

紫外差分吸收激光雷达测量平流层臭氧*

胡欢陵 王志恩 吴永华 周 军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要 我们研制了一台紫外差分吸收 (UV-DIAL) 激光雷达, 用于 18~45 km 高度的平流层臭氧垂直廓线的长期监测。位于合肥的这一激光雷达于 1996 年 8 月全面建成并投入常规运行, 本文将给出该激光雷达系统的结构和平流层臭氧测量数据处理。给出的一些测量结果和与其他手段测量结果的对比表明, 该激光雷达对平流层臭氧能够进行可靠的测量。

关键词 激光雷达 臭氧 平流层

1 前言

平流层臭氧吸收了大部分的太阳紫外辐射, 保护了包括人类在内的地球生物, 也是平流层和中层大气的重要能量来源。人类活动造成的污染, 使臭氧总量和臭氧垂直分布发生变化。南极臭氧洞^[1]的发现引起了普遍的重视。大气臭氧的探测以及大气臭氧高度分布特征和变化规律的研究, 对于大气光化学、环境变化、气候模式和大气光学研究都有十分重要的意义。

差分吸收激光雷达的基本概念最先由 Schotland^[2]在激光雷达测量大气水汽空间分布时提出, 而后不断发展起来的^[3~5]。DIAL 激光雷达发射波长相近的两束激光, 波长为 λ_{on} 的激光被待测气体较强烈吸收, 待测气体对另一相近的波长 λ_{off} 吸收很小或没有吸收。由这两个波长回波强度的差异可以确定待测气体分子的浓度。波长为 λ_{on} 的气体吸收截面较大, 使差分吸收方法测量有较高的灵敏度; 大气气溶胶的 Mie 后向散射截面较大, 回波强度较大, 易于接收测量。再加上激光雷达的很高的距离分辨率和大范围实时测量的特点, 使 DIAL 激光雷达成为测量气体分子浓度空间分布的一种有力工具。

我们研制了一台紫外差分吸收激光雷达, 利用这台激光雷达在合肥对平流层臭氧垂直廓线进行了测量, 积累了一批测量资料。本文将给出研制的激光雷达的结构, 平流层臭氧测量及数据处理、测量结果的对比验证, 以及测量的平流层臭氧廓线的部分结果。

2 紫外差分吸收激光雷达结构

UV-DIAL 激光雷达系统从整体上分为发射、接收和控制三大部分。图 1 给出了 UV-DIAL 激光雷达系统的总框图, 表 1 是它的主要参数指标。

1997-03-24 收到, 1997-05-20 收到修改稿

* 本文得到国家 863 计划激光技术领域和国家自然科学基金 49475250 项目的资助

表 1 UV-DIAL 激光雷达系统主要参数

激光器	XeCl	Nd	Nd: YAG
波长 / nm	308	355	532
脉冲重复率 / Hz	50	5	5
激光脉冲能量 / mJ	200	60	60
接收望远镜	卡塞格林型望远镜		
直径 / mm	625		
接收视场 / mrad	2		
滤光片中心波长 / nm	308	355	532
带宽 / nm	0.94	1	0.87
透过率 / %	45	40	51
光电倍增管 (EMI)	9214QB × 2		9817B
数据采集系统			
多道累加器型号	EG & G 914P × 3		
	光子计数 150MHz		
计算机	586		

后向散射比的垂直廓线, 进行气溶胶修正。研制的 Nd: YAG 激光器由一级振荡和二级放大组成, 通过二倍频和三倍频 BBO 晶体, 输出 532 nm、355 nm 波长的激光。导光和光束调整单元由对接镜和 45° 转向镜组成。通过垂直基准孔和 CCD 监视系统, 调整对接镜可以把各波长激光垂直导入大气, 与垂直指向的接收望远镜的光轴平行。在最后一块 45° 转向镜上加有步进电机调整系统。通过计算机可以在 10° 范围内精确地调整发射激光束的方向, 步角调整精度约为 1 / 30 mrad。可随时方便地调整激光束的发射方向。

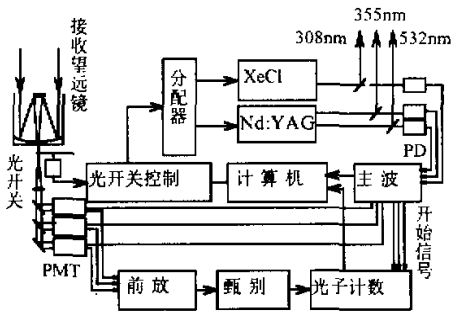


图 1 UV-DIAL 激光雷达框图

2.1 激光光源和发射单元

这一部分包括 XeCl 准分子和 Nd: YAG 激光器、激光光束方向调整和发射单元。图 2 是这部分的示意图。XeCl 准分子激光器具有重复频率高和能量输出稳定的优点、选用 XeCl 准分子激光器的 308 nm 输出作为测量平流层 O₃ 吸收波长 λ_{on} 。本激光雷达使用的 XeCl 准分子激光器是安徽光机所的产品。Nd: YAG 激光器工作性能稳定, 使用维护方便, 这里采用 Nd: YAG 激光器的三倍频 355 nm 作为参考波长 λ_{off} 。利用 Nd: YAG 二倍频输出 ($\lambda=532$ nm) 测量平流层气溶胶的

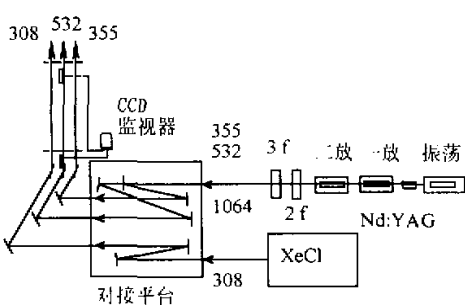


图 2 发射系统示意图

2.2 接收单元和数据获取

探测平流层的大气后向散射回波信号, 需要采用弱信号探测技术。选用低噪声的光电倍增管 (PMT), 并工作在 -25°C 的低温状态下, 把 PMT 带来的噪声控制在最低水平。高透过率窄带干涉滤光片可以减小天空背景噪声。光子计数技术通过设置合适的甄别电平以及选择合适的 PMT 工作状态, 可以充分抑制噪声计数, 提高回波信号的信噪比。采取机械光开关和光电倍增管门控两种手段, 减小低空强光的影响。为了覆盖较大

的高度范围, 采用在接收光路上加衰减片的办法进行分段测量。

接收光学单元由接收望远镜、光开关及分光系统组成。图 3 给出了这部分的示意图。接收望远镜是口径为 625 mm 的卡塞格林型望远镜。机械光开关的斩光盘直径为 92 mm, 转速为 400 r/s, 实验测试表明整个开关过程约 5 km。分光单元的设计采取插件式的结构。滤光片也采用插件式的设计, 高度分段测量时该插件内还可置入中性衰减片。

数据获取单元包括回波信号的光电转换、放大及数据采集。图 4 给出了该部分的框图。每一路均由光电倍增管、前置放大器、甄别器、多通道计数器和平均器构成, 包括英国 EMI 公司的 9214QB 和 9817B 光电倍增管, EG&G 公司的 VT120 型前置放大器和 914P 型多通道累加器 (MCS)。MCS 具有甄别器、多通道计数器和平均器的综合功能。这里选用累加方式, 最后的输出结果是全部激光脉冲回波在该通道光子计数的总和。

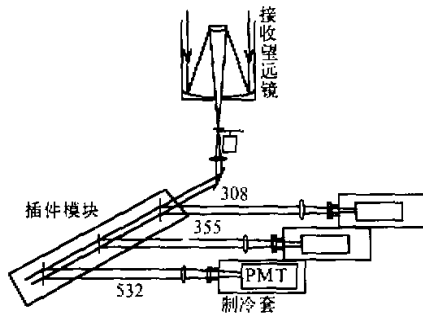


图3 接收光学系统示意图

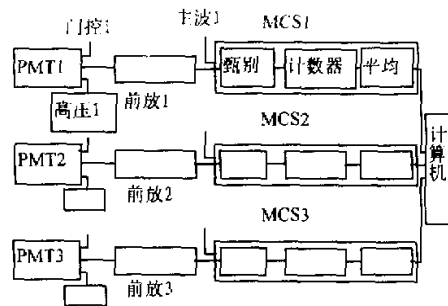


图4 数据采集单元框图

2.3 控制部分

控制系统保证发射和接收系统协调一致地工作。控制系统包括主控计算机、光开关控制器和主波控制器。光开关控制器主要用来控制两台激光器的激光发射以及斩光盘的状态。光开关控制器可以调整斩光盘所遮挡的高度区间。在光开关分配器的控制下, XeCl 和 Nd: YAG 两台激光器以一定比例 (如 4:1) 交替发射激光脉冲。主波控制器提供 MCS 的开始信号和光电倍增管的门控信号, 它保证发射和数据采集在时间上的一致。主控计算机除实现对整个系统的总控外, 还要完成数据传送和数据处理工作。

3 UV-DIAL 激光雷达平流层臭氧测量和误差分析

3.1 激光雷达方程和 UV-DIAL 测量臭氧方法

当波长为 λ_i 、脉冲能量为 E_i 的激光发射到大气中, 若高度 Z 处的臭氧浓度为 $n(z)$, 则激光雷达接收到的从高度 Z 、厚度为 ΔZ 的大气的回波光子数 $P_i(Z)$ 满足激光雷达方程为

$$P_i(z) = K_i \frac{E_i \beta_i(z) \Delta z}{z^2 (hc / \lambda_i)} \exp \left\{ -2 \int_0^z [\alpha_i(z) + n(z) \sigma_i] dz \right\}, \quad (1)$$

这里 K_i 、 h 和 c 分别是激光雷达系统效率、Plank 常数和光速, σ_i 是波长为 λ_i 的臭氧吸收截面, 大气后向散射系数 $\beta_i(z)$ 和消光系数 $\alpha_i(z)$ 都由气体分子和气溶胶两部分组成。由方程 (1) 可得到 UV-DIAL 激光雷达测量的平流层臭氧分子浓度。实际测量中, z 和 $z' = z + \Delta z$ 大气厚度层内的平均臭氧浓度 $N(z)$ 可以由下式计算:

$$N(z) = \frac{-1}{2\Delta\sigma\Delta z} \ln \left[\frac{\bar{P}_{\text{on}}(z')}{\bar{P}_{\text{on}}(z)} \cdot \frac{\bar{P}_{\text{off}}(z')}{\bar{P}_{\text{off}}(z)} \right] - \frac{\bar{\alpha}_{\text{Mon}} - \bar{\alpha}_{\text{Moff}}}{\Delta\sigma} + B + E_A. \quad (2)$$

后向散射 B 和消光 E_A 分别为

$$B = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta z} \ln \left[\frac{\beta_{\text{on}}(z')}{\beta_{\text{on}}(z)} \cdot \frac{\beta_{\text{off}}(z')}{\beta_{\text{off}}(z)} \right], \quad (3)$$

$$E_A = \frac{-(\bar{\alpha}_{\text{Aon}} - \bar{\alpha}_{\text{Aoff}})}{\Delta\sigma}, \quad (4)$$

这里, 臭氧吸收截面差 $\Delta\sigma = \sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}$, α_A 和 α_M 分别为气溶胶和分子的消光系数。

数据处理主要是计算背景、原始数据平滑及求微分或差分, 计算臭氧数密度及进行气溶胶影响的订正。波长 308 nm 处臭氧吸收截面随温度变化, 这里按下式进行温度修正¹⁾:

$$\sigma_{308} = (12.87 + 3.0575 \times 10^{-2} T + 1.6156 \times 10^{-4} T^2) \times 10^{-20} \text{ cm}^2, \quad (5)$$

其中 T 的单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。波长 355 nm 的臭氧吸收截面为 $6.3 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ 。大气气体分子的消光系数和后向散射系数, 可以由气温和气压计算, 或采用模式。进行气溶胶订正时, 利用 532 nm 波长探测的平流层气溶胶的散射比, 经波长变换后订正气溶胶的影响。

3.2 噪声和提高测量精度的措施

噪声的大小对平流层臭氧探测精度和可探测高度有很大影响。激光雷达探测的噪声主要由信号噪声 (即回波光子数的统计起伏和 PMT 的散粒噪声) 和背景噪声 (包括天空背景光辐射噪声、光电倍增管的暗电流噪声、热噪声等) 组成。采用移动平均法平滑信号, 以减小因大气起伏而带来的误差。对于 40 km 以上的回波光子数的订正, 背景噪声的取值大小对臭氧浓度结果影响很大。实际测量中, 一般以 90~150 km 高度内的光子计数作为背景噪声 $P_b(z)$ 。尽管采用光开关和 PMT 的电子门控, 来自高层的弱回波信号还会受到低层强信号引起的 SIN (Signal-induced noise) 噪声的影响^[4], 因此, 对 P_b 的数据必须考虑 SIN 的影响。 $P_b(z)$ 随高度的变化可按线性、二次多项式或指数函数来拟合。一般采用指数函数

$$P_b(\lambda, z) = a(\lambda) \exp[-b(\lambda)z] + c(\lambda). \quad (6)$$

利用最小二乘法来确定 (6) 式中的系数 $a(\lambda)$, $b(\lambda)$ 和 $c(\lambda)$ 。对于 40 km 以下的回波光子数的背景噪声订正, 可直接采用 $P_b(z)$ 的平均值作为背景噪声。

1) Bass, A. M., 1984, The ultraviolet absorption cross-section of ozone, Final report to NASA, Contract No. s-40127B

为了减小回波的信号噪声提高信噪比, 需要进行累计测量。重复测量经过 m 次取样累加平均后, 在各次测量相互独立不相关的条件下, 其信噪比可提高 $\sqrt{m}$ 倍。为了有效地检测来自高层大气的微弱回波信号, 须用几万个激光脉冲重复测量累加回波信号。对于高层的弱回波信号, 还要采取延长光子取样时间增加探测分层厚度的办法, 即以降低高度分辨率的代价来提高信噪比。实际测量中, 一般情况下垂直分辨率 30 km 以下为 1 km, 30~35 km 为 2 km, 35~40 km 为 3 km, 40 km 以上为 4 km。

3.3 误差分析

臭氧密度的 UV-DIAL 测量在忽略气溶胶的影响时, 可以仅用式 (2) 中的头两项来计算, 它的相对误差 $\varepsilon = \Delta N / N$ 可以表示如下:

$$\varepsilon^2 = \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2, \quad (7)$$

其中

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2\Delta\sigma N\Delta z} \left\{ \sum_{i=\text{on,off}} \left[\frac{\bar{P}_i(z) + 2P_b}{[\bar{P}_i(z)]^2} + \frac{\bar{P}_i(z') + 2P_b}{[\bar{P}_i(z')]^2} \right] \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(B + E_A)}{N}, \quad (9)$$

这里 P_b 是背景噪声, ε_1 是由于信号和背景涨落引起的统计误差, ε_2 是由于假设 $B = E_A = 0$ 引起的系统误差。图 5 给出 1996 年 10 月 21 日臭氧浓度和气溶胶散射比高度分布的测量结果以及 ε_1 和 ε_2 的高度分布。由图可见, 气溶胶后向散射比峰值高度已降到约 16 km, 峰值大小也降到 1.3 以下, 平流层气溶胶的影响已大大减小。测量中 308 nm 波长激光的脉冲累计数为 60 000, 355 nm 波长脉冲累计数为 20 000。由背景和信号涨落引起的统计误差 ε_1 , 在 37 km 以下小于 2%, 37~39 km 小于 5%, 39 km 以上将随高度迅速增加。系统误差 ε_2 小于 3.5%。用 532 nm 波长测量的气溶胶进行订正, 可有效地减小 ε_2 。当 XeCl 激光器发射脉冲数 40 000~60 000 次和 YAG 激光器发射脉冲数

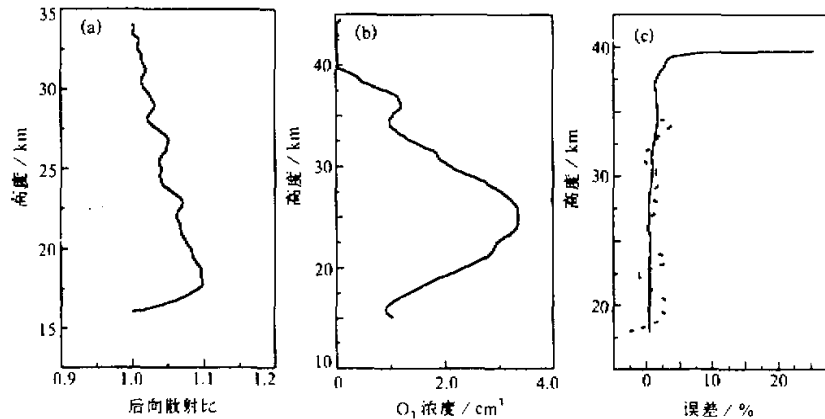


图 5 1996 年 10 月 21 日臭氧测量结果误差

10 000~20 000 次左右, 在一般的情况下, 臭氧浓度的测量误差 35 km 以下小于 10%, 35~40 km 为 10%~20%, 40 km 以上大于 20%。

4 UV-DIAL 测量平流层臭氧廓线及验证

平流层臭氧 UV-DIAL 测量是在晴朗无云夜晚进行的。308 nm 和 355 nm 波长的激光用来测量臭氧的高度分布, 利用 532 nm 波长测量气溶胶散射比廓线。每个通道的计数采样时间即测量的垂直厚度是 150 m。测量通道数为 1 000, 即最高测量高度为 150 km。在正常情况下, 308 nm 波长测量脉冲数一般为 40 000 左右, 355 nm 和 532 nm 的脉冲数均为 10 000 左右, 测量时间约为 1 h。1993 年 12 月 28 日进行了首次成功的试测量, 1996 年 8 月前是试运行时期。该激光雷达系统利用同一个 PMT 和数据获取单元更换滤光片, 分别测量不同波长的回波信号。每个通道的累计光子计数经滑动平均后处理, 每 1.2 km 给出一个臭氧数密度数据, 因此测量的臭氧浓度廓线折点较明显。1996 年 8 月全面建成, 回波经接收望远镜后分为三路分别同时进行光子计数, 累计激光脉冲数达到了设计要求。每个通道的回波测量时间 1 μ s 即 150 m, 经滑动平均后处理, 每 150 m 给出一个臭氧数密度数据, 因此臭氧浓度廓线较光滑。

激光雷达测量结果同 SAGEII 卫星和臭氧探空的测量结果进行了比较。SAGEII 利用 0.6 μ m 辐射通道对太阳进行掩星法临边扫描测量, 给出不同高度上臭氧浓度在扫描光路上的平均值, 24~36 km 高度范围内的测量精度为~5%。美国 NASA 的 Langley 研究中心提供的 SAGEII 卫星在合肥周围 1 000 km 范围内测量的臭氧浓度垂直分布, 垂直分辨率为 1 km。我们选择一批与 SAGEII 同一日期的激光雷达测量结果进行了对比, 结果表明它们之间有较好的一致性。图 6 给出了 1994 年 7 月 8 日激光雷达测量结果同 SAGE II 测量结果的比较。测量中 XeCl 激光器发射脉冲累计 10 000 次, Nd:YAG 发射脉冲累计 5 000 次。可以看到, 两者较为一致, 在 20~30 km 范围内

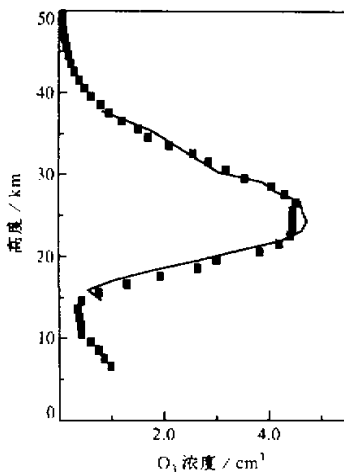


图 6 与 SAGEII 结果比较

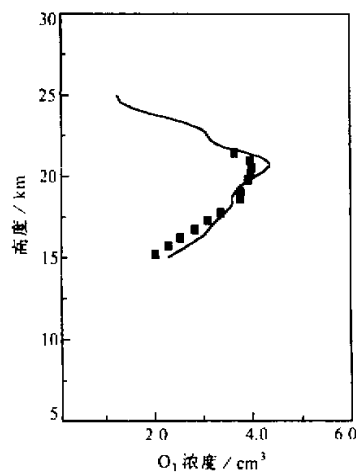


图 7 与 ECC 探空结果比较

相差小于 10%。我们在 1995 年 12 月 27 日和 1996 年 11 月 13 日进行了 ECC 臭氧探空和紫外 DIAL 激光雷达的对比测量实验, 结果表明两者在相应的测量高度内是相当一致的。图 7 给出了其中的一个例子, 16 km 以上两者相差小于 10%。

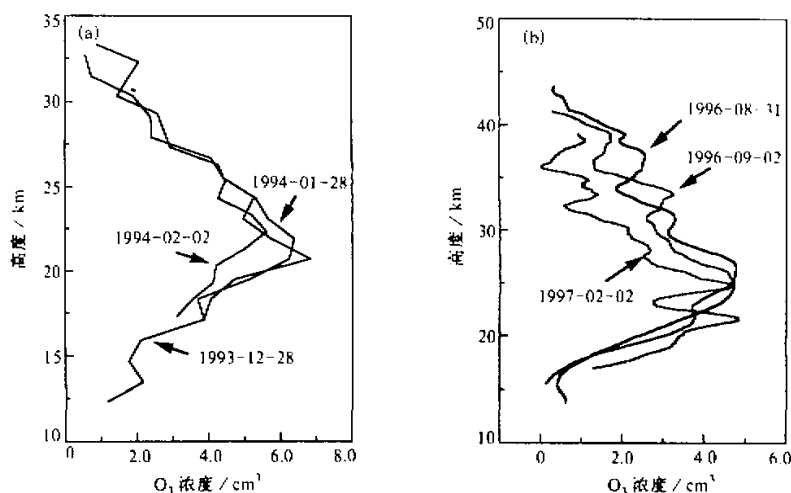


图 8 UV-DIAL 测量平流层臭氧部分结果

图 8 分别给出了试运行和常规运行两个阶段得到的平流层臭氧垂直廓线的部分测量结果。图 9 是本激光雷达自 1993 年底以来 20 km、25 km、和 30 km 三个不同高度上臭氧数密度的部分测量结果。测量结果显示平流层臭氧变化的一般特征, 其峰值位于 20 至 25 km 的高度范围内, 峰值区以上臭氧浓度逐渐减少。测量结果表明, 本激光雷达系统在长期的常规运行中, 它的性能是稳定的。

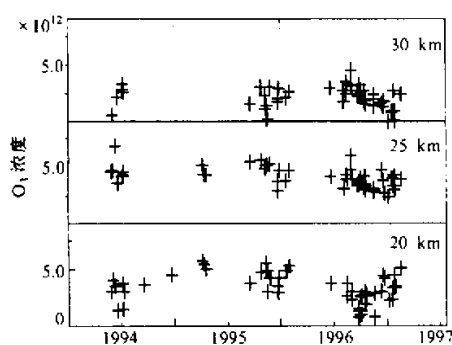


图 9 不同高度上臭氧浓度

5 小结

本文给出了研制的紫外差分吸收激光雷达的结构及其性能。由 308 nm 和 355 nm 波长的激光回波用差分吸收的方法可以得到平流层臭氧的浓度, 532 nm 波长激光的测量结果用来对其进行气溶胶修正。测量臭氧的高度范围一般为 ~18 至 45 km。臭氧浓度的测量误差 35 km 以下小于 10%, 35~40 km 为 10%~20%, 40 km 以上大于 20%。垂直分辨率 30 km 以下为 1 km, 30~35 km 为 2 km, 35~40 km 为 3 km, 40 km 以上为 4 km。臭氧垂直廓线测量结果以及与其他手段测量结果的对比表明, 本激

光雷达对平流层臭氧能够进行可靠的测量。一段时期的正常运行表明, 本紫外差分吸收激光雷达的性能是稳定的。

致谢: 参加本工作的还有金传佳、戚福弟、岳古明、陈毓红、赛根娣等。

参 考 文 献

- 1 Farman, C., B. G. Gardiner and J. D. Shanklin, 1985, Large losses in total ozone in antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, **315**, 207~210.
- 2 Schotland, R. M., 1966, Some observations of the vertical profile of water vapor by a laser optical radar, *Proc. 4th Symposium on Remote Sensing of Environment*, 12-14 April, 1966, University of Michigan, Ann Arbor, 273~283.
- 3 Uchino, O., M. Maeda, M. Hirono, 1979, Applications of excimer lasers to laser-radar observations of the upper atmosphere, *IEEE J. of Quantum Electron*, **QE-15**, 1094~1107.
- 4 McDermid, I. S., S. M. Godin, L. O. Lindqvist, 1990, Ground-based laser DIAL system for long-term measurements of stratospheric ozone, *Appl. Opt.*, **29**, 3603~3612.
- 5 Uchino, O., I. Tabata, 1991, Mobile lidar for simultaneous measurements of ozone, aerosol and temperature in the stratosphere, *Appl. Opt.*, **30**, 2005~2012.

UV-DIAL System for Measurements of Stratospheric Ozone

Hu Huanling, Wang Zhien, Wu Yonghua and Zhou Jun

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei 230031)

Abstract An UV differential absorption lidar system has been implemented to make long-term measurements of stratospheric ozone concentration profiles from the height 18~45 km. This lidar is located in Hefei, and has been in routine operation since August of 1996. This paper describes the lidar facility and the procedures for data analysis. Examples of ozone profiles measured, and intercomparisons with measurements made by other instruments, are presented which show that the lidar is capable of producing high quality measurements of stratospheric ozone.

Key words UV-DIAL lidar ozone stratosphere