

文章编号: 0258-7025(2004)07-0851-06

# 瑞利-拉曼散射激光雷达探测大气温度分布

吴永华, 胡欢陵, 胡顺星, 周 军, 岳古明, 戚福弟, 李 琛

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 介绍一台用于夜晚探测大气温度分布的 L625 瑞利-拉曼(Rayleigh-Raman)散射激光雷达。采用 Nd:YAG 激光器三倍频输出 355 nm 作为发射激光, 利用弱光子计数技术检测大气中分子的瑞利散射和 N<sub>2</sub> 分子振动拉曼散射回波, 分析得到了平流层和对流层中上部大气温度的垂直分布廓线。其观测结果分别与 HALOE/UARS 卫星和无线电气象探空仪结果进行了对比分析。其中, 激光雷达观测的平流层温度与 HALOE 卫星的结果对比表明, 它们在高度 25~65 km 内显示出较好的一致性, 20 个夜晚的平均温度差别基本上小于 2 K。激光雷达与无线电气象探空仪探测的对流层温度在高度为 5~18 km 内反映了较为一致的分布趋势, 15 个夜晚的平均温度差别在 6~16.5 km 高度内小于 3 K。这些结果表明, L625 瑞利-拉曼散射激光雷达观测数据可靠, 可用于大气温度分布的常规观测和分析研究。

**关键词** 激光技术; 大气温度; 激光雷达; 瑞利散射; 拉曼散射

**中图分类号** TN 958.98 **文献标识码** A

## Rayleigh-Raman Scattering Lidar for Atmospheric Temperature Profiles Measurements

WU Yong-hua, HU Huan-ling, HU Shun-xing,  
ZHOU Jun, YUE Gu-ming, QI Fu-di, LI Chen

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** A Rayleigh-Raman scattering lidar has been developed for measuring atmospheric temperature profiles at night. The triple frequency of Nd:YAG laser at 355-nm is operated as the transmitting laser beam. Molecular Rayleigh and nitrogen vibration Raman scattering returns are detected by the photon counting technique. Then, vertical profiles of atmospheric temperature are derived in the stratosphere and mid-upper troposphere. Comparison experiments are conducted among L625 lidar, HALOE/UARS satellite and radiosonde measurements. Stratospheric temperature profiles obtained by L625 Rayleigh lidar agree well with HALOE results over 25 km to 65 km altitudes, their mean differences of 20 nights are basically less than 2 K. The profiles of tropospheric temperature measured by L625 Raman lidar show the good agreements with radiosonde results over the altitudes of 5 km to 18 km, their bias of mean temperature over 15 nights are usually less than 3 K from 6 km to 16.5 km altitude. The results above indicate that measurements of L625 Rayleigh-Raman are reliable, and can be employed for the routine observations and analysis of atmospheric temperature.

**Key words** laser technique; atmospheric temperature; lidar; Rayleigh scattering; Raman scattering

### 1 引 言

随着激光和光电子等技术的发展, 激光雷达在

大气遥感中应用越来越受到人们的重视。与其他遥测手段相比, 激光雷达具有较高的时空分辨率和大的探测范围, 且能够进行单点长期连续的观测<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2003-07-14; 收到修改稿日期: 2003-12-02

基金项目: 国家 863 计划激光技术领域资助项目。

作者简介: 吴永华(1972—), 男, 河南驻马店人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所副研究员, 博士, 主要从事激光雷达遥感大气成分和参数方面的研究工作。E-mail: wyh@aiofm.ac.cn

大气温度是描述大气热力和动力结构、天气分析与预报及气候环境研究中的基本气象参数之一。长期观测资料分析表明,北半球中纬度对流层上部至平流层和中间层在变冷<sup>[2,3]</sup>,因此,对大气温度分布的有效监测已显得十分重要。目前,气象部门通常使用无线电气象探空仪测量温度分布,平流层至中间层温度的探测一般使用火箭探空和星载红外或微波辐射计,但是火箭探空费用昂贵,卫星遥感的垂直距离分辨率较低,因此,激光雷达观测大气温度已在许多大气研究项目中受到重视<sup>[4,5]</sup>。近年来,欧、美、日等在南北极地区建立了大气温度探测激光雷达站,而我国对中层大气温度的有效观测手段较少。本文介绍了一台探测温度的瑞利-拉曼散射激光雷达系统,并对其测量结果与 HALOE 卫星及无线电气象探空仪测量结果进行了对比分析。

## 2 瑞利-拉曼散射激光雷达测量原理及 L625 激光雷达系统

### 2.1 探测大气温度原理

瑞利散射激光雷达适合于探测平流层中上部以上高度的大气温度分布<sup>[6]</sup>。其主要原理是:认为平流层中上部以上的大气回波主要是分子瑞利散射信号,忽略气溶胶粒子的散射信号;假设已知某一高度上大气密度,可求得大气密度轮廓线;结合理想气体状态方程和大气静力学方程求得大气温度。大气密度可由瑞利激光雷达的回波信号表示为

$$N(z) = \frac{P(z) \times z^2}{P(z_0) \times z_0^2} \times N(z_0) \times Q^2(z, z_0) \quad (1)$$

其中,  $N(z)$  和  $N(z_0)$  分别为  $z$  和  $z_0$  高度上的大气密度,  $z_0$  为参考密度高度;  $P(z)$  和  $P(z_0)$  分别对应  $z$  与  $z_0$  高度上的大气回波光子数;  $Q^2(z, z_0)$  为高度  $z$  至  $z_0$  的大气双程透过率。

由于  $N_2$  分子振动拉曼散射回波不含气溶胶的后向散射项,且  $N_2$  分子的混合比在 0~100 km 高空中可视为常数,故通过扣除大气透过率的影响,可以得到大气密度。记  $\lambda_0$  为发射激光波长,  $\lambda_{N_2}$  为  $N_2$  振动拉曼散射频移波长,大气密度可由  $N_2$  拉曼散射回波信号表示为

$$N(z) = \frac{P(\lambda_{N_2}, z) \times z^2}{P(\lambda_{N_2}, z_0) \times z_0^2} N(z_0) Q_m(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z, z_0) \times Q_p(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z, z_0) Q_0(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z, z_0) \quad (2)$$

其中,  $P(\lambda_{N_2}, z)$  为  $N_2$  分子振动拉曼散射回波强度;  $Q_m(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z, z_0)$ ,  $Q_p(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z, z_0)$  和  $Q_0(\lambda_{N_2},$

$\lambda_0, z, z_0)$  分别对应分子、气溶胶和臭氧对  $N_2$  拉曼散射回波的大气透过率。由于对流层中上部大气透过率较小,故该方法适合探测对流层中上部大气温度的分布<sup>[7]</sup>。

结合理想气体状态方程和大气层静力学方程,由大气密度可推知大气温度的表达式<sup>[6]</sup>

$$T(z) = \frac{T(z_c)N(z_c) + \frac{M}{R} \int_z^{z_c} g(z')N(z')dz'}{N(z)} \quad (3)$$

式中  $T(z)$  与  $T(z_c)$  分别为  $z$  和  $z_c$  高度上的大气温度,  $z_c$  为参考温度或参考压力的高度;  $M$  为空气分子的摩尔质量;  $R$  为气体普适常数;  $g(z)$  为重力加速度。

由方程(1)~(3)知,探测温度的精度主要与回波信号的强弱、大气透过率、大气的相对密度及参考值的不确定性等有关,而与大气的绝对密度无关。

### 2.2 L625 瑞利-拉曼散射激光雷达系统

L625 激光雷达是一台多功能大气探测激光系统,具备分时探测平流层和对流层气溶胶、臭氧、温度和对流层中低层水气等高度分布的功能<sup>[8]</sup>。这里着重介绍关于温度探测的瑞利-拉曼散射激光雷达系统(图 1),它由激光发射、信号接收和数据采集及控制等部分组成。发射光源使用 Nd:YAG 激光器三倍频输出 355 nm 波长激光,重复频率为 10 Hz,单脉冲能量为 60~70 mJ,光束发散角小于 1 mrad。在其垂直发射光路旁设置 CCD 监视发射光束方向及其调整。30 km 以上高空分子的瑞利散射回波用来探测平流层温度廓线,对流层中  $N_2$  分子振动拉曼散射回波(波长 386.7 nm)用于测量对流层温度分布。信号接收单元由接收望远镜、视场光阑、机械光开关、中继光路、分光片、窄带滤光片及光电探测器等组成。直径 62.5 cm 的卡塞格伦型接收望远镜用于收集大气后向散射信号,接收视场为 2 mrad。紧靠视场光阑放置了机械光开关,其转速为 400~500 Hz,用来阻挡进行高层弱信号测量时低层大气的强回波,防止其对探测器带来的饱和效应和信号诱导噪声。接收中继光路中使用了石英光纤导光,它的芯径为 2 mm,数值孔径为 0.32,对于上述探测波长每米光学透过率均大于 95%,满足了接收视场和多波长回波探测的要求。该激光雷达共有三个独立的光电信号接收通道(即光电探测器及信号采集单元),分别用于接收弹性散射(瑞利+米氏)和拉曼散射( $N_2$ -拉曼+ $H_2O$ -拉曼)回波。致冷型光电倍增管(THORN EMI, 9214QB 和 9817B 型)用作探测

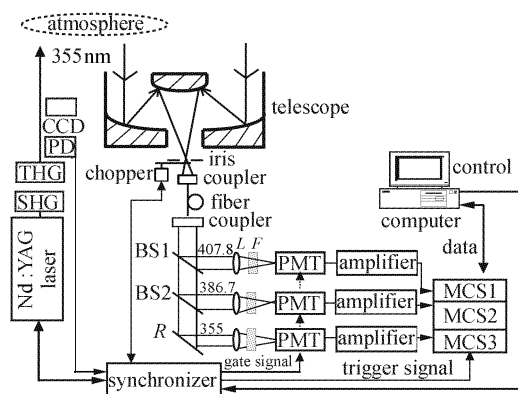


图 1 L625 瑞利-拉曼散射激光雷达系统框图

SHG, THG: 二次、三次谐波发生器; PD: 光电二极管; L: 透镜;  
F: 滤光片; BS: 分束器; R: 反射镜

Fig. 1 Schematic diagram of L625 Rayleigh-Raman scattering lidar

SHG, THG: harmonic generator; PD: photodiode; L: lens;  
F: filter; BS: beam-splitter; R: reflecting mirror

器,在它的前面均放置窄带干涉滤光片(Barr Associate)用于抑制背景光噪声。355 nm 弹性散射通道中滤光片带宽为 1 nm,透过率为 40%。考虑到  $N_2$  分子拉曼散射回波比气溶胶及分子的弹性散射回波小 3~4 个量级,故  $N_2$ -拉曼散射通道中窄带干涉滤光片在 355 nm 处的截止比优于  $10^{12}$ ,这样会大大抑制弹性散射回波对拉曼散射回波接收的干扰。数据采集和控制系统主要包括前置放大器、光子计数器、同步控制器及计算机等。探测器的输出首先经放大器放大,然后由多道光子计数器检测信号,并将结果传给计算机实时显示和贮存。前置放大器 VT120B(EG&G)的放大倍率为 200,响应带宽为 10~250 MHz。多道光子计数器(EG&G, T914P)最大计数率为 150 MHz,具有累加、平均、甄别和存贮功能,计数死时间为几个纳秒。整个激光雷达系统的工作分为外触发和内触发两种方式。内触发方式为激光器内触发工作,当发射光路旁的光电二极管(PD)监测到激光时,会产生同步信号给同步控制器,由同步控制器控制信号探测器单元同步工作,而此时机械光开关不工作;该方式在接收  $N_2$ -拉曼散射回波时使用。外触发方式为主控计算机控制激光器和光开关工作,当发射光路旁的光电二极管监测到激光发射时,会触发同步控制器,用来控制机械光开关、探测器和信号采集单元同步工作;该方式在接收瑞利散射信号时使用。同步控制器还可以控制采集信号的开门高度和机械光开关的开门高度等。

L625 瑞利-拉曼散射激光雷达在合肥西郊无云夜晚进行观测。为提高回波信噪比,累积测量对应的激光脉冲数为 30000~40000。在数据处理中,首先进行多组回波信号的累加并计算出背景噪声;对信号进行移动平滑平均;然后计算大气透过率及大气密度,参考密度和温度取自 CIRA 86 北纬 30°月平均值;最后根据方程(3)计算大气温度。为了验证观测结果的可靠性,选择 HALOE/UARS 卫星在合肥临近地区及相邻天的温度观测作对比分析。HALOE 在日出和日落时刻测量,35~85 km 范围内测量温度的精度为 2~5 K,在平流层顶附近其温度结果偏低 3~5 K<sup>[9]</sup>。考虑到平流层的相对稳定性及 HALOE 测量特点,选取的 HALOE 测量数据与激光雷达观测点纬度差小于 5°,经度差小于 15°和时间差小于 5 天。同时,用 GZZ59 型无线电气象探空测量,并与用  $N_2$ -拉曼散射回波得到的对流层温度分布进行了对比分析。

### 3 测量结果和讨论

#### 3.1 平流层温度分布

图 2 给出 L625 瑞利散射激光雷达和 HALOE 卫星及无线电探空仪得到的温度分布。作为参考,同时给出了 CIRA86 模式在北纬 30°的月平均资料。图 2(a)给出了 2001 年 4 月 12 日晚合肥地区平流层温度廓线,图中短横线标出了激光雷达测量结果的统计误差,它在 50 km 处为 1.89 K,在 60 km 处统计误差为 6.8 K。可以看出,在 25~65 km 范围内激光雷达与 HALOE 的结果反映了较为一致的温度分布,二者的相对差别小于 3.6 K;激光雷达低层的温度与无线电探空仪的结果也比较一致;但在平流层顶附近激光雷达的测量值与 CIRA86 模式值存在较大差异。2000 年 11 月 2 日晚的观测结果如图 2(b)所示。激光雷达与 HALOE 测温结果在 22~68 km 高度范围内显示出较好的一致性;在平流层低层激光雷达与无线电探空仪的结果也比较符合。

2000 年 3 月~2002 年 8 月激光雷达与 HALOE 卫星共有 20 天可供对比资料。图 3(a)中实线给出激光雷达的平均温度廓线,短横线标出其  $1\sigma$  标准偏差;虚线对应 HALOE 测量的平均温度。二者在高度 25~64 km 范围内吻合较好。图 3(b)给出了它们的相对差别,它基本上小于 2 K,在 60 km 以上高度差别稍大。

上述分析表明,L625 瑞利散射激光雷达与

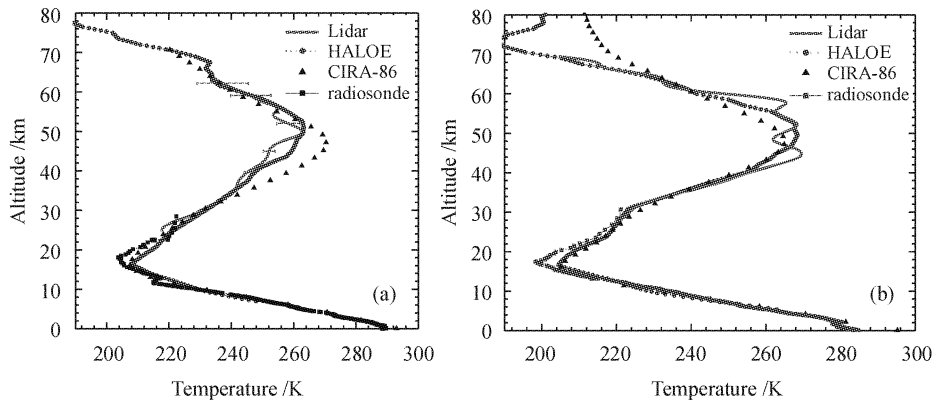


图 2 L625 瑞利散射激光雷达和 HALOE 及无线电气象探空测量的温度分布

Fig. 2 Atmospheric temperature distributions measured by L625 Rayleigh lidar, HALOE and radiosonde

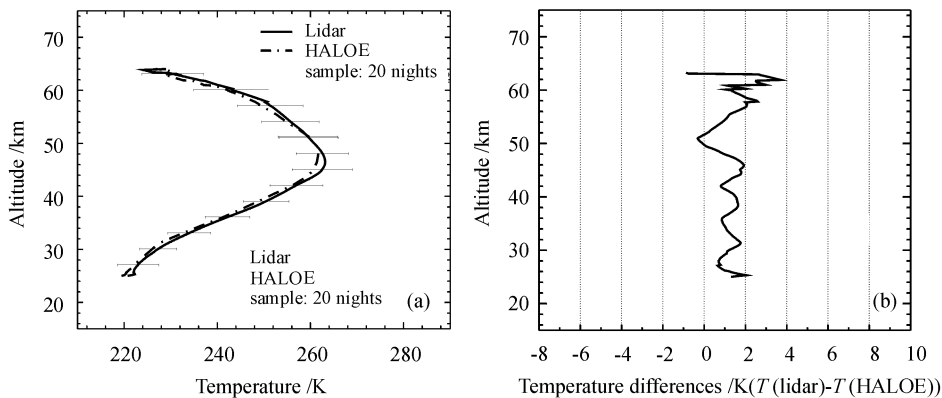


图 3 L625 瑞利散射激光雷达与 HALOE 观测的平流层平均温度廓线(a)及其差别(b)

Fig. 3 (a) Mean distributions of stratospheric temperature obtained by L625 lidar and HALOE, (b) their differences

HALOE 观测平流层温度轮廓线具有较好的一致性,进一步证实了激光雷达观测在卫星数据的有效性方面具有重要意义。

### 3.2 对流层温度分布

2001 年 9 月 13 日晚 L625 拉曼散射激光雷达与无线电气象探空仪进行了对比观测。气象探空仪随气球飞行时间约 40~50 min,近地面风向为北偏东(NE),风速不大,气球飞行最大高度为 19.1 km;对流层中上部测量的空间分辨率在 100~300 m 之间。图 4 给出了二者测量得到的对流层温度分布及其相对差别。其中,图 4(a)中短横线标出了激光雷达测量结果的统计误差范围。可以看出,拉曼散射激光雷达与无线电探空仪测量的温度分布表现了较好的一致性。图 4(b)所示二者的相对差别在高度 6~16 km 内基本上小于 3 K,大部分高度上小于 2 K。其中,6 km 以下相对偏差较大,这很可能受大气透过率的影响。尤其是气溶胶的影响,它在对流层中下部含量较多,其光学性质较为复杂,因此比较

难以准确订正。国外同类激光雷达的结果有时在对流层低层也较探空仪结果明显偏大<sup>[10]</sup>。而 16 km 以上高度的差异可能主要受两方面因素影响,一是无线电探空仪测量的是气球飞行路径高度上短时间内的温度分布;而激光雷达测量的是垂直方向约 40 min 的平均温度分布。也即二者测量的大气层和时间不同很可能会导致观测结果的差异。另一方面可能与激光雷达在较高高度上信噪比下降有关;而对流层顶附近温度最低,且常存在风切变和大风速,可能导致无线电探空仪测温元件测量精度下降<sup>[11]</sup>。

我们进行了 15 个晚上拉曼散射激光雷达与无线电探空仪的测量对比,分别计算它们得到的对流层温度的平均廓线及其差别,如图 5 所示。图 5(a)中短横线标出了激光雷达平均温度的标准偏差。可以看出二者在 5~19 km 高度内反映了较为一致的温度分布趋势,在 16.5 km 以上高度激光雷达的结果偏高。它们平均温度差别如图 5(b)所示,在 6~16.5 km 高度内平均温度差小于 3 K,大部分高度

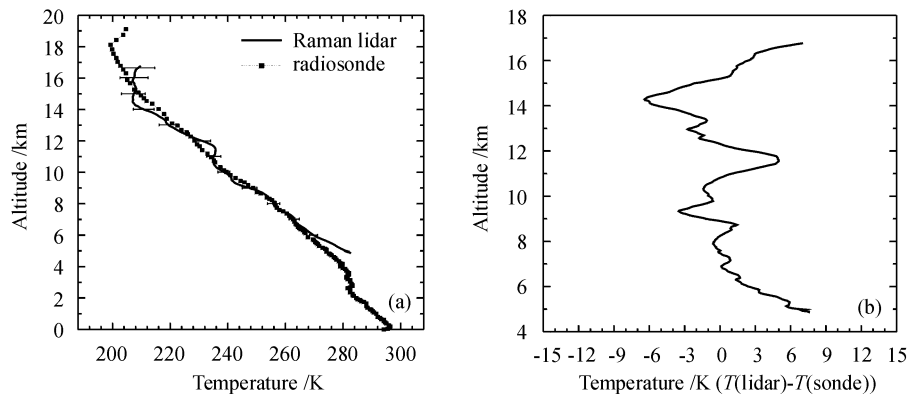


图 4 L625 拉曼散射激光雷达和无线电气象探空仪测量的对流层温度(a)及其差别(b)

Fig. 4 (a) Tropospheric temperature profiles measured by L625 Raman lidar and radiosonde; (b) their differences

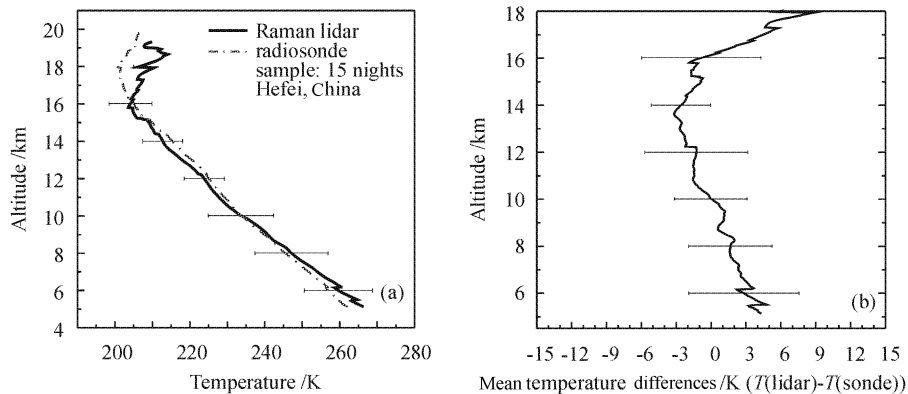


图 5 L625 拉曼散射激光雷达和无线电气象探空仪测量的平均温度廓线(a)及其差别(b)

Fig. 5 (a) Mean distribution of tropospheric temperature obtained by L625 Raman lidar and radiosonde, (b) their differences

上小于 2 K; 高度 16.5 km 以上平均温度差别增大。这表明, L625  $N_2$  分子振动拉曼散射激光雷达可用于测量对流层中上部大气的温度分布, 其测量和数据分析结果是可靠的。

## 4 结 论

报道了一台用于大气温度分布测量的瑞利-拉曼散射激光雷达。并与 HALOE 卫星测量平流层温度进行对比分析, 它们在高度 25~65 km 内表现了较好的一致性, 20 天的平均温度差别基本上小于 2 K。进行了拉曼散射激光雷达与无线电气象探空仪观测对流层温度的数天对比验证, 二者在高度 5~18 km 内反映了较为一致的温度分布趋势, 但在对流层顶附近存在较大差异; 它们的平均温度差别在 6~16.5 km 高度内小于 3 K。对平流层低层 18~25 km 高度内的温度测量, 还需要进一步提高拉曼散射回波的信噪比, 并希望能够联合瑞利散射回

波探测合肥地区 5~65 km 高度范围内大气温度分布。另外, 对于对流层低层温度的测量, 利用  $N_2$  分子或  $O_2$  分子的转动拉曼散射回波能够有效地扣除气溶胶的影响。

致谢 NASA/HALOE 研究组提供了卫星数据; 马成胜高级工程师配合施放了无线电探空仪, 作者在此表示诚挚的感谢。

## 参 考 文 献

- 1 R. M. Measures. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Application [M]. Florida: Krieger Publication Company, 1992. 320~413
- 2 V. Ramaswamy, M. L. Chanin, J. Angell *et al.*. Stratospheric temperature trends; observations and model simulations [J]. *Rev. Geophys.*, 2001, **39**(1):71~122
- 3 James K. Angell. Variations and trends in tropospheric and stratospheric global temperatures 1958-87 [J]. *J. Climate*, 1988, **1**:1296~1313
- 4 U. N. Singh, P. Keckhut, T. J. McGee *et al.*. Stratospheric temperature measurements by two collocated NDSC lidars during UARS validation campaign [J]. *J. Geophys. Res.*,

1996, **101**(D6):10287~10297

5 P. Keckhut, A. Hauchecorne, M. L. Chanin. Mid-latitude long-term variability of the middle atmosphere; trends, cyclic and episodic changes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:18887~18897

6 T. Shibata, M. Kobuchi, M. Maeda. Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with XeF lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(5):685~688

7 K. D. Evans, S. H. Melfi, R. A. Ferrare *et al.*. Upper tropospheric temperature measurements with the use of a Raman lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(12):2594~2607

8 Hu Huanling, Wang Zhiem, Wu Yonghu *et al.*. UV-DIAL measuring stratospheric ozone [J]. *Chinese J. of Atmos. Sci.*, 1998, **22**(5):701~708

胡欢陵,王志恩,吴永华等. 紫外差分吸收激光雷达探测平流层臭氧[J]. *大气科学*, 1998, **22**(5):701~708

9 M. E. Hervig, J. M. Russell III, L. L. Gordley *et al.*. Validation of temperature measurements from the Halogen occultation experiments [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(D6):10277~10285

10 T. Shibata, T. Sakai, M. Hayashi *et al.*. Raman lidar observations; simultaneous measurements of water vapor, temperature and aerosol vertical profiles [J]. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1996, **48**:1127~1135

11 Zhang Aichen Ed. *Modern Meteorological Observations* [M]. Beijing: Beijing University Press, 2000. 300~316  
张霁琛. *现代气象观测* [M]. 北京:北京大学出版社, 2000. 300~316

### 端面抽运声光调 Q DPL 实现重复频率 10 kHz, 峰值功率 220 kW 的脉冲输出

端面抽运的激光二极管抽运固体激光器(DPL)具有结构简单、体积小、易于实用化等优点。但是高功率端面抽运 DPL 由于热效应过于集中,热透镜焦距非常小,往往导致谐振腔的严重不稳。同时较强的热应力还会导致激光介质破损和介质镀膜层的损坏。因此很难实现高重复频率、高峰值功率的调 Q 脉冲输出。

本文采用多项关键技术获得重频 10 kHz,峰值功率 220 kW 激光输出,这些技术包括:通过非成像耦合系统调整抽运光的空间分布,见图 1,使得抽运光尽可能呈均匀的截面分布;将 Nd:YAG 晶体的抽运端面设计成凹面结构,以抵消部分热透镜的作用,见图 2;采用声光晶体内空间选通技术,获得高的声光衍射效率。

采用连续 52 W 光纤耦合激光二极管端面抽运 Nd:YAG,腔内声光调 Q 技术,在重复频率 10 kHz 时获得了脉冲宽度 6 ns,峰值功率 220 kW 的脉冲激光输出。实验结果如图 3,图 4 所示。

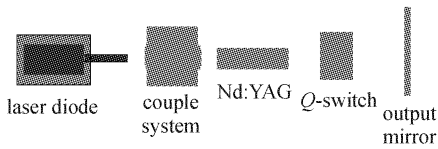


图 1 激光器的结构图

Fig. 1 Configure of the laser

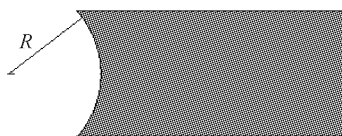


图 2 设计成凹端面结构的 Nd:YAG 晶体

Fig. 2 Rod of Nd:YAG with a concave end face

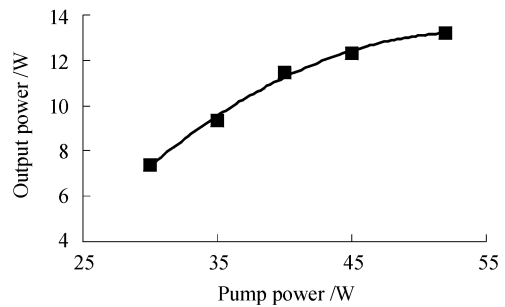


图 3 重复频率 10 kHz 时,不同抽运功率下的平均输出功率

Fig. 3 Average power of the output pulses with 10 kHz repetition at different pump power

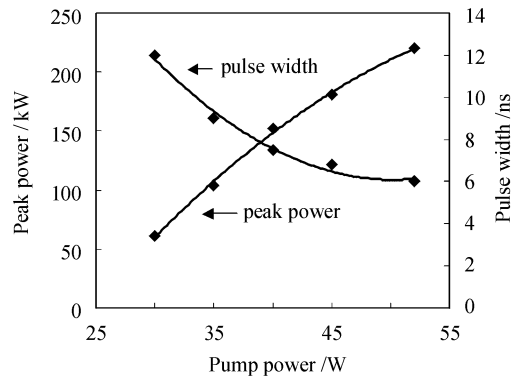


图 4 重复频率 10 kHz 时,不同抽运功率下的脉冲宽度和峰值功率

Fig. 4 Width and peakpower of the output pulses with 10 kHz repetition at different pump power

西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071  
蔡德芳, 王石语, 文建国, 过 振  
收稿日期: 2004-04-29