norton E G, Povey I M, South A M, Jones R L 2001 *Proc. SPIE* **4153** 657

[19] Li S C, Hua D X, Wang L L, Song Y H 2013 *Optik* **124** 1450

[20] Li S C, Hua D X, Song Y H, Tian X Y 2012 *Acta Photon. Sin.* **41** 1053 (in Chinese) [李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 田小雨 2012 光子学报 **41** 1053]

[21] Hoskins L C 1975 *J. Chem. Educ.* **52** 568

Design and performance of spectroscopic filter of rotational Raman temperature lidar for absolute measurement*

Li Qi-Meng Li Shi-Chun[†] Qin Yu-Li Hu Xiang-Long Zhao Jing
Song Yue-Hui Hua Deng-Xin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an 710048, China)

(Received 14 August 2017; revised manuscript received 7 October 2017)

Abstract

Rotational Raman temperature lidar for absolute measurement is an important method to directly detect the atmospheric temperature profile by using active remote sensing technology. Compared with the rotational Raman temperature relative measurement, the absolute measurement can avoid the systematic error caused by the calibration process, but its high-precision requirements of rotational Raman spectroscopic filter restrict the development of absolute measurement technique for atmosphere temperature. In order to achieve the absolute measurement technique of rotational Raman temperature lidar, the fine resolution of single rotational Raman line and the effective suppression 60–70 dB for the elastic scattering signal are the key factors for directly retrieving the atmospheric temperature by using the relationship between the single rotational Raman line and temperature. Based on the operational principle of grating, a two-stage parallel multi-channel Raman spectroscopic filter with one-order blazed grating and fiber Bragg grating is designed, and the parameters and optical path structure of the core cascade device (micron-level fiber array) are optimized. The optical path of the primary spectroscope is simulated, the wavelength difference between the rotational Raman lines of adjacent even rotational quantum numbers of nitrogen molecule (N_2) gradually decreases from 0.4506 nm to 0.4475 nm. Compared with the average of approximately 0.4494 nm, its floating interval is -0.0012 – $+0.0019$ nm, and the maximum centrifugal distortion of the rotational Raman spectra is approximately 0.0031 nm, which means that the centrifugal distortion ratio is 0.69%. Under the different values of incident angle φ , the diffraction position difference between adjacent rotational Raman lines varies from 124.43 μm to 125.51 μm , with a variation interval of -0.57 – $+0.51$ μm compared with a fixed value of 125 μm . In order to test the matching consistency between rotational Raman spectra and the multi-channel fiber array, and to obtain the out-of-band suppression and channel coefficient of each fiber channel, an experimental system which consists of a first-order blazed grating, a convex lens and a fiber array is set up, and the atmospheric echo signal is simulated by using a broadband light-source and a semiconductor laser (LD). The experimental results show that the channel coefficient of the rotational Raman channels of the primary spectroscope is above 0.75, and the maximum deviation between the measured wavelength of extracted spectrum and the theoretical value is approximately 0.0398 nm, which means the deviation degree is 8.86%. Each channel can provide more than 27 dB effective suppression to elastic scattering signal, and then by combining with the second spectroscope of fiber Bragg grating, the suppression at least is up to 62 dB. Therefore we can fine extract single rotational Raman line of even rotational quantum number.

Keywords: temperature lidar of measurement, rotational Raman spectra, first-order blazed grating, multi-channel fiber array

PACS: 42.68.Wt, 33.20.Fb, 42.79.Dj, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.67.20171834

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61308106, 41627807).

[†] Corresponding author. E-mail: lsczqz@xaut.edu.cn