

Nd·YAG 四倍频激光抽运氘后的拉曼效应 及其在激光雷达中的应用*

吴永华 岳古明 胡欢陵 周 军 胡顺星
(中国科学院安徽光机所大气光学重点实验室 合肥 230031)

提要 利用 Nd·YAG 四倍频激光抽运氘气(D₂)的受激拉曼效应,获得一阶斯托克斯(Stokes)波长 289 nm。通过改变拉曼介质 D₂ 气压与抽运光能量,获得了一阶斯托克斯输出的较佳条件。该波长与 XeCl 准分子激光波长 308 nm 采用差分吸收方法,建立了用于对流层臭氧探测的激光雷达,并初步获得了对流层大气臭氧的垂直分布及其时间变化特征。

关键词 受激拉曼效应,激光雷达,对流层臭氧

1 引 言

激光技术促进了激光雷达的发展,染料激光器, Nd·YAG 激光器, CO₂ 激光器, 准分子激光器及可调谐钛宝石激光器等都已成功地用于大气探测领域^[1]。对流层臭氧是大气中一种非常重要的微量成分,它不但在地表附近是一种重要的污染成分,而且也积极参与了大气化学反应。同时,它在紫外和 9.6 μm 附近大气窗区有很强的吸收带,使其成为一种重要的温室气体。Gibson 等曾用可调谐染料激光器倍频输出探测对流层臭氧,但其波长控制较为复杂,系统维护比较麻烦^[2]。由于受激拉曼效应能够进行激光波长的转换与扩展,并具有调谐范围大及方便经济等优点,因而在激光同位素分离、生物工程和激光探测等方面有着广泛的应用^[3,4]。本文进行了 Nd·YAG 四倍频激光抽运 D₂ 的受激拉曼实验,分析和讨论了一阶斯托克斯(Stokes)输出的优化条件;采用该波长和 XeCl 激光器输出建立了用于对流层臭氧探测的激光雷达系统,并给出该激光雷达获得的对流层臭氧分布及其时空变化。

2 受激拉曼实验

2.1 实验装置

使用 Nd·YAG 激光的四倍频 266 nm 作为抽运源,其光束发散角小于 1 mrad,脉冲重复频率 10 Hz,单脉冲能量可达 80 mJ。拉曼池由不锈钢管材料加工而成,长 1 m,内径 14 mm。它的两端用共焦型石英透镜密封,并使入射抽运光会聚在拉曼池中心。拉曼池呈双层结构,中间夹层可以充入液氮冷却。实验装置如图 1 所示。Nd·YAG 四倍频光经 M₁ 和 M₂ 注入拉曼池

* 国家自然科学基金(49775258)和 863 计划激光技术领域资助课题。

收稿日期: 1999-03-22; 收到修改稿日期: 1999-05-21

(M_1, M_2 对 532 nm 及 1064 nm 高透, 对 266 nm 全反), 拉曼池的输出经棱镜 M_3 分光, 然后用荧光纸板观察各阶拉曼散射光斑, 并用 WDS-3 型紫外光栅单色仪测量其波长, 最后用 LM-3B 型能量计测量各级拉曼谱线的能量。

2.2 实验结果及讨论

在 4~28 atm 情况下, 通过荧光纸板可以看到 1~7 阶斯托克斯(Stokes) 和 1~4 阶反斯托克斯(Anti-Stokes) 散射光斑。用紫外光栅单色仪测量 1 阶 Stokes 输出波长 289 nm, 该值与理论计算值一致。探讨了 1~3 阶 Stokes 和 1 阶 Anti-Stokes 输出能量随 D_2 气压和抽运能量的变化。

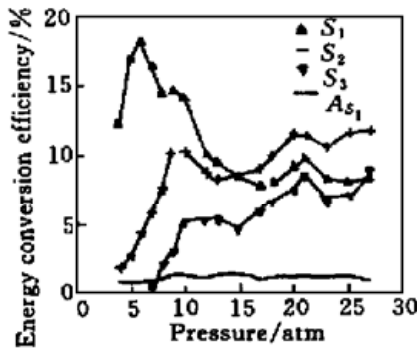


图 2 拉曼能量转换效率随 D_2 气压的变化 $S_1 \sim S_3$ 和 A_{S_1} 分别对应 1~3 阶斯托克斯和 1 阶反斯托克斯输出(以下符号相同)

Fig. 2 Changes of Raman energy conversion efficiency with D_2 pressure

$S_1 \sim S_3$ and A_{S_1} are first, second, third Stokes and first anti-Stokes lines, respectively (same meaning for these symbols below)

图 3 给出对应于 6 atm D_2 时受激拉曼输出与抽运光能量的关系。在 D_2 气压 6 atm 下, 1 阶和 2 阶 Stokes 输出随着抽运光能量的增大呈增长趋势, 且 1 阶 Stokes 输出能量明显强于 2 阶 Stokes, 而 1 阶 Anti-Stokes 输出能量则很小; 当抽运光能量大于 50 mJ 时, 1 阶 Stokes 散射输出大于 8 mJ, 但其增长率趋于平缓。图 4 给出 27 atm D_2 时受激拉曼输出与抽运光能量的关系, 当抽运光能量大于 20 mJ 时, 2 阶 Stokes 输出大于 1 阶 Stokes 输出的能量; 而 1 阶 Anti-Stokes 输出能量随抽运光能量增大而略微增大, 但它始终小于 1~3 阶 Stokes 输出。比较图 3 和图 4, 当抽运能量大于 30 mJ 时, 6 atm D_2 下 1 阶 Stokes 输出大于 27 atm D_2 时的情况, 这与图 2 的结果是一致的。在该受激拉曼实验系统中, 当介质 D_2 气压在 0~28 atm 时, 1 阶 Stokes 输出能量最大对应的 D_2 气压为 6 atm; 在该气压下, 当抽运能量大于 50 mJ 时, 1 阶 Stokes 输出能量大于 8 mJ, 这基本上满足了对流层臭氧激光雷达对激光能量的要求^[6]。实验表明, 在抽运光能量一定时, 随着拉曼池内 D_2 气压增大, 1 阶 Stokes 输出能量转换效率经过增

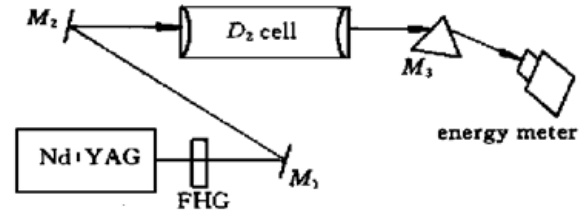


图 1 氙气受激拉曼实验装置框图

FHG: 四倍频器; M_1, M_2 : 导光片; M_3 : 棱镜

Fig. 1 Block of D_2 stimulated Raman experiment

FHG: fourth harmonic generator;

M_1, M_2 : steering-mirrors; M_3 : prism

当抽运能量为 70~75 mJ 及池内 D_2 气压从 27 atm 降至 4 atm 时, 图 2 给出了 1~3 阶 Stokes 和 1 阶 Anti-Stokes 输出能量转换效率随 D_2 气压的变化。1 阶 Stokes 输出随着 D_2 气压升高, 能量转换效率逐渐增大, 在 6 atm D_2 时达到最大值 18.0%, 随后又逐渐减小, 最后趋于平缓变化; 2 阶和 3 阶 Stokes 散射能量转换效率随 D_2 气压升高基本上呈增大趋势, 但它们的峰值小于 1 阶 Stokes 的情况; 当 D_2 气压大于 15 atm 时, 2 阶 Stokes 输出能量转换效率大于 1 阶 Stokes 的情况; 而 1 阶 Anti-Stokes 输出能量转换效率始终较小, 且随 D_2 气压变化不大。这是由于随着 D_2 气压升高, 受激拉曼增益系数增大, 当 1 阶 Stokes 散射足够强时, 它又如同抽运光场产生 2 阶 Stokes 散射, 甚至更高级 Stokes 散射。同时, 高压下由于气体色散效应明显, 四波混频过程由于相位失配严重而受到抑制, 由此而产生的 Anti-stokes 及高级 Stokes 辐射也会受到抑制^[5]。

大, 达到最大、下降和缓慢变化等过程, 而 2~ 3 阶 Stokes 能量转换效率基本上呈增长趋势, 甚至超过 1 阶 Stokes 的输出; 在 D₂ 气压一定时, 随着抽运光能量的增大, 1 阶 Stokes 输出能量先递增, 然后缓慢变化, 而 2~ 3 阶 Stokes 输出则表现为递增趋势。这说明 1 阶 Stokes 输出受 D₂ 气压和抽运光能量的支配, 它存在着增益饱和现象和较佳的工作状态。

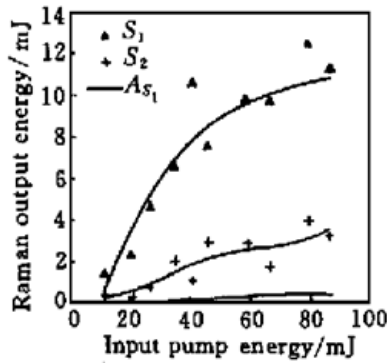


图 3 D₂ 气压为 6 atm 时拉曼输出与抽运能量的关系
符号为测量值, 实线为拟合曲线

Fig. 3 Raman outputs vs pump energies for 6 atm D₂
symbols: measured values, solid line: fitting curves

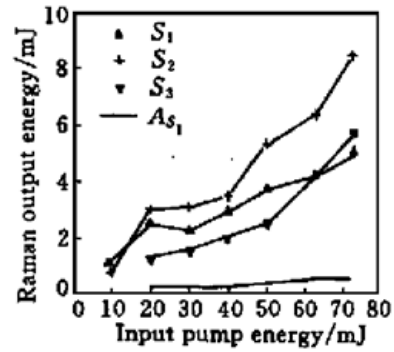


图 4 D₂ 气压为 27 atm 时拉曼输出与抽运能量的关系
符号为测量值, 实线为测量值连线

Fig. 4 Raman outputs vs pump energies for 27 atm D₂
symbols: measured values, solid line: measured value-curves

3 对流层臭氧激光雷达系统

3.1 系统简介

使用 D₂ 拉曼 1 阶 Stokes 输出 289 nm 与 XeCl 准分子激光器输出 308 nm, 采用差分吸收方法, 建立了用于对流层臭氧探测的激光雷达系统。该系统主要由激光发射、回波信号接收和数据采集及控制三部分组成。整体框图见图 5。

激光器、导光单元和光束调整装置组成激光发射部分。Nd·YAG 单横模调 Q 输出, 其二倍频 532 nm 用于探测大气气溶胶, 并用来校正气溶胶对臭氧数据结果的影响; 四倍频输出 266 nm 用于抽运 D₂ 拉曼池, 其 1 阶 Stokes 输出波长 289 nm。XeCl 准分子激光器输出 308 nm。三束激光经导光单元向大气层垂直发射, 并使用 CCD 监视调整激光束方向。接收部分主要由接收望远镜、机械光开关、分光单元、滤光片及光电倍增管(PMT)等组成。望远镜采用直径为 625 mm 的卡塞格伦型(Cassegrain), 其焦平面前的小孔光阑可以调整接收视场角; 焦平面附近放有机械斩光盘, 用以阻止低层大气强回波信号给 PMT 带来饱和及疲劳效应。望远镜收集到的大气后向散射信号, 经分光单元分别送至相应的 PMT, PMT 输

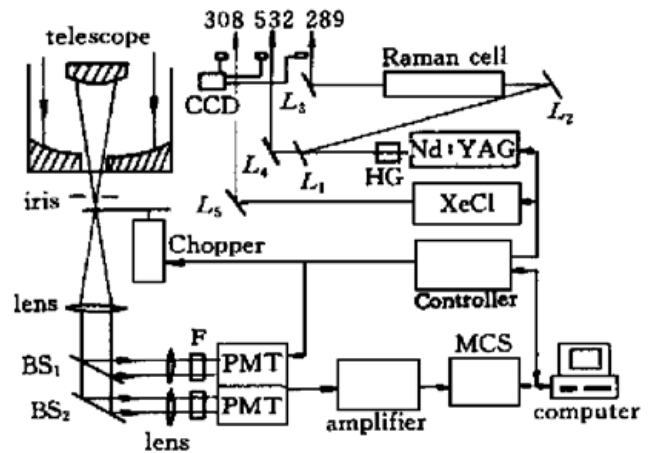


图 5 对流层臭氧激光雷达框图

HG: 倍频器; L₁ ~ L₅: 导光镜; BS₁, BS₂: 分光片; F: 滤光片;
MCS: 多通道光子计数器; PMT: 光电倍增管

Fig. 5 Schematic diagram of laser radar for tropospheric ozone

HG: harmonic generator; L₁ ~ L₅: steering-mirrors; BS₁, BS₂: beam-splitter; F: filter; MCS: multi-channel scaler; PMT: photomultiplier tubes

出经放大器放大后,由光子计数器检测信号,并经双缓冲接口卡送至微机中。PMT 入口处放有中性衰减片和滤光片,窄带干涉滤光片用来抑制天空背景噪声。机械光开关、衰减片和 PMT 的门控信号有效地兼顾接收高低层回波信号。通常,308 nm 通道 PMT 前放置 10% 衰减片。通过计算机软件可以设置系统采样频率、采样高度和激光脉冲数。表 1 给出该激光雷达发射激光束的主要参数。

表 1 激光雷达发射激光束的主要参数

Table 1 Specifications of laser beams in laser radar

Laser	Nd-YAG		XeCl
Wavelength/nm	532	266	308
Pulse energy/mJ	60	70	70
Pulse repetition rate/Hz	10	10	20
Beam divergence/mrad	≤ 1	≤ 1	$\leq 1.5 \times 1.5$
Pulse width/ns	18	18	20
D ₂ Raman cell	Pressure 6 atm, output 289 nm, energy 8 mJ		

3.2 对流层臭氧的分布及其时间变化

1997 年 4 月 5 日晚上天气晴朗,该激光雷达进行了对流层臭氧观测。图 6 给出测量得到的对流层臭氧浓度的空间分布及其误差范围(短横线)。测量中 D₂拉曼激光器发射脉冲 20000 次, XeCl 准分子激光器发射脉冲 10000 次,信号采样空间分辨率 45 m,测量累积时间约 40 min。由图 6 看出,当天合肥地区自由对流层 3.5~10 km 中,臭氧数密度在 $5 \times 10^{11} \sim 1.2 \times 10^{12}$ 分子数/cm³ 之间,该值小于 30 km 以下平流层臭氧的浓度^[7];其空间分布存在着层状结构。6 km 高度以下臭氧浓度分布的测量误差较小,随高度增加误差递增。测量结果的主要误差有大气起伏及背景噪声引起的统计误差、气溶胶和分子消光及后向散射带来的系统误差;前者随高度的增加因信噪比减小而递增,后者在 3 km 以上由于两波长回波信号的差分而被有效地减小。同一晚上多组观测结果如图 7 所示,每组测量累积时间为 25~35 min,可以看出短时间内对流层臭氧的分布明显存在着空间变化,但其浓度绝对值变化并不很大。这种变化很可能是由于大气动力效应引起的,并常伴随着大气温度和湿度分布上的变化。

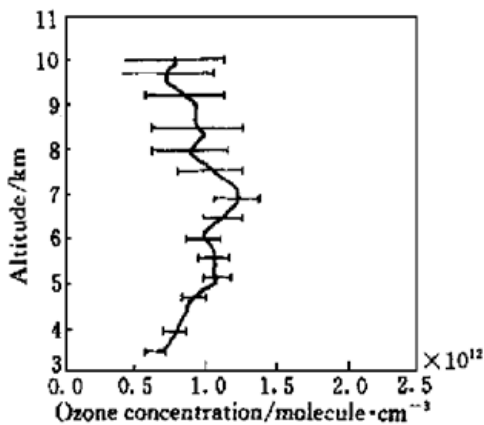


图 6 臭氧分布及其测量误差

Fig. 6 Ozone distribution with error bars
289 nm, 20000 shots; 308 nm, 10000 shots

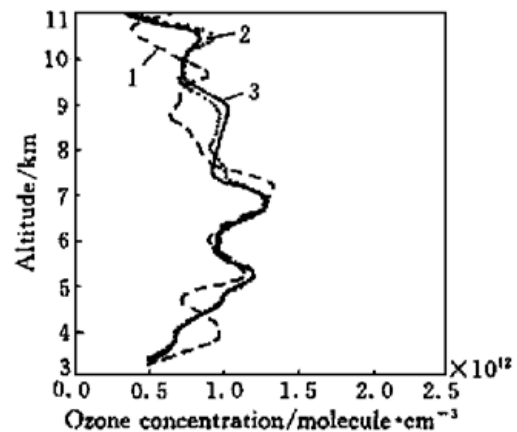


图 7 臭氧分布的时间变化

Fig. 7 Temporal variation of ozone profiles
1: 20·16~20·41; 2: 20·56~21·21; 3: 21·39~22·12

致谢 参加激光雷达研制的还有金传佳, 戚福第, 陈毓红, 窦根娣和张民。日本千叶大学环境遥感中心(CEReS) N. Takeuchi 教授为本文提出了有益的建议, 作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 E. D. Hinkey. Laser Monitoring of the Atmosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1976. 247~ 256
- 2 A. J. Gibson, L. Thomas. Ultraviolet laser sounding of the troposphere and lower stratosphere. *Nature*, 1975, **256**(2): 561~ 563
- 3 Lou Qihong, Yuan Yifeng, Qi Jianping *et al.*. Stimulated Raman scattering of unpolarized long pulse XeCl excimer laser radiation in H₂. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1986, **13**(4): 197~ 206 (in Chinese)
- 4 David C. Hanna, David J. Pointer, David J. Pratt. Stimulated Raman scattering of picosecond light pulses in hydrogen, deuterium and methane. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(2): 332~ 336
- 5 Guo Yili, Yao Minyan, Li Gang *et al.*. Parametric and nonparametric processes in high pressure hydrogen SRS. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1985, **34**(6): 745~ 751 (in Chinese)
- 6 J. Pelon, G. Megie. Ozone monitoring in the troposphere and lower stratosphere: evaluation and operation of a ground-based lidar station. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**(D6): 4947~ 4955
- 7 Hu Huanling, Wang Zhien, Wu Yonghua *et al.*. UV-DIAL system for measurements of stratospheric ozone. *Scientia Atmospherica Sinica* (大气科学), 1998, **22**(5): 701~ 708 (in Chinese)

D₂ Stimulated Raman Scattering Pumped by Fourth Harmonic Nd·YAG Laser and Its Application in Laser Radar

Wu Yonghua Yue Guming Hu Huanling Zhou Jun Hu Shunxing
(Key Lab for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract The first Stokes line 289 nm is generated by deuterium (D₂) stimulated Raman scattering pumped by fourth harmonic Nd·YAG laser. By changing D₂ pressure and pump energy, the conditions for 289 nm output were optimized. Based on differential absorption principle, a laser radar has been developed for monitoring tropospheric ozone using Stokes output at 289 nm and XeCl laser output at 308 nm. The distribution profiles of tropospheric ozone and their temporal variation are reported in this paper.

Key words stimulated Raman scattering, laser radar, tropospheric ozone