

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0289-04

1.315 μm 波长附近高分辨率实际大气吸收光谱 测量研究*

魏合理 邬承就 龚知本

(中国科学院安徽光学精密机械研究所国家 863 计划大气光学重点实验室, 合肥 230031)

提要 用窄线宽、脉冲可调谐光参量振荡器(OPO)作光源,使用光程长达 1097 m 的怀特池,采用单探测器分时复用的探测方法,首次在吸收池中精确测量了实际大气中 1.315 μm 波长附近高分辨率吸收光谱,实验验证了实际大气中水气是该波段的主要吸收气体;得到了实际大气中吸收分子在碘激光波长(7603.14 cm^{-1})处的吸收截面为 $(1.05 \pm 0.09) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ (标准大气条件下)以及在该波段主要吸收谱线的参数。并计算了碘激光波长附近大气分子的吸收截面。

关键词 高分辨率光谱, 大气吸收, OPO, 怀特池

中图分类号 TN012 **文献标识码** A

Measurement of High-resolution Absorption Spectra of Real Atmosphere at 1.315 μm

WEI He-li WU Cheng-jiu GONG Zhi-ben

(Key Laboratory for Atmospheric Optics of National High Technology Research and Development Plan,
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract The high-resolution absorption spectra of real atmosphere near the 1.315 μm wavelength were recorded accurately using an experimental system. The system includes a tunable narrow-line-width pulsed OPO laser, a multipass absorption cell of the White-type with total optical length as long as 1097 m, and a single time-division multiplexing fast-response detector system. It is verified from the spectra that water vapor is the main absorption gas in the wavelength band. The absorption cross-section of atmospheric absorption molecule at the wavelength of iodine laser (7603.14 cm^{-1}) was gotten from the measurement data which is $(1.05 \pm 0.09) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ (at the standard atmospheric condition). And the parameters of atmospheric absorption lines were also obtained around the wavelength of 1.315 μm from the measured spectra. The absorption cross-sections of atmospheric absorption molecule near the wavelength of iodine laser were also calculated from the measurement parameters.

Key words high-resolution spectroscopy, atmospheric absorption, OPO, White cell

1 引 言

光波在大气中传播时要受到大气分子的吸收,大气分子的吸收有极强的波长选择性,因此,在实际工程应用中特别需要高光谱分辨率的大气吸收数据。碘激光(波长为 7603.14 cm^{-1})的出现使人们特别关心该波段的高分辨率大气吸收光谱特性。Bragg^[1,2]用高分辨率傅里叶变换光谱仪(FTS)在光程为 88.4 m 的怀特池中测量了水气在该波段的主

要吸收线参数,并据此用 Voigt 线型计算得到碘激光波段的吸收截面。Toth^[3]使用光程为 433 m 的吸收池测量了水气的谱线强度和位置,但没有给出谱线宽度。

上述测量都是用非相干的普通红外辐射源作为光源,且受怀特池光程长度的限制,探测灵敏度不可能很高,因此,不可能测量实际大气的吸收。为此,本文用窄线宽、脉冲可调谐光参量振荡放大器(OPO)激光为光源,把经过滤膜滤除大气气溶胶后的实际大气引进公里级怀特型吸收池,测量了该波段约 15 cm^{-1}

* 国家 863 计划激光技术主题(863-410-6)资助课题

范围内实际大气的吸收。实验验证了该波段实际大气分子的吸收主要是水气分子的吸收,得到了此波长范围内大气吸收分子的主要吸收线的位置、线强度、压力加宽系数等参数,并以此计算了 $1.315 \mu\text{m}$ 波长附近大气中吸收分子的吸收截面。

2 实验装置及测量原理

2.1 实验装置

装置示意图如图 1 所示,包括怀特型公里级长光程吸收池、可调谐激光光源、光学耦合系统、信号探测和数据采集处理等部分。光源采用 Nd:YAG 激光器抽运的脉冲可调谐光参量振荡器及其红外扩

展器,单模运转时产生的傅里叶变换受限脉冲宽度为 4 ns ,可覆盖可见到近红外波段,在 $1.3 \mu\text{m}$ 波段输出激光线宽约为 0.03 cm^{-1} 。吸收池为怀特型,池体长 7.726 m ,通过多次反射最大光程可达 1097 m 。在近红外波段用快响应的锗探测器来探测脉冲激光辐射。我们采用分时复用的单探测器探测方法,它避免了常规的双探测器测量透过率时由于探测器性能差异、信号同步等因素引起的误差,同一探测器采集来自同一个激光脉冲经过距离延迟 (1097 m , 约 $3.66 \mu\text{s}$) 的两个信号比值的方法消除了激光能量起伏的影响。

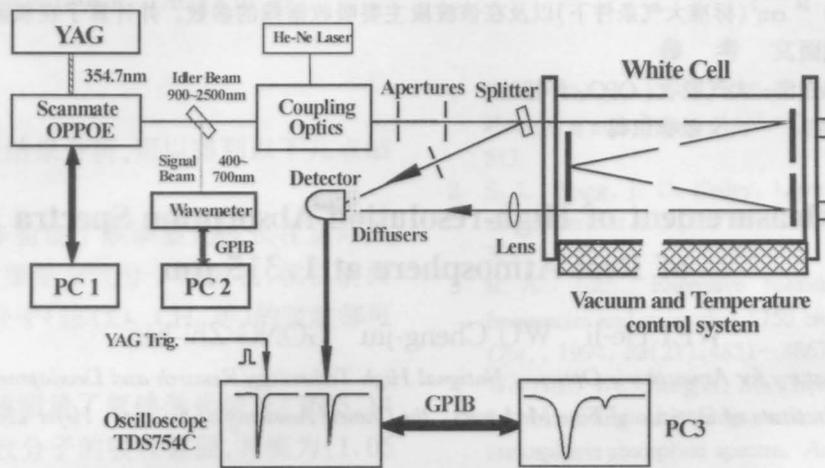


图 1 大气分子吸收光谱实验系统

Fig. 1 The experimental setup of atmospheric molecule absorption spectroscopy system

实验时先将怀特池的气压抽成低于 0.13 Pa 的真空,此时用聚四氟乙烯管把室外的实际大气缓缓引入吸收池,直到吸收池中的压强接近一个大气压。在充气过程中,用滤膜滤除大于 $0.2 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子,从而保证大气透过率的测量值只是由于大气分子吸收引起的。

2.2 数据处理和谱线参数计算

实际测量的吸收光谱不但与分子种类有关,而且与气压和温度有关。经过处理可以获得表征分子吸收特征的谱线参数:各线的中心频率、线强度、压力加宽半宽度等,其过程包括根据谱线线型进行数据拟合,得出每条谱线的强度和半宽度,并根据测量时的气压和温度,换算成参考状况下的线强度和压力加宽半宽度。有了这些参数就可以计算其他条件下该分子的吸收。

由于激光输出谱线具有一定的线宽,处理时要考虑其影响,因此首先假定激光线宽为具有宽度为 0.03 cm^{-1} 的 Gauss 函数,采用非线性拟合退卷积法

扣除其影响^[4],进一步提高测量的光谱分辨率。

根据分析,谱线位置测量误差大约为 $\pm 0.02 \text{ cm}^{-1}$,线强度的测量误差一般不超过 $\pm 9\%$,谱线宽度的测量误差不大于 $\pm 15\%$ 。

3 高分辨率大气分子吸收光谱和吸收线参数

图 2 是在吸收池中实际测量的大气分子吸收光谱,测量时的条件分别为:气压 $9.865 \times 10^4 \text{ Pa}$,温度 298.5 K ,水气分压力 1448 Pa ,吸收池的光程长 1097 m 。用 Hitran96 中水气分子的谱线参数^[5]根据当时的状况模拟计算了水气分子的吸收(见图中点线)。

从图 2 可以看出,在实际大气中能测到的吸收线全部是大气水气分子的吸收谱线。可见实际大气中该波段的分子吸收主要是水气,其他如 CO_2 , CH_4 等气体分子的吸收完全可以忽略。因此,本文提到

的该波段的大气吸收分子即指大气中的水气分子。

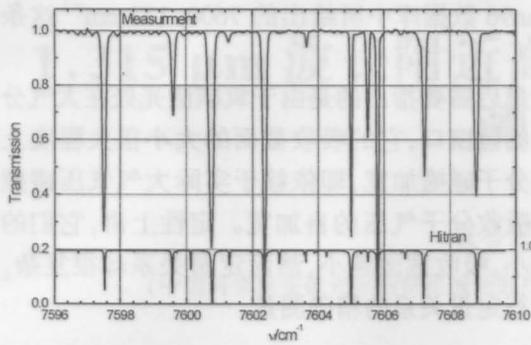


图2 测量的怀特池中 1.315 μm 附近大气吸收光谱

Fig. 2 The atmospheric absorption spectra near 1.315 μm measurement in White cell

需要指出的是在图 2 中没有发现 Hitran96 中的 7600.133 cm^{-1} 这条较强的水气吸收谱线。为了进一步证实这一结论,利用上述实验装置还测量了水气压为 1.33×10^3 Pa、温度为 299 K 的纯水气的高分辨率吸收光谱,见图 3(图中的测量数据进行了拟合和平滑),图 3 中还给出了利用 Hitran96 中水气吸收谱线计算的水气吸收光谱,同样在测量结果中未发现 7600.133 cm^{-1} 这条谱线,由此可见 Hitran96 数据中所给出的该条水气吸收谱线事实上可能是不存在的。

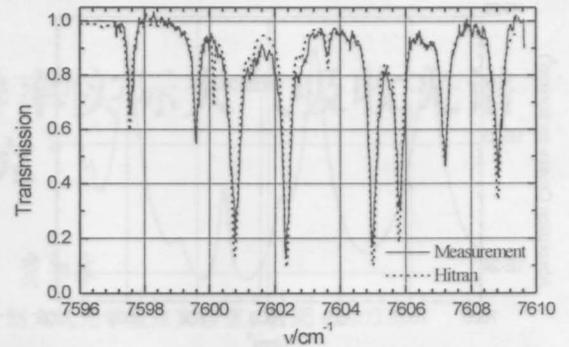


图3 1.315 μm 波段纯水气的高分辨率吸收光谱 (水气压为 1.33×10^3 Pa, 温度为 299 K)

Fig. 3 The high resolution absorption spectra of pure water vapor near 1.315 μm

为得到该波段内的吸收线的参数,包括吸收线强和半宽度,本文用非线性最小二乘拟合法对退卷积后的测量光谱进行拟合,并根据当时温度和气压换算到标准状态下 ($T_0 = 296$ K, $P_0 = 101.32$ kPa) 吸收线的强度 S_0 和空气压力加宽系数 γ_0 ,见表 1。在表中也列出了 Hitran96 在该波段范围内有关的水气吸收谱线参数和 Toth 等测量的谱线强度。

从表 1 可以看出:谱线强度除了 7599.576 cm^{-1} 线以外,三者差别在实验误差范围内;而对空气压力加宽系数两者的差别一般在 15% 以内。

表 1 测量的 1.315 μm 波段大气中吸收分子的吸收线强度和空气压力加宽半宽度

Table 1. The line intensity and air-broadened half-width of atmospheric absorption molecule near 1.315 μm

ν_0/cm^{-1}	$S_0/\text{cm}^{-1}/(\text{molecule cm}^{-2})$			$\gamma_0/\text{cm}^{-1}/\text{atm}$	
	Measurement	Hitran	Toth	Measurement	Hitran
7597.5343	2.99×10^{24}	2.75×10^{24}	2.75×10^{24}	0.066	0.0646
7599.576	4.09×10^{24}	3.280×10^{24}	3.27×10^{24}	0.078	0.0758
7600.133	(None)	6.900×10^{25}		(None)	0.0227
7600.773	1.44×10^{23}	1.420×10^{23}	1.43×10^{23}	0.104	0.0876
7601.295	(Weak)	$6.92e^{25}$	6.88×10^{25}		0.0778
7602.351	1.35×10^{23}	1.260×10^{23}	1.25×10^{23}	0.071	0.0644
7602.815	(Weak)	6.220×10^{25}	6.21×10^{25}		0.0833
7603.625	(moderate)	3.830×10^{25}	4.47×10^{25}		0.0282
7604.998	1.36×10^{23}	1.340×10^{23}	1.30×10^{23}	0.082	0.0710
7605.797	9.03×10^{24}	9.490×10^{24}	9.23×10^{24}	0.076	0.0683
7607.188	5.53×10^{24}	5.690×10^{24}	5.95×10^{24}	0.088	0.0993
7608.818	7.34×10^{24}	7.820×10^{24}	8.22×10^{24}	0.102	0.0902

4 大气吸收分子的吸收截面

图 4 根据实际大气中测量的参数,计算了温度为 296 K,气压为 1.013×10^5 Pa 时的大气吸收分子在 $7600 \text{ cm}^{-1} \sim 7606 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的吸收截面。图

中所标位置为氧碘激光的输出波长。从中可以看出氧碘激光波长 (7603.14 cm^{-1}) 是一个比较好的大气微窗口,其吸收截面为 $(1.05 \pm 0.09) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ 。但它并不是该波段大气吸收最小的波长。最小吸收波长分别位于 7603.31 cm^{-1} 和 7603.93 cm^{-1} , 它的吸收截面比氧碘激光波长约小 15%。

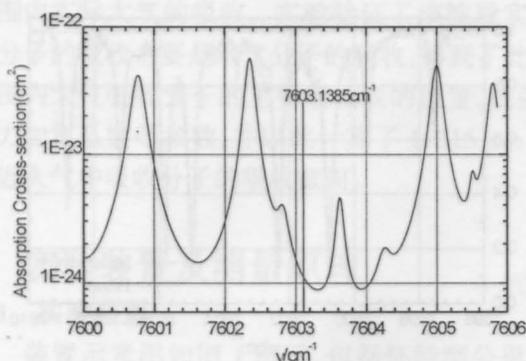


图4 计算的296 K、 1.013×10^5 Pa时的大气中吸收分子的吸收截面

Fig. 4 The calculated absorption cross-section by atmospheric absorption molecule (296 K, 1.013×10^5 Pa)

5 结 论

根据上述测量结果分析,可以得到以下几点结论:

1) 实验进一步验证了氧碘激光波长在实际大气中的分子吸收主要是水气分子的吸收,就目前测量精度而言,其他分子(如 CO_2 、 CH_4 等)的吸收都可以完全忽略不计。

2) 比较精确地测量了氧碘激光波长(7603.14 cm^{-1})实际大气吸收分子的吸收截面,其值为 $(1.05 \pm 0.09) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ (标准大气条件)。

3) 氧碘激光波长确实处在该波段较好的大气微窗口,但并不处在吸收最小的微窗口,吸收最小的波长分别位于 7603.31 cm^{-1} 和 7603.93 cm^{-1} ,其值为 $(8.9 \pm 0.8) \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ 。

4) 无论是实际大气还是纯水气测量,都未发现 Hitran96 数据库中所给出的 7600.133 cm^{-1} 这条谱线。

最后需要指出的是由于氧碘激光处在大气分子吸收的微窗口,它的吸收截面的大小很大程度上取决于分子碰撞加宽,即依赖于实际大气气压碰撞加宽和吸收分子气压的自加宽。定性上讲,它们的气压越小,吸收截面越小,然而定量关系却很复杂,必须进行定量关系的精确测量。

感谢 参加本工作的还有马志军、袁恽谦、曹百灵等同志。

参 考 文 献

- 1 S. L. Bragg, J. D. Kelley. Atmospheric water vapor absorption at $1.3 \mu\text{m}$. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3):506~513
- 2 S. L. Bragg, J. D. Kelley. Laser beam propagation in the atmospheric at $1.3 \mu\text{m}$. *Proc. SPIE*, 1990, **1221**:363~369
- 3 R. A. Toth. Extensive measurements of H_2^{16}O line frequencies and strengths: $5750 \text{ cm}^{-1} \sim 7965 \text{ cm}^{-1}$. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(21):4851~4867
- 4 Wei Heli, Wu Chengjiu, Ma Zhijun *et al.*. A new method for improving the measurement spectral resolution of atmospheric absorption spectra. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(2):165~169(in Chinese)
- 5 L. S. Rothman, C. P. Rinsland, A. Goldman *et al.*. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS: 1996 edition. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1998, **60**(5):665~710