

文章编号: 0258-7025(2008)12-1986-06

# 纯转动拉曼激光雷达反演低层大气折射率廓线

王敏<sup>1,2</sup> 胡顺星<sup>1</sup> 苏嘉<sup>1,2</sup> 赵培涛<sup>1,2</sup> 汪少林<sup>1,2</sup> 谢军<sup>1</sup> 曹开法<sup>1,2</sup> 方欣<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 大气折射率是影响光电探测领域测量精度的重要因素。为了提高光电测量精度, 提出利用纯转动拉曼激光雷达信号反演低层大气折射率廓线的方法。通过接收  $N_2$  和  $O_2$  的纯转动拉曼回波信号, 由双光栅单色仪分光后获得高低量子信号。根据高低量子信号的比值反演得出大气温度和大气压强廓线, 从而获得大气折射指数垂直分布。通过与折射指数理论模型相比较, 表明纯转动拉曼激光雷达反演对层流折射指数有较高的精度。给出了多组折射指数廓线的反演结果, 得出多天夜晚不同时刻折射指数的特性。结果表明一天中不同时刻折射指数变化较小, 7.5 km 内最大相对误差约为 0.4%; 不同月份之间折射指数波动较为明显, 4.5 km 内相对误差可达 3.5% 左右。

**关键词** 大气光学; 激光雷达; 大气折射指数; 最小二乘法; 大气温度; 大气压强

中图分类号 TN 958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083512.1986

## Measurements of Refractive Profiles Using a Pure Rotational Raman Lidar in the Lower-Atmosphere

Wang Min<sup>1,2</sup> Hu Shunxing<sup>1</sup> Su Jia<sup>1,2</sup> Zhao Peitao<sup>1,2</sup>

Wang Shaolin<sup>1,2</sup> Xie Jun<sup>1</sup> Cao Kaifa<sup>1,2</sup> Fang Xin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Centre of Atmospheric Optics, Anhui Institutes of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** Atmospheric refractivity has a significant impact on measurement precision in the field of photoelectric detecting. To improve the detecting accuracy of photoelectric fields, a pure rotational Raman lidar technique for detecting tropospheric refractive index is discussed in detail. Higher-lower isolating two portions of the pure rotational Raman backscattering spectrum of  $N_2$  and  $O_2$  are obtained by separating from other singles using the double grating monochromator. By calculating ratio of the two return signals, atmospheric temperature and pressure profiles are derived, as well as the measurements of air refractivity. Compared with the theoretical model, the accuracy for detecting atmospheric refractivity using the pure rotational Raman lidar is convincingly illustrated by the results of laboratory experiments. Several atmospheric refractive profiles are shown and the characteristic of refractivity is acquired at different times and on different days. The results show that the changes of the refractivity are little during the night and reach only 0.4% below 7.5 km. The fluctuation of the refractivity between different days is obvious and reaches 3.5% below 4.5 km.

**Key words** atmospheric optics; lidar; atmospheric refractivity; the least square method; atmospheric temperature; atmospheric pressure

## 1 引言

近地层大气热量交换频繁, 对流现象比较明显,

这种动态变化导致对流层大气的非线性分布和各向异性, 进而引起大气折射率的随机起伏<sup>[1,2]</sup>。光波

收稿日期: 2008-01-21; 收到修改稿日期: 2008-04-24

基金项目: 国家 863 计划(2005AA825050)资助项目。

作者简介: 王敏(1981—), 女, 吉林人, 硕士研究生, 目前主要从事激光雷达大气探测和数据处理的研究。

E-mail: wm810320@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 胡顺星(1966—), 男, 浙江人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事激光雷达研制和激光雷达探测大气参数的研究。

E-mail sxhu@aiofm.ac.cn

在这种介质中传输时将产生相位延迟、光波抖动、闪烁等效应<sup>[3,4]</sup>。L. J. Nugent 等<sup>[5~8]</sup>研究表明,探测光经卫星表面反射,到达地面接收系统的反射光因偏折引起传播方向的改变,导致相位延迟不同,这对卫星遥感产生严重影响。同时,折射率的起伏一定程度上限制了天文观测、目标定位、激光测距等技术的发展,至今尚未得到很好解决。因此,有效确知折射率的垂直分布在高精度遥感探测中是必要的。

根据探测光波长的不同,折射率测量技术大致分为光波波段测量和无线电波、近红外波段测量两种方法。考虑到探测波长与温度、湿度和压强的相关程度不同,研究的侧重点有所差异,建立的理论模型也有较大差别<sup>[9,10]</sup>。目前,无线电波、近红外波段测量技术较为成熟,国外已用于海面空气层折射率特性的研究,并在无线通信、光电检测领域发挥一定作用<sup>[2,11]</sup>。然而,无线电波、近红外波段探测方法中水汽对折射指数影响较大,是不可忽略的,相对来说增加了测量难度。同时当探测波长处于水汽和氧的谐振频率时存在较大的误差,选取适合的波长也是必须考虑的。相对于无线电波、近红外波段探测方法来说,光波波段探测方法具有实时性好、时空分辨率高、应用领域广、发展前景好、可重复使用等突出优点,这是无线电波、近红外波段探测方法无法比拟的。然而,光波波段测量方法的技术含量较高,传统瑞利雷达信号在反演对流层大气温度时具有一定的局限性<sup>[12]</sup>,因此,关于光波波段折射率测量方面的报道很少。近年来,国内纯转动拉曼激光雷达技术逐渐发展起来,利用  $N_2$  和  $O_2$  的纯转动拉曼回波信号反演温度时可不受气溶胶粒子和卷云的影响,提高了测量精度。在此技术基础上,本文提出了以纯转动拉曼激光雷达信号反演对流层大气折射率垂直廓线的方法,实现应用光波探测方法完成大气折射指数的实时、连续、大范围测量。

## 2 测量原理与影响因子相关性分析

### 2.1 测量原理

气象探空中常用折射指数  $N$  代替折射率  $n$  成为描述大气特性的常用物理量,其转化关系为

$$N = (n - 1) \times 10^6, \quad (1)$$

任意气象条件下折射指数表示为<sup>[10]</sup>

$$N(\lambda) = \left[ 2.8438 \times 10^{-3} \times N_0(\lambda) \frac{P}{T} - 0.1127 \times \frac{e}{T} \right], \quad (2)$$

$$N_0(\lambda) = 272.5794 + 1.5832 \times \lambda_0^{-2} + 0.015 \times \lambda_0^{-4}, \quad (3)$$

(2),(3) 式中  $N_0(\lambda)$  为由 Cauchy 模型给出的标准大气条件下的折射指数,  $\lambda_0$  为真空中波长,  $T$  为温度,  $P$  为压力,  $e$  为水汽压强。实验中,探测光波长为 532 nm, 代入(2)式可近似表示为

$$N(\lambda) = 0.7916 \times \frac{P}{T} - 0.1127 \times \frac{e}{T}, \quad (4)$$

在光波波段测量大气折射指数时可忽略湿度的影响<sup>[9,10]</sup>, 大气折射指数  $N(\lambda)$  简化为

$$N(\lambda) = 0.7916 \times \frac{P}{T}, \quad (5)$$

若知道温度、气压随高度的分布,就可反演大气折射指数垂直廓线。

对流层温度由纯转动拉曼激光雷达测得,其测温原理为大气中  $N_2$  和  $O_2$  的转动拉曼谱线强度是温度  $T$  的函数<sup>[13]</sup>, 较低量子阶数的拉曼谱线强度随温度升高而降低, 较高量子阶数的拉曼谱线强度随温度升高而升高。高低量子回波信号以光子数  $N_H$ ,  $N_L$  记录, 函数关系近似表示为<sup>[12,14,15]</sup>

$$\frac{N_L}{N_H} \cong \exp[A/T(z) + B], \quad (6)$$

(6)式可转化为

$$T(z) = \frac{A}{\ln(N_L/N_H) - B}, \quad (7)$$

式中  $A, B$  为系统参数, 可根据高低量子回波信号比值与探空气球所测温度廓线对比得出。

压强是温度的函数, 理论模型可表示为

$$P(T) = P_0 \left( 1 - \frac{r-1}{r} \times \frac{\mu g h}{RT} \right)^{\frac{r}{r-1}}, \quad (8)$$

式中  $P_0 = 1.01325 \times 10^5$  Pa 为标准大气压强,  $r$  为大气比热比;  $\mu = 28.96 \times 10^{-3}$  kg 为大气平均摩尔质量,  $g = 9.80$  m/s<sup>2</sup> 为重力加速度,  $h$  为高度(m);  $R = 8.314$  J/(mol · K) 为玻尔兹曼常数。

实际大气中  $r$  的取值在 1~1.4 之间, 文献[16]给出在对流层中  $r = 1.235$  时, 理论公式所得结果与实测值误差较小, 在 5 km 高度以内压强相对误差小于 0.12%, 在 10 km 高度内小于 0.2%。选取此值, 通过高度方向等点插值并结合雷达探测的温度廓线得出压强的垂直分布。

纯转动拉曼激光雷达反演折射指数时, 根据实测温度廓线  $T(z)$  与其反演的压强廓线  $P(T)$  代入(5)式可得折射指数的垂直分布。

### 2.2 影响因子相关性分析

折射指数是由温度、压强、水汽和其他气体成分

决定的,在推导公式(5)时,忽略了水汽和其他气体成分的影响,即认为大气是干洁的。由于目前实验系统所能达到的测量精度有限,其他气体成分的变化导致折射指数在不同时间、地点的测量误差为 $10^{-9}$ 量级,在实际测量中意义不大。因此主要考虑温度、压强、水汽对折射指数的影响。图1(a)中,在标准大气状况下,水汽压强变化量在 $200\sim 2000$  Pa之间时折射指数相对变化范围为 $-0.028\%\sim -0.28\%$ 。相对海面情况来说陆地水汽压强较小,变化范围有限,引起的折射指数变化很小,可以忽略其影响。从图1(b),(c)可以看出,温度、压强对折射指数的影响占主导作用。在标准大气状况下温度升高1 K折射指数变化 $-1.07$ ;压强降低10 kPa时折射指数变化 $-29$ 。实验过程中,主要考虑温度、压强对折射指数产生的影响。

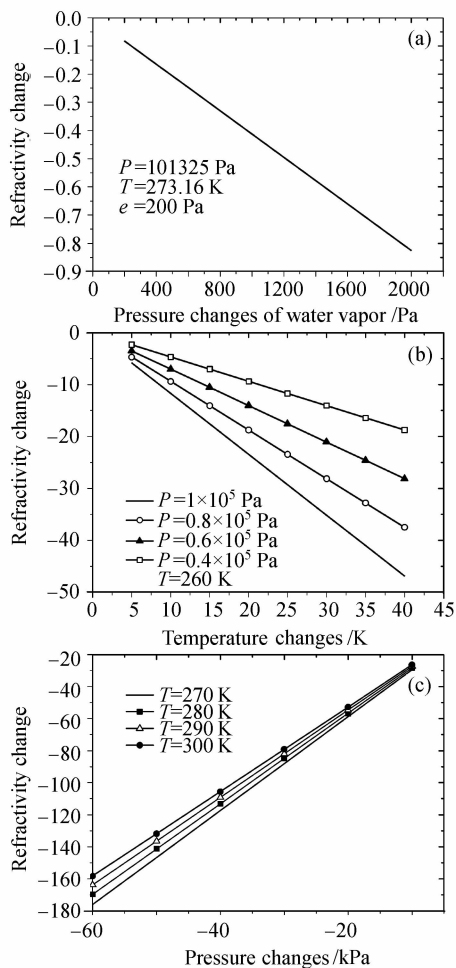


图1 水汽压强变化量(a),温度变化量(b)和压强变化量(c)与折射指数变化量的关系曲线

Fig.1 Profiles for pressure changes of water vapor (a), temperature changes (b), and pressure changes (c) versus refractivity changes

### 3 数据处理

#### 3.1 拟合参数 A, B

纯转动拉曼激光雷达系统采集数据的空间分辨率为30 m,采样点数为512点,采样脉冲数为20000次。目前,无线电探空仪在众多测温仪器中具有较高探测精度,实验中利用同天相近时间段探空仪温度廓线与纯转动拉曼激光雷达高低量子回波信号,通过拟合的方法确定系统参数A,B。探空仪相邻数据高度间隔不断变化,与雷达数据间隔不能很好地对应起来。考虑到探空仪温度廓线在 $1\sim 2$  km处存在逆温层,采用分段拟合的方法,在1 km以下和2 km以上采用四次多项式拟合, $1\sim 2$  km之间采用三次多项式拟合。根据三种拟合函数在相应高度内30 m等点插值后建立起探空仪与雷达数据的等点对应关系,图2显示了探空仪测温廓线与拟合结果。

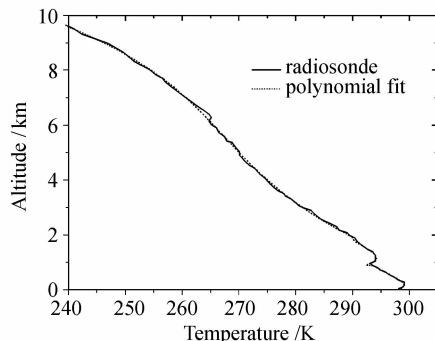


图2 探空仪测温廓线与拟合结果

Fig.2 Temperature profiles of radiosonde and the fitted results

为了减小激光雷达回波信号的起伏,首先采用滑动平滑的方法去除原始信号的噪声,然后对(7)式线性化,应用最小二乘法对同天多组数据进行拟合,得 $A = 1035.4495, B = -2.6715$ 。

#### 3.2 雷达反演温度、压强、折射指数结果与对比分析

确定参数A,B后,将拟合信号反代入(7)式,测得纯转动拉曼雷达温度廓线如图3所示。图中波动较大的为雷达原始信号测温廓线,○表示去噪后结果,▲为探空仪反演结果。从图中可以看出,原始信号测温廓线在2 km以下存在明显的突起。这是由于纯转动拉曼激光雷达分光系统在加工、安装过程中不可避免地存在误差,导致纯转动拉曼信号中混入了少量的弹性散射信号,实验采用滤波法消除弹性散射信号的影响。最后将原始温度廓线整体平滑去噪得到大气真实温度。

根据激光雷达与探空仪实测温度廓线,反演得出的大气压强、折射指数垂直分布如图4(a),(b)所

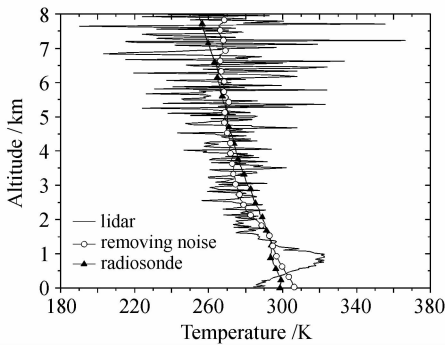


图 3 纯转动拉曼激光雷达测温廓线

Fig. 3 Temperature profiles of pure rotational Raman lidar

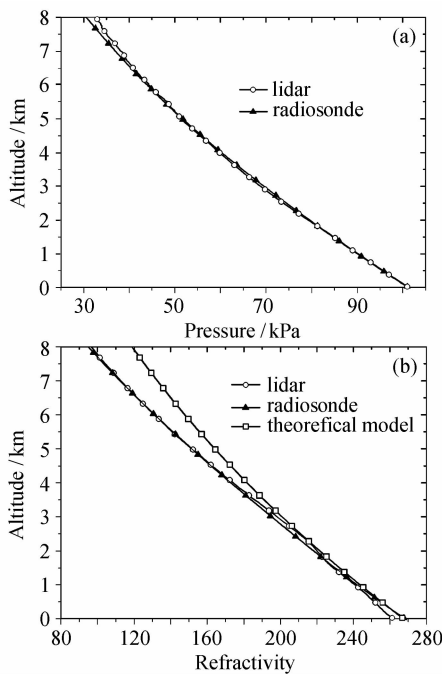


图 4 激光雷达与探空仪反演的压强廓线(a)和折射指数廓线(b)

Fig. 4 Pressure profiles (a) and refractivity profiles (b) of lidar and radiosonde

示。从图 4(a)可以看出,激光雷达与探空仪反演的压强廓线基本一致。6.5 km 以上高度,雷达回波信号信噪比降低,使反演结果与真实值有所偏差。

图 4(b)中□表示大气折射指数理论模型模拟结果。可以看出,纯转动拉曼雷达反演的折射指数垂直廓线与探空仪反演结果较为吻合,8 km 处两者最大偏差约为-1.5(相对误差为1.5%);与折射指数理论模型相比较有所差异,8 km 处相对误差达到-23.4%。这是由于理论模型建立对流层气压和温度模型时,将温度随高度的变化近似为-6.5 °C/km,从而造成气压与温度在垂直分布的误差,并把误差引入折射指数中去。

可见,拟合后纯转动拉曼激光雷达可精确反演对流层大气折射指数的垂直分布。

### 4 实验结果

图 5(a)显示了纯转动拉曼激光雷达于合肥市 2007 年 6 月 6 日晚 20000 次回波信号积分后测得的不同时刻大气温度廓线,(b),(c)分别为反演的大气压强、折射指数垂直廓线。从图中可以看出不同时刻温度廓线波动明显,压强和折射指数廓线有所变化但趋势基本一致。在测量时间段内,地面温度相对变化了 0.4%,随高度增加起伏量加大,最大可达 2.1%;在 7.5 km 高度范围内,压强、折射指数最大相对变化量分别为 3.4% 和 0.4%。

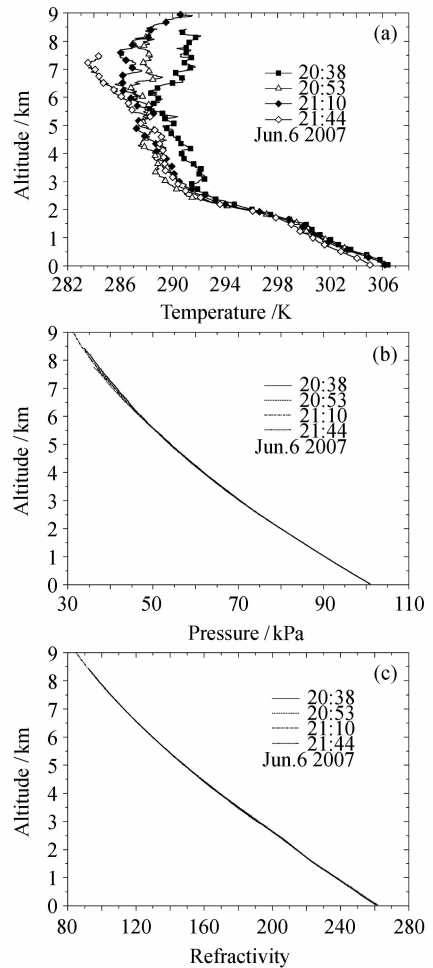


图 5 激光雷达不同时刻的测温廓线(a),压强廓线(b)和折射指数廓线(c)

Fig. 5 Temperature profiles (a), pressure profiles (b) and refractivity profiles (c) of lidar at different time

图 6(a)~(c)分别为纯转动拉曼激光雷达于合肥市测量多天夜晚大气温度、压强、折射指数廓线分布。图 6(a)中,4 月 18 日与 5 月 16 日温度廓线在

1.5 km处有明显的突起,存在小的逆温结构。图6(b)中,四天的压强廓线随高度上升的趋势较为一致,在2 km内压强变化1%左右,在4.5 km内变化2.6%。从图6(c)可以看出,在4.5 km高度范围内,两个月份折射指数变化明显,最大变化量为7.2(相对误差为3.5%);相同月份内,折射指数差别较小。4.5 km以上高度,两个月份折射指数廓线趋于一致。这是因为中高层以上气体含量逐渐稳定,温度、压强等影响因子的起伏量减小,使得折射指数垂直分布较为接近。

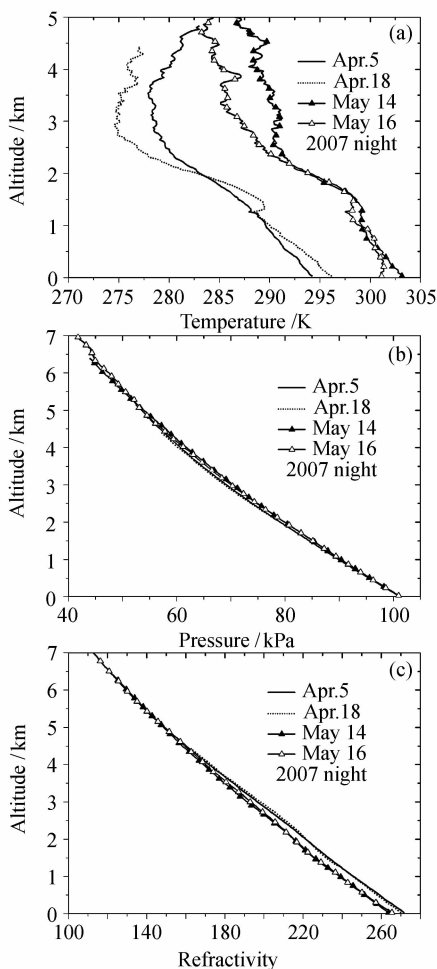


图6 激光雷达多天测温廓线(a),压强廓线(b)和折射指数廓线(c)

Fig. 6 Temperature profiles (a), pressure profiles (b) and refractivity profiles (c) of lidar on some days

## 5 结论

通过分析光波波段大气折射指数与温度、压强、湿度的相互关系,表明陆地上大气折射指数随温度、压强变化较大,受湿度影响较小。根据折射指数与大气温度和大气压强的依赖关系,提出了利用纯转

动拉曼激光雷达反演对流层底部折射指数的理论。实验结果表明,纯转动拉曼激光雷达实测的温度廓线与探空仪有较好的一致性。通过比较纯转动拉曼激光雷达、探空仪、折射指数理论模型的折射指数廓线,可以看出纯转动拉曼激光雷达与探空仪反演结果较吻合,与理论模型有较大差异。利用纯转动拉曼激光雷达系统反演了同天不同时刻和多天同时刻的折射指数廓线。可以看出,同一天折射指数变化较小;不同月份之间近地面折射指数变化明显。利用纯转动拉曼激光雷达信号反演大气折射指数廓线的方法可有效确知光波波段折射指数的垂直分布,为天文观测、目标定位、激光测距等精密测量技术提供了数据支持。纯转动拉曼回波信号相对振动拉曼信号强度较小,相同距离处信噪比较低,因而探测距离受到限制。

## 参考文献

- 1 Stephen Doss-Hammel, Dimitri Tsintikidis, Kenneth Davidson *et al.*. The refractive propagation factor and the rough evaporation duct experiment [C]. *SPIE*, 2003, **4884**:149~159
- 2 J. Förster, J. Riechen, G. Biegel *et al.*. Refractivity variability of the marine boundary layer and its impact on electromagnetic wave propagation [C]. *SPIE*, 2004, **5572**:281~291
- 3 Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming *et al.*. Profile and character of atmospheric temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5):592~596  
孙刚,翁宁泉,肖黎明等. 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5):592~596
- 4 Dai Fushan, Li Youkuan. Estimation of the optical turbulence in the marine atmospheric surface layer based on meteorological data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):191~196  
戴福山,李有宽. 利用气象要素估算海洋大气近地层光学湍流[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):191~196
- 5 L. J. Nugent, R. J. Condon. Velocity aberration and atmospheric refraction in satellite laser communication experiments [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(11):1832~1837
- 6 Wade W. Brown, Michael C. Roggemann, Timothy J. Schulz *et al.*. Measurement and data-processing approach for estimating the spatial statistics of turbulence-induced index of refraction fluctuations in the upper atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(12):1863~1871
- 7 Yan Haojian. Progresses in research of atmospheric refraction [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2006, **28**(1):48~58  
严豪健. 大气折射的研究进展[J]. *世界科技研究与发展*, 2006, **28**(1):48~58
- 8 Ji Xiaoling, Chen Senhui, Li Xiaoqing. Polarization properties of partially coherent Hermite-Gaussian beams in atmospheric turbulence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):67~72  
季小玲,陈森会,李晓庆. 部分相干电磁厄米-高斯光束通过湍流大气传输的偏振特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):67~72
- 9 Gerard Kunz, Eric Heemskerck, Lex van Eijk. Comparison of atmospheric refraction at radar and optical wavelengths [C]. *SPIE*, 2005, **5981**:1~12
- 10 Song Zhengfang. *Applied Atmospheric Optics* [M]. 1st ed.. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 1~2  
宋正方. *应用大气光学基础*[M]. 第一版. 北京: 气象出版社,

1990. 1~2
- 11 J. Förster, J. Riechen. Measurements of refractive variability in the marine boundary layer in comparison with mesoscale meteorological model predictions [C]. *SPIE*, 2006, **6364**:1~15
- 12 Yu. F. Arshimov, S. M. Bobrovnikov, V. E. Zuev *et al.*. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(19):2984~2990
- 13 Liu Yuli, Zhang Yinchao, Su Jia *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
- 14 D. Nedeljkovic, A. Hauchecorne, M.-L. Chanin. Rotational Raman lidar to measure the atmospheric temperature from the ground to 30 km [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1993, **31**(1):90~101
- 15 Su Jia, Zhang Yinchao, Zhao Yuefeng *et al.*. Optical design of double grating monochromator of a pure rotational Raman-lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):92~96  
苏 嘉,张寅超,赵曰峰 等. 双光栅纯转动拉曼测温激光雷达单色仪的光学设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):92~96
- 16 Liang Yeguang. Accurate calculation for pressure [J]. *Guangxi Wuli*, 2000, **21**(2):7~8  
梁业广. 大气压强的精密计算[J]. *广西物理*, 2000, **21**(2):7~8

## 《中国激光》“全固态激光技术”专题征稿启事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,随着全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》计划于2009年6月正刊上推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光二极管抽运固体激光器
- 光纤激光器
- 半导体激光器及相关技术
- 晶体材料及相关技术
- 光学薄膜技术
- 其他

截稿日期:2009年3月31日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见中国光学期刊网:[www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请发邮件至zhgjg@mail.shcnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部