

国外差分吸收激光雷达探测大气水汽廓线的研究进展

洪光烈¹, 李嘉唐², 孔伟^{1*}, 舒嵘¹

1. 中国科学院主动光电技术国防科技创新重点实验室, 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 水汽含量是大气最基本的物理参量之一, 大气水汽垂直分布结构对于大气过程的研究十分有意义。差分吸收激光雷达可以昼夜获取高精度、高距离分辨率的大气水汽垂直分布廓线, 是最有潜力的探测手段。国际上已经发展出几种类型的差分吸收激光雷达, 对它们的发展路径做一梳理, 理清发展脉络, 具有有益的参考价值。其中, 稍早时期水汽差分吸收激光雷达工作在 4ν 振动吸收带 720~730 nm 频段, 以 Alexandrite 为主流的激光器或者 Nd:YAG/ruby 固体激光器泵浦的染料激光器作为发射光源, 光电倍增管仍然可以在这个波段担任探测器, 代表性的仪器是法国的机载 LEANDRE II。此后发展的 820 nm 波段的水汽差分吸收激光雷达, 以钛宝石激光器或钛宝石光放大器为发射机, 以硅的雪崩二极管作为探测器, 紧跟前置放大和数据 AD 采集器, 如德国 Hohenheim 大学的车载扫描激光雷达, 可以获得对流层 300~4 000 m 之间水汽二维或三维分布结构; 德国 Institut für Meteorologie und Klimaforschung 所建立的差分吸收激光雷达可以探测 3~12 km 高度之间大气的水汽垂直分布。720 和 820 nm 波段水汽吸收截面较小, 更适用于地基或车载的对流层水汽廓线探测。而水汽 3ν 振动谱 935 nm 区域吸收截面较大, 是为了空间探测大气对流层上、平流层下相对干燥区域的水汽分布而准备的, 且可以安排多个探测波长, 和一个参考波长, 它们对水汽的吸收截面大小呈梯度分布, 以应对空间对地观测时不同高度大气水汽浓度的差别。基于种子注入的光参量振荡器或 Nd:YGG 全固态激光器的 935 nm 差分吸收激光雷达, 以德国 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 的研究最为成功, 推动了欧洲空间局立项发展空间水汽差分吸收激光雷达 WALES (Water Vapour Lidar Experiment in Space), 测量从地球表面到平流层下、高垂直分辨率和高精度水汽浓度分布。机载多波长水汽差分吸收激光雷达 1999 年建立起来, 担当空间 WALES 任务的模拟器, 2006 年完成了机载飞行试验。以 823~830 nm 分布布拉格反射半导体激光器和半导体光放大器为核心、采用雪崩二极管盖格光子计数技术的微脉冲差分吸收激光雷达, 是差分吸收激光雷达面向商业化、可普及的方向迈出的重要一步, 目前已经发展到第四代产品。发射机激光工作波长的长期稳定十分重要而棘手, 以窄带连续波种子激光注入脉冲激光器的谐振腔锁定其的腔长, 种子激光的波长以水汽的多通道光吸收池为参照标准, 或以高精度波长计为误差获取手段, 通过负反馈进行主动稳频; 其次, 需要仔细考虑大气对激光的后向散射光谱线型, 显然 Rayleigh 后向散射光的多普勒展宽与水汽吸收光谱线宽度可以比拟, 所以其吸收截面 σ_{on} 和 σ_{off} 必需加以修正; 水汽的空间垂直分布梯度大, 因此差分吸收激光雷达应该实行分通道探测。

关键词 差分吸收激光雷达; 水汽; 光频稳定; 瑞利多普勒展宽

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** R **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)02-0340-09

引言

既有的成熟大气水汽观测能力, 对于全球观测系统的运行以及大气详细过程的研究, 是明显不够的。最常规的观测仍

然是无线电探空的在线传感器, 除了存在传感器特性的问题, 也有取样方法的问题。鉴于水汽时常产生强烈的梯度分布, 来自被动遥感器反演的一些信息, 垂直分辨率特别地不足。

距离分辨的 (range-resolved) 差分吸收激光雷达 DIAL (differential absorption lidar) 技术能够提供所需要的关于水

收稿日期: 2017-12-07, 修订日期: 2018-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61775227)资助

作者简介: 洪光烈, 1966 年生, 中国科学院上海技术物理研究所研究员 e-mail: glhong@mail.sitp.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: kongwei005@126.com

汽时间和空间垂直分布的信息。发射机向大气发射两种波长相近的激光脉冲,一个波长的水汽吸收截面较小,称为参考波长(offline);另一个波长的水汽分子吸收截面较大,称为探测波长(online);两种波长激光脉冲穿过高度 R 、长度 ΔR 、截面等于接收视场与光束截面重叠区的大气柱状体(如图 1),柱状体内大气后向散射光被接收检测,根据两个波长后向散射回波的差值,可以反演出 R 高度处、距离分辨率 ΔR 的大气中水汽分子含量^[1]。

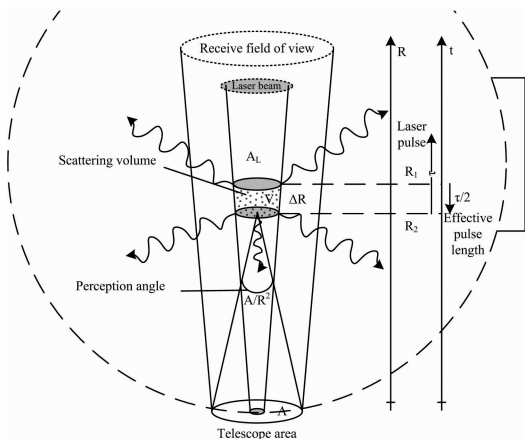


图 1 激光雷达的几何说明

Fig. 1 Illustration of the lidar geometry

水汽的吸收线分布在好几个红外区域,对于 DIAL 工作的最适合的波长在 4ν 振动谱段 730, 820 nm, 和 3ν 振动谱段 930 nm 附近,那儿其他气体干扰比较小,已经发展出合适的激光源,和灵敏的探测器,吸收线的强度分布很宽。图 2 显示了在标准压力和温度下以及 80% 相对湿度条件下,自 700 ~ 1 200 nm 区域水汽的吸收系数^[2]。

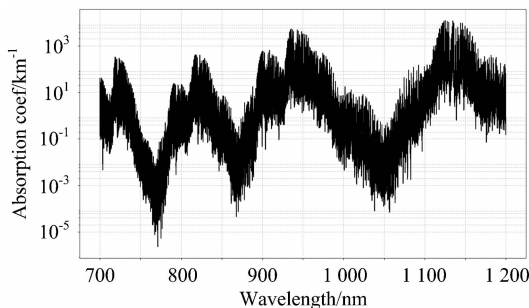


图 2 700~1 200 nm 波段水汽吸收系数,标准大气温度和大气压力,湿度 80%

Fig. 2 Absorption coefficient of water vapor from 700 to 1 200 nm, standard pressure and temperature, 80% humidity

1 720~730 nm 波段差分吸收激光雷达

早在 1979 年, Browell 等 NASA 兰利研究中心的科学家,就以红宝石激光器(ruby)泵浦的染料(dye)激光器(724 nm/150 mJ)为发射机,建立了地基的大气水汽廓线探测差分吸收激光雷达^[3];1994 年—1995 年 NASA 兰利研究中心的科学家研究了 Alexandrite 激光器及其发射波长稳定控制技

术,并据此进一步研究了大气对流层水汽廓线探测的差分吸收激光雷达^[4-5];同时期德国马克斯普朗克研究所的科学家也为了同样目的而研究了种子注入的环形腔 Alexandrite 激光器^[6]。

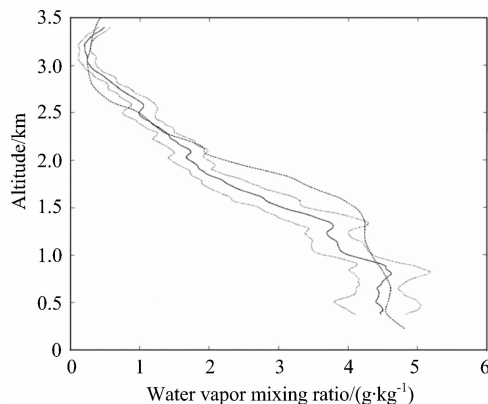


图 3 飞行高度 31 0835 UT: 探测水汽混合比(实线)

点线表示加上或减去观测方差;虚线表示最近区域的在线探测器测量结果

Fig. 3 Measurements from flight 31 0835 UT: lidar mean water-vapor mixing ratio (solid curve)

Dotted curves, mean value plus or minus the observed standard deviation; dashed curves, nearest in situ measurement

720~730 nm 波段最有代表性的差分吸收激光雷达,当属法国科学家 Didier Bruneau 等研制的机载差分吸收激光雷达 LEANDRE-II (图 4 为系统框图),可以探测对流层下部分水汽混合比的廓线,发射机是一个闪光灯泵浦的 Alexandrite 激光器,双脉冲工作,双波长都位于 727~736 nm 光谱范围内。脉冲能量 50 mJ,线宽为 $2.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$,光谱纯度大于 99.99%,双脉冲发射之间时间间隔 50 μs 。发射波长由波长计时实时监控,使其绝对精度在 $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 以内。接收望远镜口径 30 cm,接收视场 3.5 mrad,滤光片带宽 1 nm。仪器的这些指标保证了激光雷达测量水汽混合比的绝对精度优于 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在探测高度 5 km 以下的大气中,距离分辨率 300 m,100 对脉冲回波信号累积平均,仪器的系统误差小于 2%^[7]。0.8 km 水平分辨率和 300 m 垂直分辨率,测量误差的方差范围从 3.5 km 高度处的 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 至近地面处的 $0.3 \sim 0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,和预计的随机误差相符。与露点湿度计相比,测量显示出垂直的平均偏差为 $\pm 0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,接近等于被观测水汽的变化(见图 3)^[8]。

2 以钛宝石激光器或钛宝石光放大器为发射机的差分吸收激光雷达

大气水汽在 817~820 nm 波段有合适的吸收谱线,钛宝石在该波段有较高的增益系数,因此德国 Hohenheim 大学的 Gerd Wagner 等科学家,在该波段开发了车载的、三维扫描的、基于钛宝石激光器作为发射机的差分吸收激光雷达,用以探测下对流层大气水汽分布。动态稳定的、环形谐振腔,包括布儒斯特切角钛宝石(Ti:sapphire)晶体,两边以二

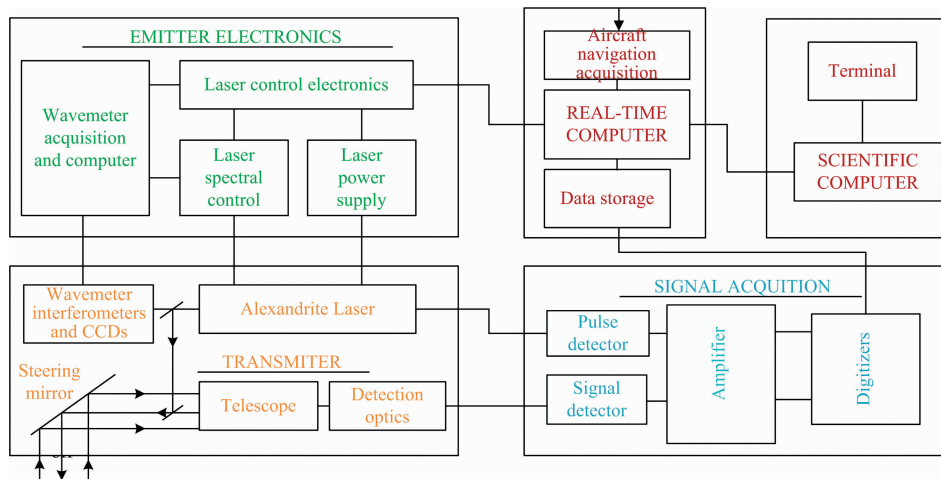


图 4 LEANDRE II 系统组成框图

Fig. 4 Diagram of the LEANDRE II system

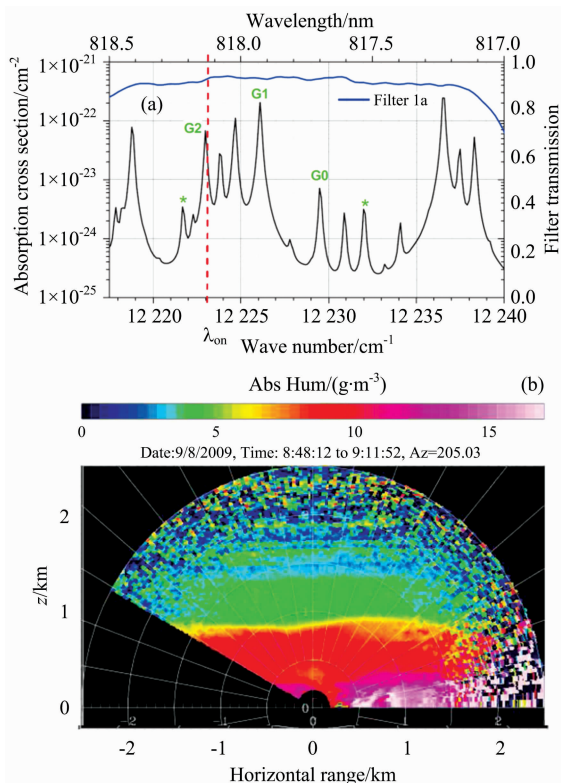


图 5 (a) 820 nm 水汽吸收光谱, 干涉滤光片的透过率曲线, 截至白天背景光; (b) 激光雷达绝对湿度场分布距离-高度二维扫描图

Fig. 5 (a) Water vapor absorption spectrum near 820 nm with transmission curves of the interference filters used to block the daylight background in the receiver, (b) Range-height indicator scan of the absolute humidity field measured during the FLUXPAT 2009 campaign on 8 September 2009 between 8:48 and 9:12 UTC. The scan speed here was 0.1° s^{-1} . An integration time of 10 s was used for each profile resulting in an angular resolution of 1°

极管泵浦的重复频率 250 Hz 的 Nd : YAG 激光器二倍频 (532 nm) 泵浦。谐振腔采取种子注入技术和相位敏感的主动稳频技术, Ti: sapphire 激光器工作在 820 nm 附近的波长 [见图 5(a)], 是地基差分吸收激光雷达测量水汽的最佳波长之一。平均输出功率超过 6.75 W, 光束质量因子 $M^2 < 2$ 。指向稳定度 $< 13 \mu\text{rad}(\text{rms})$, 解偏振 $< 1\%$ 。总的光-光转换效率达到 19%。脉冲时间宽度 40 ns, 脉冲线宽 $< 157 \text{ MHz}$, 长期和短期光频稳定度 10 MHz (rms), 光谱纯度 99.9%。扫描模式可以达到的低云高度 2.4 km^[9], 水平廓线和垂直廓线都能得到。发射望远镜(扩束镜) $\phi 200 \text{ mm}$, 接收望远镜主镜 $\phi 800 \text{ mm}$, 距离分辨率 15 m(近)~300 m(远) [见图 5(b)], 扫描角度速度 $0.1^\circ \sim 10^\circ \text{ s}^{-1}$, 可探测距离 300~4 000 m^[10]。

Hannes Vogelmann 等德国科学家 2008 报道了在 Zugspitze 山上 Schneefernerhaus 高海拔研究站建立的差分吸收激光雷达^[11], 发射机工作在 817 nm 附近, 前级为闪光灯单纵模 Nd : YAG 激光器二倍频 532 nm 泵浦的、两个单纵模小脉冲能量 Littman 光参量振荡器(其波长分别对应参考波长 817.223 nm 和探测波长 817.163 nm), 后级为闪光灯泵浦的钛宝石光放大器 [图 7(a)]。近处距离分辨率 50 m, 10 km 高度处距离分辨率 300 m, 脉冲能量可达 250 mJ, 通常工作在 100~150 mJ 之间, 脉冲重复频率 20 Hz, 脉冲时间宽度 2~4 ns, 每 10 000 个脉冲回波累加平均。接收望远镜口径 0.65 m, 有两个接收通道(图 6), 一个负责近场接收(滤光片带宽 5 nm), 另一个负责远场接收(滤光片带宽 0.5 nm), $\phi 3 \text{ mm}$ 硅雪崩二极管探测器, 数据采样率 20 MHz, 数据分辨率 12 bit。近场接收视场角 $1.25 \text{ mrad} \times 3 \text{ mrad}$, 远场接收视场角 $2.5 \text{ mrad} \times 8 \text{ mrad}$ 。探测范围为海拔 3~12 km, 白天可以探测到 10 km 高度, 晚上至少可以探测到 12 km 高度。与无线电探空仪器相比, 差别在 5% 以内 [见图 7(b)]。

3 823~830 nm 微脉冲差分吸收激光雷达

上述差分吸收激光雷达, 脉冲能量高、脉冲频率低, 成

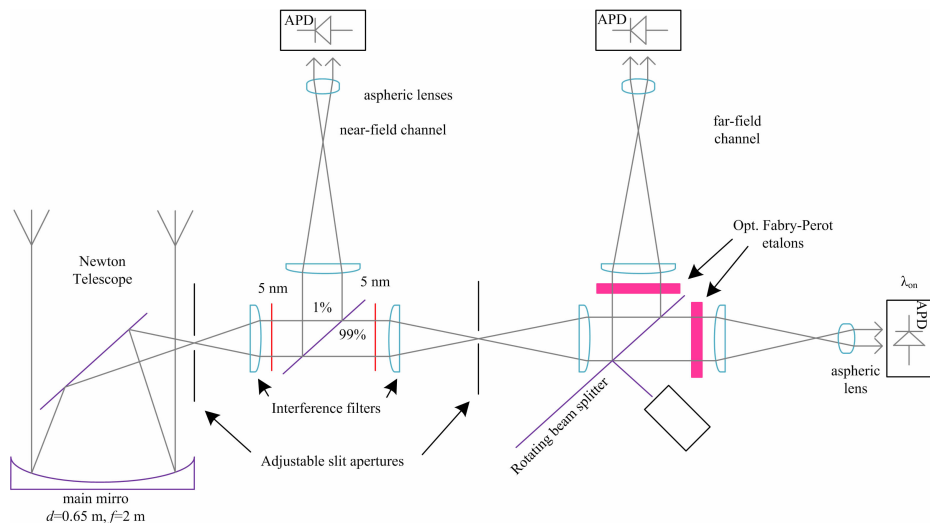


图 6 Zugspitze 水汽激光雷达接收系统

Fig. 6 Receiver system of the Zugspitze water-vapor lidar

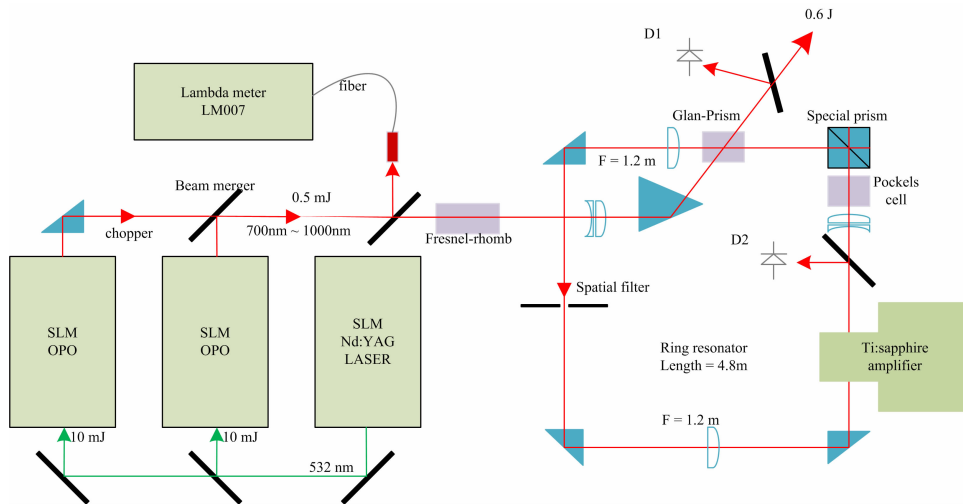


图 7(a) 差分吸收激光雷达发射机

Fig. 7(a) DIAL transmitter and daytime measurement under rather humid conditions in the upper troposphere and an anomalous high tropopause

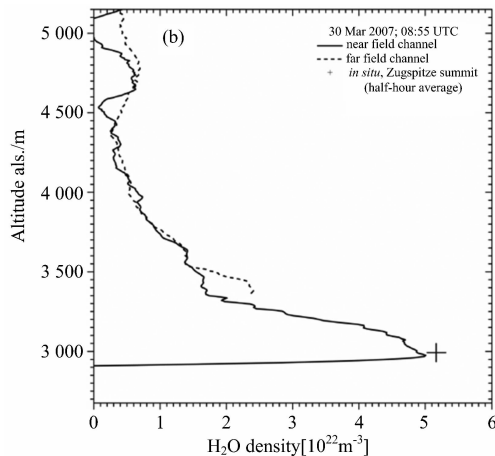


图 7(b) 白天测量湿度的结果

Fig. 7(b) Measure results of humidity in daytime

本很高，对维护人员要求苛刻，妨碍了它的普及、推广和商业化，因此，早在 2004 年，美国科罗拉多大学、NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 环境技术实验室的科学家 Janet L. Machol 领导的小组^[12]研制的无人操作、自动化的微脉冲差分吸收激光雷达 CODI，可以探测对流层大气水汽廓线。工作在 823 nm 附近(见图 8)，发射机是 DFB 分布反馈半导体激光器配合半导体光放大器，脉冲重复频率 6~10 kHz，脉冲宽度 600 ns，脉冲能量 0.15 mJ；接收机配置雪崩二极管盖格计数器(EG&G 公司)，接收望远镜 35 cm；滤光片带宽 160 pm，可探测大气水汽浓度的范围 0.5~10 g·m⁻³，至少 15% 的精度，探测距离达到 2 km(图 9)。

2010 年澳大利亚科学家 Alex Dinovitsner 也在这个波段建立了微脉冲的大气水汽探测差分吸收激光雷达^[13-14]，其发射机 Fabry-Perot 型二极管激光器，采用了 33 m 光程多通道气体吸收池去锁定探测波长 online，用带通微波滤波器将参考

波长 offline 锁定在距离探测波长 online 线 16 GHz 的偏频上。光频可以稳定在 1 MHz 左右。脉冲能量 300 nJ，脉冲重复频率 3 kHz，1 μs 脉冲宽度，接收机包括 356 mm 望远镜，

和光电倍增管为探测器的光子计数器。

2010 年以来，文献报道了 NASA 兰利研究中心、蒙大拿大学和 National Center for Atmospheric Research 的科学

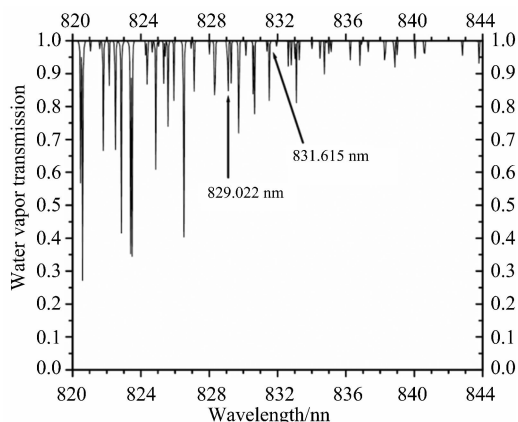


图 8 用 HiTRAN-PC 计算通过 1 km 路径随波长变化的水平透过率

Fig. 8 A plot of the horizontal path transmission calculated using HiTRAN-PC through a 1 km pathlength as a function of wavelength accessible by the DIAL transmitter

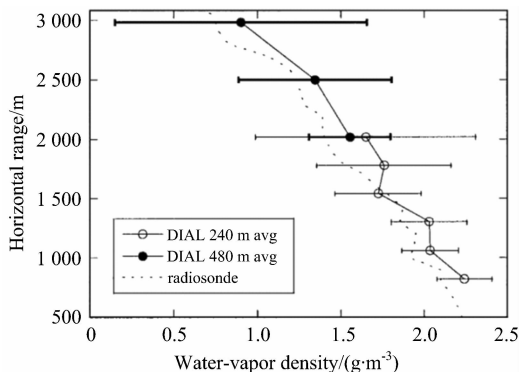


图 9 2003 年 3 月 12 日晚上 19:04 CODI 差分吸收激光雷达垂直廓线和无线电探空所得到的数值, 30 min 数据平均

Fig. 9 Comparison of a nighttime vertical CODI DIAL profile with radiosonde-derived values. Measurements were taken at 19:04 on 12 March 2003. The DIAL data are a 30-min average

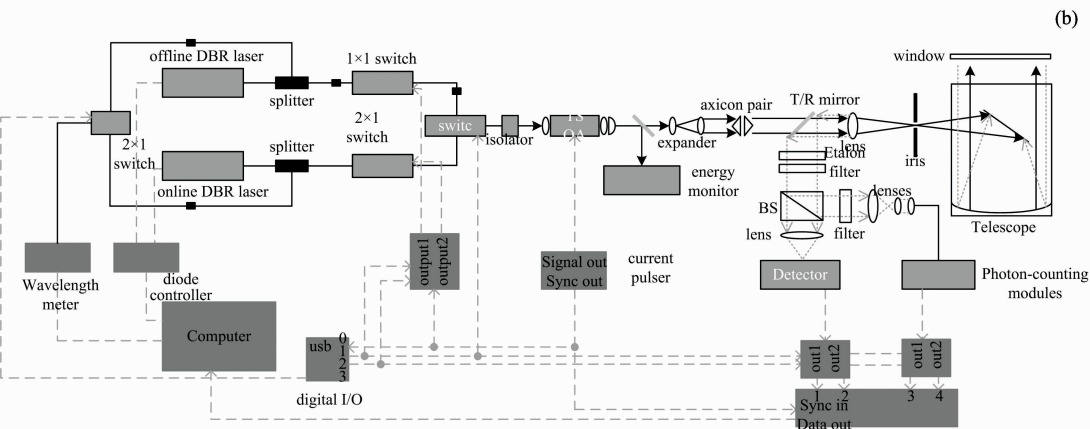
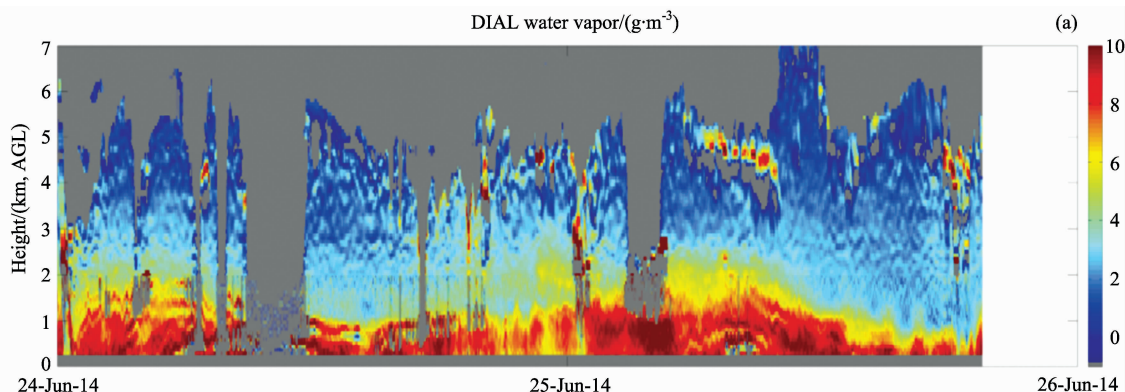


图 10 水汽探测微脉冲差分吸收激光雷达系统

(a): 地面到云底水汽信号; (b): 水汽探测微脉冲差分吸收激光雷达系统

Fig. 10 Schematic of the WV-DIAL system

(a): Water vapor ($g \cdot m^{-3}$) showing water vapor signal from the surface up to cloud based without ringing; (b): Schematic of the WV-DIAL system
TSOA; Tapered semiconductor optical amplifier; DBR; Distribute Bragg reflectors; T/R; Transmitter/receiver; I/O; Input/output; BS; Beam splitter

家研制 828~830 nm 波段的微脉冲大气水汽探测差分吸收激光雷达的进展,已经发展到第四代产品^[15-18]。脉冲宽度 900 ns~1 μ s, 脉冲能量 5~10 μ J, 脉冲重复频率 9~10 kHz, 望远镜直径 406 mm, 探测波长 online 和参考波长 offline 锁定绝对精度 ± 0.2 pm, 重复性 ± 0.03 pm。扩束和接收共用同一个望远镜, 探测器为盖格光子计数模式的雪崩二极管, 探测的水汽的垂直分布如图 10 所示。创下了 50 天时间内无人干预下自动工作的记录。

4 935 nm 差分吸收激光雷达

早在 1998 年, Ehret 等德国 DLR(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)的科学家就开发了种子注入的 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 泵浦 KTP 非线性晶体组成的光参量振荡器^[19]。在 935 nm 附近输出单纵模窄带的脉冲激光, 用以差分吸收激光雷达探测大气水汽廓线(图 12), 不仅泵浦激光用种子注入, 光参量振荡器的谐振腔也用连续波半

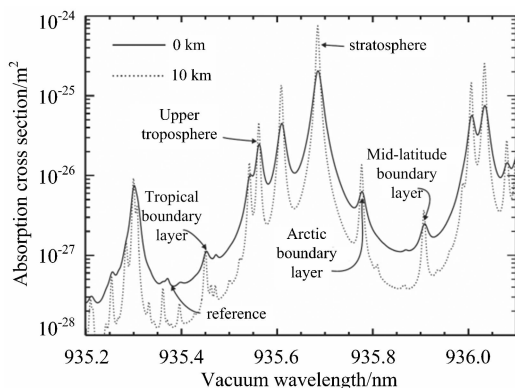


图 11 水汽的吸收谱线, 吸收截面数据来源于 HITRAN 2006, 海平面处和 10 km 高度处美国标准大气模式下的数值

Fig. 11 H₂O vapor absorption lines. Absorption cross section data calculated from HITRAN 2006 for sealevel conditions and at 10 km altitude using the US-standard atmosphere

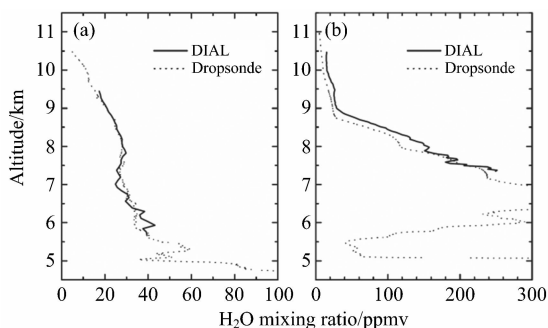


图 12 差分吸收激光雷达和下投探空仪检测水汽廓线的比较

Fig. 12 Comparison of vertical water vapor profiles measured by the DIAL and drop sondes

导体激光种子注入, 这个波段水汽的吸收线比较强(图 11), 因此更适合机载飞行试验探测^[20], 更有利于对流层上半部分和平流层底部干燥区域大气水汽探测。935 nm 差分吸收激光雷达已经成功地应用于大气边界层水汽通量的研究, 这一水汽差分吸收激光雷达 1999 年开始运行探测结果如图 12 所示, 定期在欧洲、北非、美国和澳大利亚的各个科学任务之间飞行, 一直到 2006 年。

2009 年报道的成果为, 脉冲能量达到 45 mJ, 脉冲重复频率 100 Hz, 脉冲宽度 5.5 ns, 线宽 ≤ 150 MHz, 光频稳定性 < 20 MHz, 光谱纯度 99.9%, 借助于高精度波长计作为光鉴频(波长)器, 闭环控制发射机的工作波长。望远镜口径 480 mm, 采样频率 10 MHz, 采样精度 14 bit, 滤光片带宽 1 nm^[21]。

Fibertek Inc. 公司研发了单频、波长稳定的 935 nm 激光发射机^[22], 用于 NASA 机载水汽差分吸收激光雷达, 这一系统将搭载于 ER-2 或 UAV。其特色在于用 PDH (Pound-Drever-Hall) 反馈控制环锁定光参量振荡器的谐振腔腔长。DFB 半导体激光器种子注入, 此波段水汽吸收线较强(见图 11)。输出能量 3~5 mJ, 重复频率 1 kHz, 线宽 0.2 pm (68 MHz), 波长稳定性 0.1 pm。

除了光参量振荡器而外, 德国 Fraunhofer Institut für Lasertechnik 的科学家 Jens Löhning 等^[23], 以及 Institut für Physik der Atmosphäre 的科学家 Fix 等^[24], 还在研究基于 Nd:YGG(Y₃Ga₅O₁₂)晶体的全固态激光器, 脉冲能量已经达到 30 mJ, 重复频率 100 Hz, 光束质量因子 M² 优于 1.4, 脉冲时间宽度 52.5 ns。它的优点是比光参量振荡器更紧凑、更可靠; 其缺点是调谐范围小, 目前还不能适应不同垂直高度大气水汽浓度差别大, 需要 3 个不同的波长(1 nm 之内)、分高度探测的特殊性。

5 空间 WALES 探测计划

2004 年, 欧洲空间局 ESA 公布 WALES (Water Vapor Lidar Experiment in Space) 空间计划, 2008 年, Paolo Di Girolamo 等德国和意大利的科学家发表了他们关于该计划的模拟研究结果^[25]。激光器的波长 $\lambda_1 = 935.685$ nm, $\lambda_2 = 935.561$ nm, $\lambda_3 = 935.906$ nm, 前面三个波长分别适用于水汽含量不同高度(如图 13 所示)的探测, 参考波长 $\lambda_4 = 935.852$ nm, 脉冲能量需求 75 mJ^[26] 以上, 波长精度要求 < 60 MHz, 激光线宽要求 < 160 MHz, 脉冲时间宽度 < 100 ns, 脉冲(每个波长)重复频率 25 Hz, 望远镜口径要求 2.0 m, 发射视场 65 μ rad, 接收视场 105 μ rad, 轨道高度预计 400 km, 白天滤光片 0.4 nm, 夜晚滤光片 1.0 nm, 垂直分辨率可达 1.0 km(对流层下半部)~1.5 km(其他高度), 水平分辨率可分别达 25(对流层下半部), 100, 150 和 200 km, 随机误差(准方差 1 σ)20%, 偏差(bias) $< 5\%$ 。迄今为止, 这一计划是难度最大的人类对地遥感计划之一。

6 水汽差分吸收激光雷达的共性技术

(1) 发射机工作波长的稳定十分重要而棘手, 以窄带连

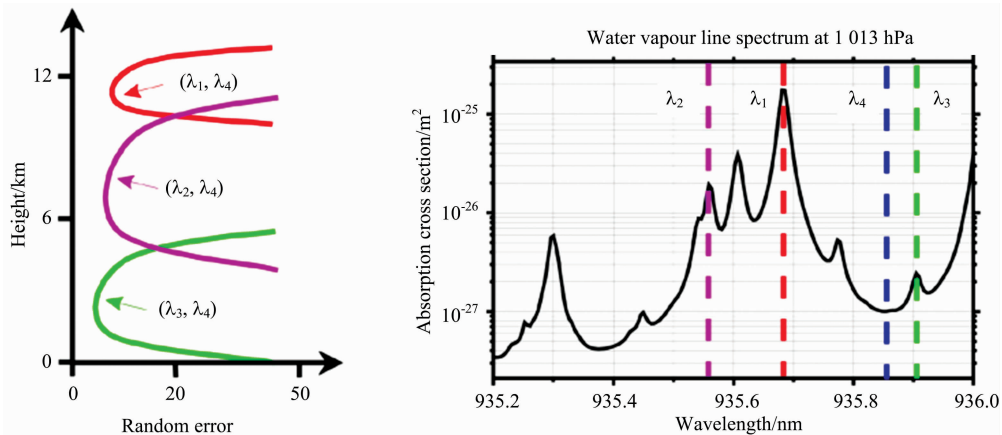


图 13 WALES 差分吸收激光雷达发射机以四个不同的波长不同的吸收截面工作

Fig. 13 The DIAL transmitter of the WALES instrument will operate at four different wavelengths with different absorption cross sections

续波种子激光注入脉冲激光器的谐振腔锁定其的腔长, 首先对窄带连续波种子激光的波长进行主动稳频。主动锁频的主流方法有两种, 一种以水汽的多通道光吸收池为参照标准, 采取 PDH (Pound-Drever-Hall) 方法^[27] 或 Lock-In 方法^[28], 将种子激光的波长锁定在水汽的某个强吸收线上; 另一种以 R_b 原子共振吸收光谱线的标准波长 780 nm 激光, 或者 628 nm 稳频的 HeNe 激光作为基准, 去标校高精度波长计, 再以此高精度波长计 (High Finesse WS7) 作为误差获取工具, 检测到种子激光波长的误差送给 PID (比例-积分-微分) 伺服控制环, 负反馈调整种子激光器的注入电流或腔长的压电电压^[29]。

(2) 在理想大气模型里, 分子运动速度呈现麦克斯韦分布, 来源于大气分子的 Rayleigh 后向散射总会表现出相当明显的 Doppler 展宽, 它可以与水汽吸收线的宽度相比拟, 不能忽略^[11]。需要仔细考虑水汽吸收光谱和大气分子 Rayleigh 后向散射光谱的线型, 对吸收截面 σ_{on} 和 σ_{off} 加以必要修正。水汽的吸收截面还受到大气温度、大气压力的影响, 即在不同高度吸收截面要给出不同的数值。

(3) 水汽是大气中随高度变化梯度最大的组分, 水汽绝大部分都集中在边界层, 含量随高度上升大幅度衰减, 超过对流层之后, 更是衰减为很小的浓度。它在大气中的混合比随高度变化极大, 回波的分通道检测十分必要, 近场通道检测水汽浓度特别大的底层大气回波, 远场通道再检测其他高度的大气回波。

References

- [1] Claus Weitkamp. Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Springer Science Business Media Inc., 2005, 7.
- [2] Claus Weitkamp. Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Springer Science Business Media Inc., 2005, 218.
- [3] Browell E V, Wilkerson T D, McIlrath T J. Applied Optics, 1979, 18(20): 3450.
- [4] Patrick Ponsardin, Noah S Higdon, Benoist E Grossmann, et al. Applied Optics, 1994, 33(27): 6439.
- [5] Noah S Higdon, Edward V Browell, Patrick Ponsardin, et al. Applied Optics, 1994, 33(27): 6422.
- [6] Wulfmeyer V, Bösenberg J, Lehmann S, et al. Optics Letters, 1995, 20(6): 638.
- [7] Didier Bruneau, Philippe Quaglia, Cyrille Flamant, et al. Applied Optics, 2001, 40(21): 3450.

7 水汽差分吸收激光雷达发展趋势

(1) 720~730 nm 波段的水汽差分吸收激光雷达将会淡出, 因为大气分子对光束的 Rayleigh 后向散射 Doppler 展宽与波长成反比, 720~730 nm 波段的 Doppler 展宽大于 815~820 nm 的 Doppler 展宽, 因而前者误差会大于后者, 在国际上翠绿宝石 (Alexandrite) 激光器的成熟度和普及性也差于钛宝石 (Ti: sapphire) 激光器, 815~820 nm 的水汽差分吸收激光雷达完全会代替 720~730 nm 波段的水汽差分吸收激光雷达。

(2) 如同大气气溶胶分布, 大气二氧化碳的浓度, 若国际气象组织或其他国际合作组织建立全球水汽观测网络, 那么 830 nm 波段的微脉冲差分吸收雷达将是最好的选择, 因为微脉冲激光雷达人眼安全、功耗低、无需人员值班、价格相对低廉, 符合广域化、网络化布置的要求, 对于大气边界层物理的研究具有鲜明的科学价值。

(3) 在空间对地观测方面, 卫星平台上或者空间站上布置水汽差分吸收激光雷达, 显然 930~940 nm 波段差分吸收激光雷达比较合适, 因为这个波段可以安排多个相近的波长、吸收截面的数值呈梯度化分布, 符合大气水汽不同高度浓度差别化的要求, 观测对流层顶-平流层底水汽的交换对于全球变化研究尤其具有重大科学意义。

- [8] Didier Bruneau, Philippe Quaglia, Cyrille Flamant, et al. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3462.
- [9] Gerd Wagner, Andreas Behrendt, Volker Wulfmeyer, et al. *Applied Optics*, 2013, 52(11): 2454.
- [10] Andreas Behrendt, Volker Wulfmeyer, Andrea Riede, et al. *Proc. of SPIE*, 2009, 7475: 74750L.
- [11] Hannes Vogelmann, Thomas Trick. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2116.
- [12] Janet L Machol, Tom Ayers, Karl T Schwenz, et al. *Applied Optics*, 2004, 43(15): 3110.
- [13] Alex Dinovitser, Murray W Hamilton, Robert A Vincent. *Applied Optics*, 2010, 49(17): 3274.
- [14] Alex Dinovitser, Lachlan J Gunn, Derek Abbott. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22907.
- [15] Michael D Obland, Kevin S Repasky, Amin R Nehrir, et al. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4: 043515.
- [16] Amin R Nehrir, Kevin S Repasky, John L Carlsten. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25137.
- [17] Spuler S M, Repasky K S, Morley B, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2015, 8: 1073.
- [18] Scott Spuler, Tammy Weckwerth, Kevin Repasky, et al. *Light, Energy and the Environment Congress* © Optical Society of America, 2016.
- [19] Ehret G, Fix A, Weiß V, et al. *Appl. Phys. B*, 1998, 67: 427.
- [20] Poberaj G, Fix A, Assion A, et al. *Appl. Phys. B*, 2002, 75: 165.
- [21] Wirth M, Fix A, Mahnke P, et al. *Appl. Phys. B*, 2009, 96: 201.
- [22] Ti Chuang, Brooke Walters, Tim Shuman, et al. *Proc. of SPIE*, 2015, 9342: 93420J.
- [23] Jens Löhning, Ansgar Meissner, Valentin Morasch, et al. *Proc. of SPIE*, 2009, 7193: 71931Y.
- [24] Fix A, Ehret G, Löhning J, et al. *Appl. Phys. B*, 2011, 102: 905.
- [25] Paolo Di Girolamo, Andreas Behrendt, Christoph Kiemle, et al. *Gerhard Ehret*, 2008, 112: 1552.
- [26] Takashi Fujii, Tetsuo Fukuchi. *Laser Remote Sensing*. CRC Press, 2005. 854.
- [27] Eric D Black. *Am. J. Phys.*, 2001, 69(1): 79.
- [28] Matthey R, Schilt S, Werner D, et al. *Appl. Phys. B*, 2006, 85: 477.
- [29] Florian Späthn, Simon Metzendorf, Andreas Behrendt, et al. *Optics Communications*, 2013, 309: 37.

Summarization of Differential Absorption Lidar for Profiling Atmospheric Water Vapor Overseas

HONG Guang-lie¹, LI Jia-tang², KONG Wei^{1*}, SHU Rong¹

1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Water vapor is one of the basic atmospheric parameters, and the vertical structure of the atmosphere is of great importance to process studies. Differential absorption lidar is the techniques which provide high resolution and accuracy for water vapor profiles daytime and nighttime, and that is the most potential instrument. Differential absorption lidar (DIAL) operates in the 720~730 nm region of the 4ν overtone vibrational bands of H_2O where previous using tunable dye, or Alexandrite ring laser injection seeded, however, photomultiplier acts as detector. The represent is airborne lidar LEANDRE II. And the DIAL transmitter is based on an injection-seeded, Ti:Sapphire laser or Ti:Sapphire amplifier operated at 820 nm, Si-APD act as detector. University Hohenheim mobile lidar can perform the measurements of the 3-dimensional structure of the water vapor field from 300 m to 4 km altitude. The high-power DIAL at the Schneefernerhaus research station has successfully demonstrated its measurement capabilities of vertical structure of water vapor from 3 to 12 km above sea level. The development of an OPO at 935 nm in the spectral region of the 3ν overtone vibrational band of H_2O was stimulated by the need to develop an airborne water vapor DIAL with high measurement sensitivity at tropopause height, particularly in case of very dry air from the lower stratosphere. In this 935 nm wavelength range, the line strengths of suitable water vapor absorption lines are more than a magnitude higher than near 720 nm or 830nm. Based on single-frequency, a diode-pumped Nd:YGG laser system or optical parametric oscillator emitting at 935 nm, differential absorption lidar has recently been developed to space borne measures water vapor profile of upper troposphere/lower stratosphere (UTLS) region. DBR diode laser and semiconductor optical amplifier as transmitter, APD as Geiger counter, micro-pulse DIAL for measuring water vapor in the lower troposphere has been developed and validated at field campaigns, and the fourth generation product has been constructed and tested. The application required a single-frequency laser transmitter operating at near infrared region of the water vapor absorption spectrum, capable of being on/off wavelength seeded

and locked to a reference laser source for DIAL measurements. The system is based on extended-cavity diode lasers and distributed-feedback lasers. It is achieved by locking the laser wavelength to a water vapor absorption line using compact water-vapor reference cells. or the wavemeter readout for frequencies of laser1 or laser 2 counts as the error signal, product of the error signal and the PID adds as a correction to the applied voltage on the piezo controllers and injection current to tune more stably and smoothly frequencies of the diode laser. Second, precise knowledge of spectral properties of water vapor absorption, laser emission, and atmospheric scattering is necessary. However, to get high accuracy one has to consider methods of treating the problem of Doppler-broadened Rayleigh back scattering and correcting absorption section of water vapor in DIAL experiments. At last, the backscatter signal in the near-field channel rapidly drops to a level at which the results are affected by noise and electromagnetic interference. So the matching of near- and far-field channels in the lower part of the operating range with both detection channels is necessary.

Keywords Differential absorption lidar; Water vapor; Optical frequency stabilization; Rayleigh Doppler-broadening

(Received Dec. 7, 2017; accepted Apr. 30, 2018)

* Corresponding author

《光谱学与光谱分析》期刊社决定采用 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统

《光谱学与光谱分析》期刊社与汤森路透集团签约,自 2010 年 12 月 1 日起《光谱学与光谱分析》决定采用 Thomson Reuters 旗下的 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统。

- ScholarOne Manuscripts, 该系统不仅能轻松处理稿件,而且能提速科技交流。
- 全球已有 360 多家学会和出版社的 3 800 多种期刊选用了 ScholarOne Manuscripts 系统作为在线投稿、审稿平台,全球拥有超过 1 350 万的注册用户,代表着全球学术期刊在线投审稿的一流水平。
- ScholarOne Manuscripts 与 EndNote, Web of Science 无缝链接和整合;使科研探索、论文评阅和信息传播效率大为提高。
- ScholarOne Manuscripts 是汤森路透科技集团的一个业务部门,拥有丰富的学术期刊业务经验,为学术期刊提供综合管理工作流程系统,使期刊更有效管理投稿、同行评审、加工和发表过程,提高作者心中的专业形象,缩短论文发表时间,削减管理成本,帮助期刊提高科研绩效和实现学术创新。

《光谱学与光谱分析》采用“全球学术期刊首选的在线投稿审稿系统—ScholarOne Manuscripts”,势必对 2010 年 11 月 30 日以前向本刊投稿的作者在查阅稿件信息时,会带来某些不便,在此深表歉意!为了推进本刊的网络化、数字化、国际化进程,以实现与国际先进出版系统对接;为了不断提高期刊质量,加快网络化、数字化建设,加快与国际接轨的进程,希望能得到广大作者、读者们的支持与理解,对您的理解和配合深表感激。这是一件新事物,肯定有不周全、不完善的地方,让我们共同努力,不断改进和完善起来。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2010 年 12 月 1 日