

文章编号: 0253-2239(2003)04-0496-05

## 碘激光的大气衰减特性\*

曹百灵 郭承就 魏合理 袁恂谦 马志军 孙 明 龚知本

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 碘激光波长处在大气微窗口,水汽分子的吸收是碘激光在大气中传输时衰减的主要原因。利用 HITRAN 数据库,计算了碘激光波长模式的大气衰减情况。利用高分辨率光谱实验系统,获得了 1.315  $\mu\text{m}$  附近的谱线参量。在我国,由南向北,由夏到冬,水汽浓度逐渐减少,水汽分子的吸收率递减。碘激光有 6 条超精细谱线,单一最强线频率的碘激光的大气分子吸收比多谱线的碘激光小,更有利于大气传输。在中纬度夏季,单一最强线垂直向上全程的大气分子吸收率与多谱线碘激光水平传输 1 km 相当,为 9.0%。碘激光垂直向上传输比海平面水平传输受大气影响小。

**关键词:** 大气光学; 碘激光; 激光大气传输; 水汽分子吸收光谱

中图分类号: O433.1 文献标识码: A

### 1 引 言

最近 10 多年来,化学氧碘激光器(COIL)和脉冲光解碘激光器(PIL)的发展速度很快<sup>[1,2]</sup>,因它们的工作机理都和碘原子有关,所以简称为碘激光器。碘激光器的波长在 1.315  $\mu\text{m}$  附近,适合在大气中传输。由于其功率放大的可行性和输出连续波激光的稳定性都已得到一定的验证,碘激光器在诸多领域有着极好的应用前景。本文计算碘激光在大气中传输时的衰减情况,讨论影响衰减的主要因素,特别是大气传输对碘激光的超精细结构对其在大气中传输的影响。

### 2 碘激光的超精细结构

化学氧碘激光器是利用化学反应产生高浓度的长寿命亚稳激发态(单态)氧分子,共振传能给基态

碘原子,使其激发而产生激光。光解碘激光器是利用光能分解含碘化合物(如  $\text{CH}_3\text{I}$ 、 $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$  等)而出现激发态碘原子,产生激光。碘原子 1.315  $\mu\text{m}$  波长激光起源于 $^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$  态之间的磁偶极子跃迁,有 6 条超精细谱线,它们跃迁的波长和相对强度列于表 1<sup>[1,2]</sup>,表中吸收系数为多波长碘激光在中纬度夏季模式海平面 1 km 的计算结果。其中,最强线是(3 $\rightarrow$ 4)跃迁,真空波长为 1.315246  $\mu\text{m}$ ,对应波数为 7603.1385  $\text{cm}^{-1}$ 。测量氧碘激光器的小信号增益,得到了类似的相对增益强度分布<sup>[3]</sup>,但是实际的碘激光器的光谱强度分布并不一定如此。激光的谱线强度分布与激光器结构(尤其是腔的设计)和条件(如反应物质的压力、温度等)有关。例如,Schlie 和 Rathge<sup>[1]</sup>报道的光解碘激光器只有一条最强的超精细跃迁。氧碘激光器产生的激光也往往只含一条最强的谱线频率<sup>[3]</sup>。

Table 1. The characteristic of superfine lines in the transition of iodine

Transmission ( $F \rightarrow F'$ )	Wavenumber / $\text{cm}^{-1}$	Wavelength / $\mu\text{m}$	Relative intensity	Absorption coefficient / $\text{km}^{-1}$
2 $\rightarrow$ 3	7602.6202	1.315336	0.346	0.204
2 $\rightarrow$ 2	7602.6858	1.315325	0.432	0.161
2 $\rightarrow$ 1	7602.7105	1.315320	0.333	0.156
3 $\rightarrow$ 4	7603.1385	1.315246	1.000	0.044
3 $\rightarrow$ 3	7603.2794	1.315222	0.432	0.036
3 $\rightarrow$ 2	7603.3450	1.315211	0.123	0.035

\* 国家 863 激光技术领域资助课题。

E-mail: blcao@sina.com

收稿日期:2002-03-29; 收到修改稿日期:2002-05-15

### 3 碘激光大气传输基本情况

在详细讨论碘激光及其超精细结构的大气衰减特性之前,需要对大气传输的基本情况有所了解。

单色辐射的透过率  $\tau$  随路径长度  $\Delta l$  增加而呈指数衰减, 可用公式表述为

$$\tau = \exp(-\gamma\Delta l), \quad (1)$$

定义吸收率  $A = 1 - \tau$ 。衰减包括分子的吸收和散射、气溶胶的吸收和散射。消光(衰减)系数  $\gamma$  由 4 项组成:

$$\gamma = \kappa_m + \sigma_m + \kappa_a + \sigma_a, \quad (2)$$

$\kappa_m$  为分子吸收系数,  $\sigma_m$  为分子散射系数,  $\kappa_a$  为气溶胶吸收系数,  $\sigma_a$  为气溶胶散射系数, 其中, 分子吸收系数随波长的关系是一个很强的振荡函数, 而后三项系数随波长平滑地变化。

除了分子吸收系数  $\kappa_m$  是利用 HITRAN 数据库计算得到外, 1.315  $\mu\text{m}$  波长的各项衰减系数是从附近波长 1.06 和 1.536  $\mu\text{m}$  的已有数据通过内插法计算得到<sup>[4]</sup>。我们利用 HITRAN 数据库和通过内插法进行计算, 结果表明: 1.315  $\mu\text{m}$  波长水汽分子的散射系数(例如, 热带海平面约为  $3.35 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1}$ ) 比吸收系数(热带海平面约为  $4.36 \times 10^{-2} \text{ km}^{-1}$ ) 小 2~3 个数量级, 可以忽略。在海平面, 从晴朗大气模式(能见度 23 km)到霾雾大气模式(能见度 5 km), 1.315  $\mu\text{m}$  波长气溶胶吸收系数为

$$(2.24 \sim 10.9) \times 10^{-2} \text{ km}^{-1},$$

散射系数为

$$(5.44 \sim 26.5) \times 10^{-2} \text{ km}^{-1}.$$

二者相加, 气溶胶的消光系数在晴朗大气中约为  $7.68 \times 10^{-2} \text{ km}^{-1}$ ; 霾雾大气约为  $37.4 \times 10^{-2} \text{ km}^{-1}$ 。除气溶胶外, 激光衰减主要起因于大气中某些气体分子如  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  等对电磁辐射的选择吸收。本文主要讨论分子吸收引起的碘激光大气衰减情况。

由于碘激光具有的超精细光谱结构和其重要性, 人们特别关心碘激光波长附近的高分辨率大气吸收情况。我们测量了纯水汽、水汽加氮气、水汽加氧气、模拟大气和室内、外实际大气的一系列高分辨率吸收光谱<sup>[5]</sup>。结果表明, 大气主要成分  $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$  对碘激光没有吸收。在 1.315  $\mu\text{m}$  附近水汽有相当强的线吸收谱, 结论与前人的研究结果相同<sup>[4, 6~8]</sup>。此外, 虽然  $\text{CO}_2$ 、甲烷、氨等有很弱的吸收, 但是它们都比水汽吸收小 1~2 个量级。图 1 为一次引入怀特池内实际大气的吸收光谱, 图中给出了碘激光的超精细发射谱线以作比较。很明显, 在碘激光波长附近有相当强的水汽分子的吸收线。

图 2 为另一次引入怀特池内实际大气 1.315  $\mu\text{m}$  波段附近的吸收光谱, 用 HITRAN96 数据库模拟计算的结果作比较。

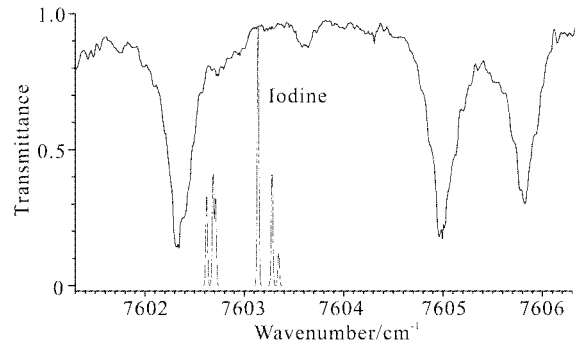


Fig. 1 The high resolution absorption spectra of real atmosphere near 1.315  $\mu\text{m}$ . ( $P_{\text{air}} = 9.865 \times 10^4 \text{ Pa}$ ,  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 1.448 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,  $T = 298.5 \text{ K}$ ,  $L = 1097 \text{ m}$ )

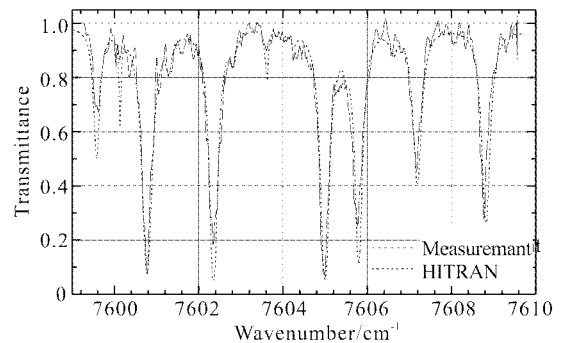


Fig. 2 The high resolution absorption spectra of real atmosphere near 1.315  $\mu\text{m}$ . ( $P_{\text{air}} = 9.73223 \times 10^4 \text{ Pa}$ , relative humidity=51%,  $T = 298.5 \text{ K}$ ,  $L = 1097 \text{ m}$ )

## 4 高分辨率下碘激光的大气吸收

### 4.1 高分辨率光谱实验得到的谱线参量

高分辨率下大气微窗口内的分子吸收系数非常小, 一般不能直接测量。我们利用高分辨率吸收光谱实验系统<sup>[3]</sup>, 首先测量一个波段的高分辨率分子吸收光谱(透过率谱), 如图 1 和图 2, 经过处理<sup>[9]</sup>得到分子的谱线参量: 各线的中心频率  $\nu_0$ 、线强度  $S_0$ 、压力加宽半峰值处的半宽度  $\gamma_0$  等, 其过程包括根据谱线线型进行数据拟合, 得出每条吸收谱线的强度和半峰值处的半宽度, 然后计算得出分子的线强度和压力加宽半峰值处的半宽度, 并根据当时的大气条件(温度、气压、湿度)换算为参考状况下的谱线参量, 再由这些参量根据公式

$$k(\nu) = sf(\nu - \nu_0) \quad (3)$$

计算特定条件下分子的吸收<sup>[5]</sup>。其中,  $s$  为吸收线强度,  $k(\nu)$  为吸收线在频率  $\nu$  处的吸收系数,  $f$  为吸收

线型,常用的有多普勒线型、洛伦兹线型和佛克脱线型<sup>[4]</sup>。洛伦兹线型主要适用于微波区、红外区、和高压情况的大多数气体的吸收谱线。实验中,光源在红外波段,引入怀特池的实际大气接近于 101325 Pa,所以在数据的分析和计算中使用洛伦兹线型是完全可以的<sup>[9]</sup>。一条洛伦兹线型(线的中心频率  $\nu_0$ ) 的吸收线在频率  $\nu$  处的吸收系数( $K_m$ ) 是

$$K_m = \frac{S\alpha}{\pi[(\nu - \nu_0)^2 + \gamma^2]}, \quad (4)$$

其中, $S$  为吸收线的积分线强度, $\gamma$  为线的半峰值处的半宽度。大气中若有多种分子产生的许多吸收线,

它们对吸收都有贡献,则吸收系数必须对每种分子( $j$ ) 的所有谱线( $i$ ) 求和:

$$K_m = \sum_j \sum_i \frac{S_{ij}\alpha_{ij}}{\pi[(\nu - \nu_{ij})^2 + \gamma_{ij}^2]}, \quad (5)$$

而特定条件下的透过率就可按(1) 式计算。

我们从测量实际大气( $P_{\text{air}} = 9.865 \times 10^4$  Pa,  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 1.448 \times 10^3$  Pa,  $T = 298.5$  K,  $L = 1097$  m) 的吸收光谱计算出的主要谱线参量列于表 2。与 HITRAN96 数据比较,大多数强线的线强度相对误差在 10% 以下,半峰值处的半宽度的误差稍大,在 12% 左右。

Table 2. The line intensity and air-broadened half-width of water vapor molecule near iodine laser lines

$\nu_0/\text{cm}^{-1}$	$S_0/[\text{cm}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})]$		$\gamma_0/(\text{cm}^{-1}/101325 \text{ Pa})$	
	Obs.	HITRAN	Obs.	HITRAN
7599.576	$4.09 \times 10^{-21}$	$3.280 \times 10^{-21}$	0.078	0.0758
7600.773	$1.44 \times 10^{-23}$	$1.420 \times 10^{-23}$	0.104	0.0876
7602.351	$1.35 \times 10^{-23}$	$1.260 \times 10^{-23}$	0.071	0.0644
7604.998	$1.36 \times 10^{-23}$	$1.340 \times 10^{-23}$	0.082	0.0710
7605.797	$9.03 \times 10^{-24}$	$9.490 \times 10^{-24}$	0.076	0.0683
7607.188	$5.53 \times 10^{-24}$	$5.690 \times 10^{-24}$	0.088	0.0993

线参量的测量误差主要分为随机误差和系统误差两部分,随机误差主要是测量时电、光起伏引起的随机噪声。由于每个波长点的测量都是经过 10~20 次平均,并且数据处理时采用最小二乘拟合可以消除绝大部分随机噪声,所以,随机误差对测量结果的影响并不大。系统误差来源于以下几个部分:激光器输出的光束质量(包括光束的非均匀性、发散性、方向漂移性)、频率稳定性、单色性、光电探测和数据采集的精度、参量拟合所用的模型带来的误差、水汽分子数密度的测量误差等。对谱线宽度测量来说,实验中激光输出的线宽约为  $0.03 \text{ cm}^{-1}$ ,主要是由于系统误差(如频率稳定性、单色性)的原因导致谱

线宽度的测量误差稍大。

#### 4.2 碘激光在不同传输模式下的衰减

激光垂直向上传输时,常把大气分为 33 层<sup>[4]</sup>。由于大气的气溶胶和水汽含量的垂直分布都是随高度增加而减小,显然,研究碘激光的垂直向上传输比研究海平面水平传输有利。我们分别计算了热带、中纬度夏季、中纬度冬季、亚北极夏季、亚北极冬季在晴朗(能见度为 5 km)、霾雾(能见度为 23 km)和仅水汽条件下碘激光最强线( $7603.1385 \text{ cm}^{-1}$ ) 的垂直全程(实际计算至 13 km,13 km 以上大气衰减极小)和海平面水平 10 km 路程透过率,结果如表 3。

Table 3. The transmittance of iodine laser main line in several model atmosphere

Path	Atmosphere	Tropical	MdLt-Sum	MuLt-Win	SbAr-Sum	SbAr-Win
Horizontal sea level (10 km)	Clear	26.5	31.0	42.3	36.0	45.06
	Hazy	1.36	1.59	2.17	1.84	2.31
	Water	57.2	64.7	91.2	77.65	97.1
Vertical upper (13 km)	Clear	73.0	75.4	81.1	78.2	82.1
	Hazy	41.7	42.3	46.3	44.6	46.9
	Water	88.06	91.0	97.79	94.31	99.07

#### 4.3 不同地区和季节的分子吸收率比较

不同地区和不同季节的大气分子吸收对碘激光

传输的影响主要是水汽含量的多少。在我国,由南向北,由夏季到冬季,水汽浓度减少,水汽分子的吸

收减少,大气对碘激光的吸收率也相应地递减。利用我国国内不同地区、不同季节的大气参量,分别计算我国三个地区年平均和合肥冬、夏两季碘激光最强线垂直向上全程和水平 10 km 的水汽吸收率,结果如图 3 所示。

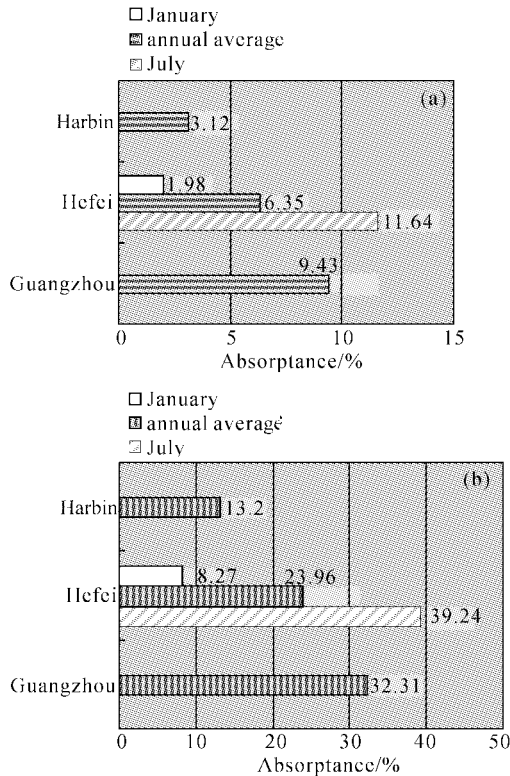


Fig. 3 The water-vapor absorption rates at the main line of the iodine laser in several regions. (a) Full vertical path; (b) Horizontal path 10 km

## 5 多波长碘激光在大气中的衰减

碘激光的光谱中可能包含不同的超精细谱线,它们的激光强度不同,波长不同,大气中水汽分子的吸收系数也不同。设各超精细谱线的相对强度为  $g_i$ ,吸收系数为  $k_i$  ( $i=1,2,3,\dots,6$ ),经过距离  $L$  的总透过率为

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \sum_{i=1}^6 g_i \exp(-k_i L) / \sum g_i, \quad (6)$$

如果要考虑碘激光超精细谱线的线宽,则上式中  $\exp(-k_i L) = \tau_i$  由下式代替:

$$\tau_i = \int I_i(\nu) \exp[-k_i(\nu)L] d\nu, \quad (7)$$

其中  $I_i(\nu)$  为各谱线的线型函数,  $k_i(\nu)$  为与  $I_i(\nu)$  对应的水汽吸收系数。碘激光超精细谱线宽度主要是压力加宽(例如,  $C_3F_7I$  在 30~45 谱线时,多普勒半

峰值处的半宽度为  $0.02 \sim 0.03 \text{ cm}^{-1}$ )和多普勒加宽(室温时,半峰值处的半宽度为  $0.008 \text{ cm}^{-1}$ )。其超精细谱线的线宽相对较窄,为简化起见,计算时不考虑其影响。表 1 中的吸收系数即是根据 HITRAN96 线参量计算的中纬度夏季海平面碘激光超精细线频率的水汽分子吸收系数。从计算结果可见,超精细线的水汽吸收系数相差达数倍。

根据碘激光超精细谱线的理论跃迁强度分布,计算中纬度夏季多波长碘激光水汽吸收率的结果如图 4 所示。图中同时列出碘激光单一最强线的计算结果。比较可见,单一最强线频率的碘激光的大气分子吸收比多波长碘激光的小;传输距离越大,两种吸收率的差距越大。在中纬度夏季,单一最强线频率碘激光垂直向上全程的大气分子吸收率与多波长碘激光水平传输 1 km 相当(吸收率为 9%)。

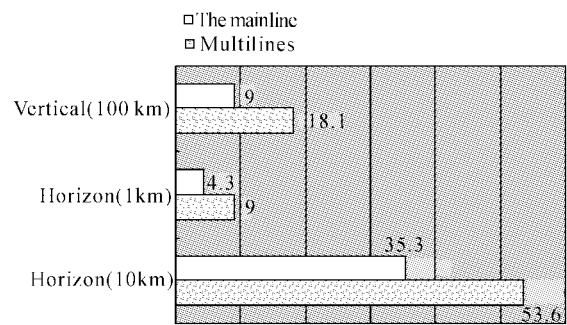


Fig. 4 The water-vapor absorption rates of a main line's and a multi-line's iodine laser

**结论** 碘激光波长处在大气微窗口,水汽分子对其吸收仅次于气溶胶衰减。中纬度夏季海平面的大气水汽分子吸收系数在  $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ km}^{-1}$  量级。在我国,由北向南,由冬天到夏天,水汽浓度增加,水汽分子的吸收率递增。由于大气气溶胶和水汽的垂直分布都是随高程增加而减小,显然,碘激光垂直向上传输比海平面水平传输受大气衰减影响小。碘激光有 6 条超精细谱线,其超精细线的水汽吸收系数相差数倍。碘激光单一最强线频率的大气分子吸收比多波长碘激光小,在中纬度夏季,单一最强线频率的碘激光垂直向上全程的分子吸收率与多波长碘激光水平传输 1 km 相当(吸收率为 9%)。从大气传输考虑,单一最强线频率的碘激光更有利于大气传输。

## 参 考 文 献

- Schlic L A, Rathge R D. Repetitively pulsed, 70-J photolytic iodine laser with excellent optical and long/reliable operation. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**

- (6):1069~1081
- 2 Engleman R, Keller R A, Palmer B A. Hyperfine structure and isotopic shift of the 1.3  $\mu\text{m}$  transition of  $^{129}\text{I}$ . *Appl. Opt.*, 1980, **19**(16):2767~2770
- 3 Duo Liping, Min Xiangde *et al.*. Experimental study of gain spectra of COIL. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1998, **10**(2):186~188 (in Chinese)
- 4 McClatchey R A, Fenn R W, Selby Z E A *et al.*. *Optical Properties of the Atmosphere*. AD-726116, 1971-05-10
- 5 Wu Chengjiu, Wei Heli, Yuan Yiqian *et al.*. The high-resolution absorption spectra of atmosphere measured by laser long-path absorption spectroscopy. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(2):238~242 (in Chinese)
- 6 Wiggins T A. Water vapor absorption at the atomic iodine laser line. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(20):3481~3483
- 7 Bragg S L, Lawton S A, Wiswall C E. Absolute measurements of absorption at the iodine-laser frequency in atmospheric gases. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(7):321~323
- 8 Bragg S L, Kelley J D. Atmospheric water vapor absorption at 1.3  $\mu\text{m}$ . *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3):506~513
- 9 Bragg S L, Kelley J D. Laser beam propagation in the atmosphere at 1.3  $\mu\text{m}$ . *Proc. SPIE*, 1990, **1221**:363~369
- 10 Wei Heli, Wu Chengjiu, Ma Zhijun *et al.*. A new method for improving the measurement spectral resolution of atmosphere absorption spectra. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(2):165~169 (in Chinese)
- 11 Rothman L S, Rinsland C P, Goldman A *et al.*. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1998, **60**(5):665~710

## Atmospheric Attenuation of the Iodine Lasers

Cao Bailing Wu Chengjiu Wei Heli Yuan Yiqian Ma Zhijun  
Sun Ming Gong Zhiben

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

(Received 29 March 2002; revised 13 May 2002)

**Abstract:** The wavelengths of iodine laser are in an atmospheric micro-window. The absorption by water vapor is its main absorption besides aerosol in this region. The absorption coefficients and transmittance of several model atmospheres are calculated. In China, from south to north, from summer to winter, the water vapor density is decreasing, and the iodine laser beam absorption rate by water vapor is decreasing as well. It is better that an iodine laser beam transmits vertically upwards than horizontal flatly on the sea level. The absorption of an iodine laser beam with single main line is less than that with multi-lines.

**Key words:** atmosphere optics; iodine lasers; laser atmospheric transmission; water vapor molecular absorption spectroscopy