

1.572  $\mu\text{m}$  附近  $\text{CO}_2$  吸收光谱的测量

邵君宜 林兆祥 刘林美 龚威

Measurement of absorption spectrum around 1.572  $\mu\text{m}$

Shao Jun-Yi Lin Zhao-Xiang Liu Lin-Mei Gong Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 104206 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.104206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.104206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 MODTRAN 模型使用被动傅里叶变换红外光谱技术对生物气溶胶的探测研究

Investigation of detecting biological aerosol by passive Fourier transform infrared spectroscopy technology based on MODTRAN model

物理学报.2016, 65(1): 014210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014210>

地基  $\text{CO}_2$  廓线探测差分吸收激光雷达

A ground-based differential absorption lidar for atmospheric vertical  $\text{CO}_2$  profiling

物理学报.2015, 64(24): 244206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244206>

基于差分吸收光谱技术的大气痕量气体二维观测方法

Two-dimensional observation of atmospheric trace gases based on the differential optical absorption spectroscopy technique

物理学报.2015, 64(16): 164209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164209>

基于匹配算法的脉冲差分吸收  $\text{CO}_2$  激光雷达的稳频研究

Research on the frequency stabilization of pulsed differential absorbing lidar for  $\text{CO}_2$  detection based on matching algorithm

物理学报.2015, 64(15): 154215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154215>

车载多轴差分吸收光谱探测对流层  $\text{NO}_2$  分布研究

Detection and distribution of tropospheric  $\text{NO}_2$  vertical column density based on mobile multi-axis differential optical absorption spectroscopy

物理学报.2015, 64(11): 114211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114211>

1.572  $\mu\text{m}$ 附近 $\text{CO}_2$ 吸收光谱的测量\*邵君宜<sup>1)</sup> 林兆祥<sup>1)†</sup> 刘林美<sup>1)</sup> 龚威<sup>2)</sup>

1) (中南民族大学电子信息工程学院, 武汉 430074)

2) (武汉大学, 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

(2016年12月1日收到; 2017年3月17日收到修改稿)

应用自行构建的恒温差分吸收光谱探测系统, 在230—320 K的温度范围内, 精确探测1.572  $\mu\text{m}$ 附近 $\text{CO}_2$ 吸收谱线的变化, 获得了不同温度和压强下 $\text{CO}_2$ 气体的吸收截面、自增宽系数、空气增宽系数, 这些参数补充和完善了现有的数据库. 定量分析了温度、压强对谱线的影响, 建立了光学厚度和吸收截面的数值计算模型, 并已经用于我国的 $\text{CO}_2$ 激光雷达, 为其高精度数据反演奠定了技术基础. 这些工作能够提高工作在该波段的差分吸收 $\text{CO}_2$ 探测激光雷达的反演精度.

**关键词:** 大气光学, 激光雷达,  $\text{CO}_2$ 吸收光谱, 双光路差分

**PACS:** 42.68.Ca, 42.25.Bs, 78.30.-j

**DOI:** 10.7498/aps.66.104206

## 1 引言

随着工业化的不断推进, 大气中的 $\text{CO}_2$ 浓度急剧上升, 导致全球变暖, 直接威胁着人类的生存和发展, 对空气中 $\text{CO}_2$ 浓度的监控受到广泛关注. 激光雷达作为一种主动探测方式, 由于其具有探测精度高和探测范围大等特点, 已经成为探测大气 $\text{CO}_2$ 浓度的发展热点. 世界各国陆续开发出了一系列地基、机载、星载激光雷达来监测大气中 $\text{CO}_2$ 的含量, 并开展了相关空间分布研究<sup>[1-3]</sup>, 探测精度可以达到2.8—5 ppm ( $10^{-7}$ )<sup>[4,5]</sup>, 我国目前有多个 $\text{CO}_2$ 激光雷达正在研制之中, 例如上海物理技术研究所研制的 $\text{CO}_2$ 激光雷达和武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室研制的 $\text{CO}_2$ 激光雷达.

根据激光雷达的数据反演原理,  $\text{CO}_2$ 特定谱线的光学厚度、吸收截面、增宽系数等参数的准确度直接影响激光雷达的探测精度. 武汉大学正在研制的我国新一代 $\text{CO}_2$ 激光雷达工作波段在1.57  $\mu\text{m}$ , 根据项目的总体设计指标, 该激光雷达探测范围从近地0.2 km到3 km,  $\text{CO}_2$ 浓度的探测

精度优于5 ppm<sup>[6-8]</sup>. 另外, 该激光雷达采用了多点扫描的工作方式, 扫描步长可达0.01  $\mu\text{m}$ , 需要高精度的 $\text{CO}_2$ 吸收谱线作为技术支持; 同时, 该激光雷达工作地羊八井的近地气温变化范围大, 可从230 K到320 K<sup>[9-12]</sup>. 国内在 $\text{CO}_2$ 吸收谱线的方面研究较少, 而且测量的温度间隔大、精度低, 测量的温度范围多在常温和高温, 不适用于激光雷达的数据反演, 例如朱湘飞等<sup>[13]</sup>虽然分析了常温(285—320 K)情况下温度和压强对1.572  $\mu\text{m}$ 附近 $\text{CO}_2$ 谱线的影响, 但是缺少低温部分的数据, 并且没有定量分析温度对激光雷达相关反演参数的影响. 国外针对 $\text{CO}_2$ 吸收光谱的研究开展得比较深入, 例如Johannes等<sup>[14]</sup>利用光腔振荡光谱技术测量了 $\text{CO}_2$ 在6189—6215  $\text{cm}^{-1}$ 之间的弱吸收谱线; Ivascu等<sup>[15]</sup>利用光声光谱法测量了 $\text{CO}_2$ 在9.2—10.8  $\mu\text{m}$ 之间的吸收系数; Klimeshina等<sup>[16]</sup>在7000—8000  $\text{cm}^{-1}$ 区域测量了 $\text{CO}_2$ 谱线的吸收系数、增宽系数等参数. 甚至通过HITRAN (the high-resolution transmission molecular absorption database)等数据库可以直接查询到相关参数的数

\* 国家自然科学基金(批准号: 41127901)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lin\_zhaox@126.com

值<sup>[17,18]</sup>,但是已有的研究表明,直接采用这些数据不能满足高精度激光雷达的探测需求<sup>[19–22]</sup>.例如, Joly 等<sup>[23]</sup>利用其实测的数据取代 HITRAN 数据库中的数据,将工作在 2 μm 附近的 CO<sub>2</sub> 探测激光雷达的探测误差从 20 ppm 减小到 5 ppm. 因此,有必要根据该激光雷达的特点,结合探测区域温度和压强的具体情况,对吸收光谱的特定波段进行实验室精确探测. 为此,我们利用高精度的采样示波器和高精度波长计等仪器建立了一套实验室测量系统,在 230–320 K 范围内精确测量 1.572 μm 附近的 CO<sub>2</sub> 吸收谱线,定量分析了温度、压强对光学厚度、吸收截面、自增宽系数和空气增宽系数等参数的影响,为我国新一代 CO<sub>2</sub> 激光雷达的高精度数

据反演提供技术支持.

## 2 实验装置

为了系统研究温度和相关参数的关系,构建了如图 1 所示的实验系统,该系统分为光学部分、控制部分和信号采集部分. 光学部分包括可调谐半导体激光器、气室、光纤分束器、聚焦光纤等. 可调谐半导体激光器发出的激光经由光纤分束器分为 3 束,其中 50% 能量的一束激光经由光纤准直镜射入气体池,再由聚焦光纤进入探测器; 40% 能量的一束激光经由聚焦光纤进入探测器; 10% 能量的一束激光经过光纤进入到波长计.

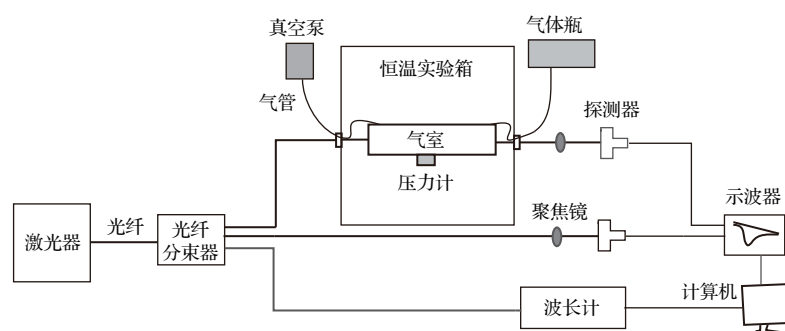


图 1 差分实验系统

Fig. 1. Double beam differential system.

控制部分包括温控装置和气路控制,气路控制组件为高压气体瓶、真空泵、高精度气压阀及气压计,气瓶和真空泵通过气管连接气室,高精度气压阀控制气体流速,气压计实时监测气室内气压,温控装置为恒温实验箱.

信号采集部分包括探测器、示波器、波长计和计算机. 两路探测器输出信号同时传入示波器的两个端口,显示出波形,在电脑中通过 Wavestar 软件连接示波器并存储数据;波长计将实时探测到的波长数据通过数据线传入电脑 USB 端口,利用波长计配置的软件存储数据.

实验中,可调谐半导体激光器为 Toptica 公司产生的 DL100 型,其线宽为 17 MHz,最大扫描范围 30 GHz,中心波长设置为 1.572 μm;波长计为 HighFinesse 公司生产的 WS-6 型,它的绝对精度为 2 MHz;探测器为 Hamamatsu 公司生产的 G6126 铟镓砷探测器,设置为 -15 °C 制冷模式,能有效抑制暗噪声;示波器为 Lecroy 公司的 WJ-354 A

型,采样率 1 GS/s,带宽 500 MHz;恒温实验箱是 TODE 公司产生的 YH-100 型,能够在 150–420 K 之间进行精确的温度控制,确保气室温度波动优于 0.2 °C,光纤、气管等线路从其侧面的测试孔通过后,再用隔热塞进行密封,对内部的温度影响很小;气室为自行改造的专用密闭 White 型光程池,通过光纤进出光,有效光程为 12.8 m,能够实时监测气室内的气压和温度,气压测量精度为 0.1 kPa,温度测量精度 ± 0.1%rdg.

## 3 实验步骤

### 3.1 实验准备

将气室抽至准真空后通入 1 atm 的 CO<sub>2</sub>,重复 5 次,尽可能减小气室和管道内吸附的杂质对实验的影响;然后使激光器以 40 Hz 的频率进行波长扫描,通过观察波长计,调节扫描范围和扫描中心,使其能扫描整个吸收峰(中心吸收峰为 1572.018 nm).

将采集的数据导入 Origin 软件进行多项式平滑, 得到如图 2(a) 所示的波形, 其中 Ref 为激光器输出的参考信号, Abs 为激光束经过吸收池吸收以后的信号. 用参考信号减去经过吸收的信号, 就得到如图 2(b) 所示的吸收谱线.

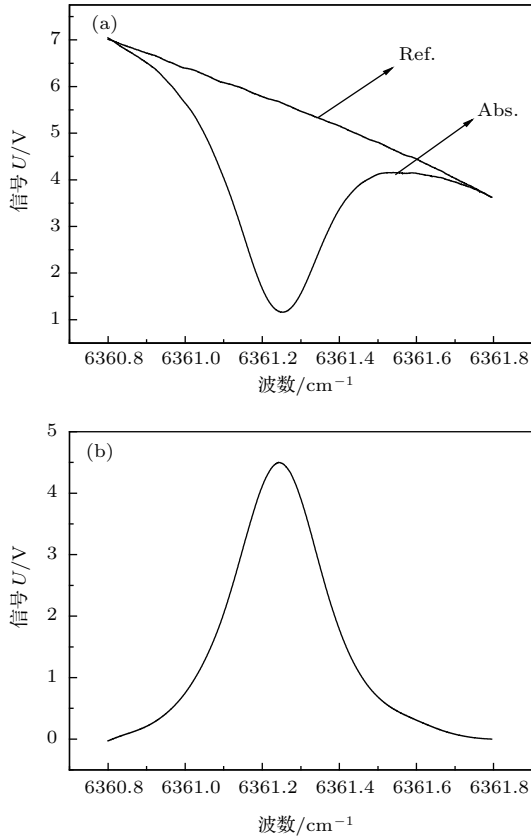


图2 (a) 参考信号 Ref 和经过吸收的信号 Abs; (b) 吸收谱线  
Fig. 2. (a) Reference signal and the absorbed signal; (b) absorption spectrum.

### 3.2 测量温度对 CO<sub>2</sub> 吸收光谱的影响

向气室中充入 CO<sub>2</sub> 气体, 直到压强计的读数为 150 kPa 左右 (保证温度降低到 230 K 时室内气压仍然大于 100 kPa), 设置恒温实验箱的程序使其将温度降低到 230 K, 待温度稳定 30 min 后将气压调整至 1 个大气压, 待气压稳定后再记录 100 组数据. 改变温度, 每次升高 5 K, 从 230 K 到 320 K, 重复上述实验, 记录数据.

### 3.3 测量压强对吸收谱线的影响

在测量谱线增宽实验时, 保持恒温装置温度一定, 充入 CO<sub>2</sub> 气体使气室内压强为 20 kPa, 待气体温度和气压稳定后, 记录 100 组数据. 改变压

强, 每次升高 10 kPa (测量自增宽系数时, 充入标准的 CO<sub>2</sub> 气体; 测量空气增宽系数时, 充入干燥的空气), 从 100 kPa 到 20 kPa, 重复上述过程, 记录数据. 图 3 是温度为 300 K 时充入 CO<sub>2</sub> 改变压强时的吸收谱线, 从中可以看出在相同温度下, 随着压强的增加谱线漂移越来越明显, 并且谱线宽度不断变大.

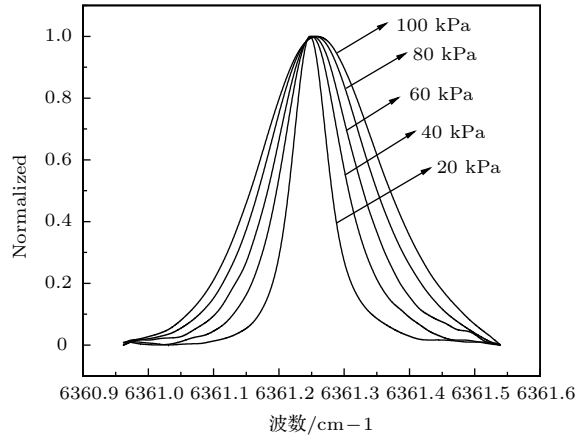


图3 归一化的 300 K 时不同压强下的纯 CO<sub>2</sub> 吸收谱线  
Fig. 3. The CO<sub>2</sub> absorption spectra of 300 K under different pressure.

## 4 数据处理原理

### 4.1 光学厚度 OD

根据 Beer-Lambert 定律<sup>[24]</sup>:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-L\sigma(\lambda)c}, \quad (1)$$

其中  $I$  为经过吸收后的光强,  $I_0$  为入射光强,  $\lambda$  为波长,  $L$  为光程长 (cm),  $\sigma$  为吸收截面 (单位  $\text{cm}^2/\text{molecule}$ ),  $c$  为气体浓度 (单位  $\text{molecule}/\text{cm}^3$ ).

其中光学厚度  $OD$  是一个无量纲的量, 定义为

$$OD = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}, \quad (2)$$

在本实验中,  $I(\lambda)$  是经过气室后探测到的光强,  $I_0(\lambda)$  是直接接收到的光强. 根据 3.2 节的实验步骤可以得到不同温度下的光学厚度, 根据 3.3 节的实验步骤可以得到不同压强下的光学厚度.

### 4.2 吸收截面

通过光学厚度计算得到吸收截面:

$$\sigma(\lambda) = \frac{OD(\lambda)}{Lc}, \quad (3)$$

本文中  $L$  取气室的实际光程长度 1280 cm,  $c$  为气体浓度 ( $\text{cm}^2/\text{molecule}$ ), 光学厚度  $OD$  为相应条件下通过上述计算得到的光学厚度. 根据理想气体状态方程:

$$PV = nRT, \quad (4)$$

其中,  $P$  为压强,  $V$  为气体体积,  $n$  为气体物质的量,  $R$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为热力学温度.

又

$$n = cV, \quad (5)$$

则 (2) 式可以表示为

$$\sigma(\lambda) = \frac{OD(\lambda)}{Lc} = \frac{OD(\lambda)RT}{LP}. \quad (6)$$

### 4.3 自增宽系数 $\gamma_{\text{self}}$

通常情况下, 吸收谱线的宽度包括 Lorentz 加宽和 Doppler 加宽. Lorentz 加宽可从实测谱线的半高宽减去 Doppler 加宽得到. 根据经验关系式有 [25,26]:

$$\Gamma = \Gamma_L + \Gamma_D, \quad (7)$$

$$\Gamma_L = \gamma_{\text{self}} P_{\text{CO}_2} + \gamma_{\text{air}} P_{\text{air}}, \quad (8)$$

$$\Gamma_D = 3.58117 \times 10^{-7} \nu_0 \left( \frac{T}{M} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

其中  $\Gamma$  为实测半高宽 ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $\Gamma_L$  为 Lorentz 半高宽 ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $\Gamma_D$  为 Doppler 半高宽 ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $\gamma_{\text{air}}$  为空气展宽系数 ( $\text{cm}^{-1}/\text{atm}$ ),  $\gamma_{\text{self}}$  为自展宽系数 ( $\text{cm}^{-1}/\text{atm}$ ),  $T$  为温度 (K),  $M$  为分子量,  $P_{\text{CO}_2}$  和  $P_{\text{air}}$  分别表示实测谱线时气室内的  $\text{CO}_2$  分压和空气的分压.

当气室中通入纯  $\text{CO}_2$  时,  $P_{\text{air}} = 0$ , 根据 (7) 式可以得到相应温度下的自增宽系数  $\gamma_{\text{self}} = (\Gamma - \Gamma_D)/P$ .

### 4.4 空气增宽系数 $\gamma_{\text{air}}$

将气室中充入 20 kPa 的  $\text{CO}_2$ , 记录  $P_{\text{CO}_2}$ , 然后通入干燥后的空气, 记录气室内总气压  $P$ , 利用  $P_{\text{air}} = P - P_{\text{CO}_2}$  得到  $P_{\text{air}}$ . 再将 4.3 节中计算得到的相应温度下的  $\gamma_{\text{self}}$  代入 (7) 式中, 就可以得到相应温度下的空气增宽系数  $\gamma_{\text{air}}$ .

### 4.5 温度相关指数 $t$

根据压力增宽系数与温度的关系式

$$\gamma(T) = \gamma(T_0) \left( \frac{T_0}{T} \right)^t \quad (10)$$

可以计算温度相关指数  $t$ , 其中  $T = 296$  K,  $\gamma(T_0)$  为 296 K 时的增宽系数, 两边取对数, 有

$$\begin{aligned} \ln \gamma(T) &= -t \ln T + t \ln T_0 + \ln \gamma(T_0) \\ &= -t \ln T + k. \end{aligned} \quad (11)$$

由此可以得出增宽系数 (自增宽系数和空气增宽系数) 与温度的依赖关系系数, 通常将实验的相关数据取对数后, 拟合直线, 计算出该直线的斜率即为温度相关指数  $t$ .

## 5 实验结果与分析

### 5.1 温度对吸收截面的影响

由实验测量得到了不同温度下的吸收光谱数据, 代入 (2) 式计算得到吸收谱线在多个温度下的光学厚度  $OD$ . 图 4 所示是其中 5 个温度 (230, 265, 285, 305, 320 K) 时的光学厚度与波长的关系, 可以看到随着温度的升高光学厚度越来越小, 但吸收峰的位置没有明显的变化.

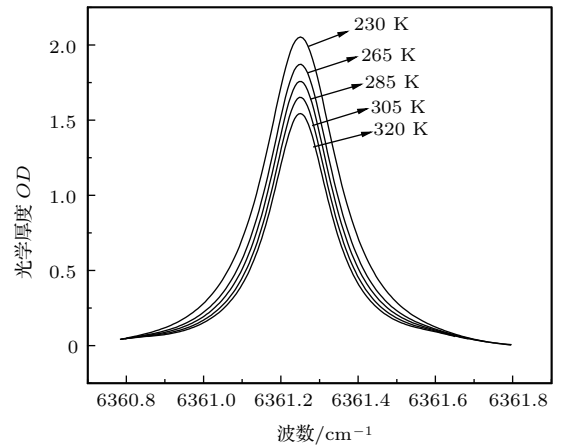


图 4 230, 265, 285, 305, 320 K 时的光学厚度  $OD$

Fig. 4. Optical depth in the temperature of 230, 265, 285, 305, 320 K.

对于差分吸收激光雷达, 我们更为关心的是吸收峰处的光学厚度和吸收截面变化规律, 为此统计了不同温度下吸收峰处 ( $1.572018 \mu\text{m}$ ) 的光学厚度, 如图 5 (a) 所示. 可以看出随着温度的升高, 吸收峰处的光学厚度呈线性减小, 拟合直线得到其

线性系数, 建立了初步的数值计算公式. 当压强为 1 atm 时, 光学厚度为

$$OD = -4.419 \times 10^{-6} LT + 2.646 \times 10^{-3} L, \quad (12)$$

则 1 atm 时吸收峰处的吸收截面为

$$\sigma(T) = \frac{(-4.419 \times 10^{-6} LT + 2.646 \times 10^{-3} L) RT}{1.01325 L}, \quad (13)$$

其中  $L$  为光程长 (cm),  $T$  为温度 (K),  $R$  为气体常数.

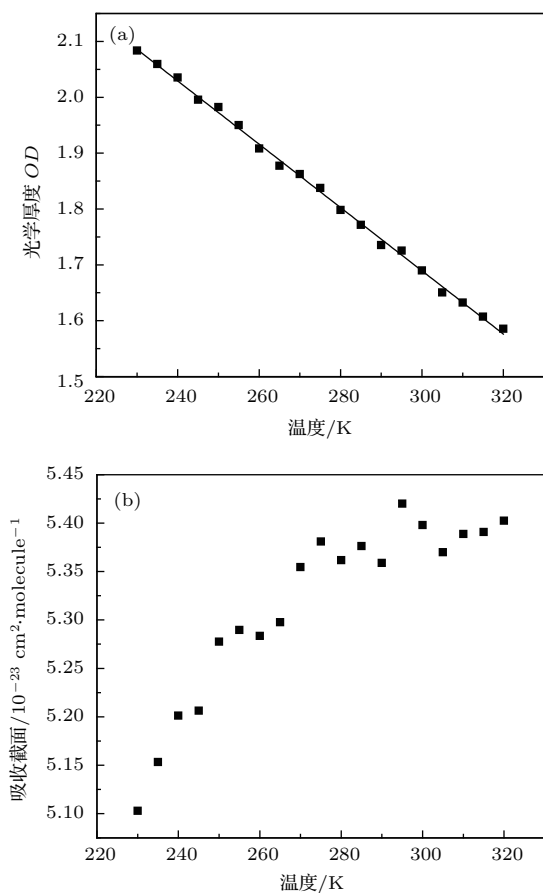


图5 (a) 230—320 K 时吸收峰处的光学厚度  $OD$ ; (b) 230—320 K 时吸收峰处的吸收截面  
Fig. 5. (a) Optical depth of absorption peak range from 230 K to 320 K; (b) absorption cross section of absorption peak range from 230 K to 320 K.

将图 5(a) 中吸收峰处的光学厚度代入 (3) 式, 计算得到压强为 1 atm 时不同温度下吸收峰处的吸收截面如图 5(b). 比较了吸收截面测量结果与其他人测量结果的差异, 在 285 K 时吸收截面为  $5.37 \times 10^{-23} \text{ cm}^2/\text{molecule}$ , 与朱湘飞等测得的  $5.70475 \times 10^{-23} \text{ cm}^2/\text{molecule}$  和 HITRAN2004 数

据库的  $5.53 \times 10^{-23} \text{ cm}^2/\text{molecule}$  相差较小, 与 HITRAN2012 数据库的  $7.2 \times 10^{-23} \text{ cm}^2/\text{molecule}$  相差较大, 但是在同一数量级.

从图 5(b) 中可以看出, 在 230—320 K 温度范围内, 吸收峰处的吸收截面随温度的增大先增大后减小, 这符合吸收截面随温度的变化趋势. 吸收截面随温度的变化并不是单调的, 只有在一定的温度范围内才可能是单调的. 而且对于不同的分子、波长, 吸收截面随温度变化的规律也不尽相同 [27].

## 5.2 压强对吸收截面的影响

在相同的温度条件下, 测量了不同压强对吸收峰处吸收截面的影响, 由于压强的改变会造成吸收峰中心的漂移, 中心吸收峰不再是  $1.572018 \mu\text{m}$ . 图 6(a) 为其中三个温度 240, 265, 300 K 时不同压强下吸收峰处的吸收截面, 可以发现其随着压强的减小呈指数增大. 取对数之后如图 6(b) 所示, 其中

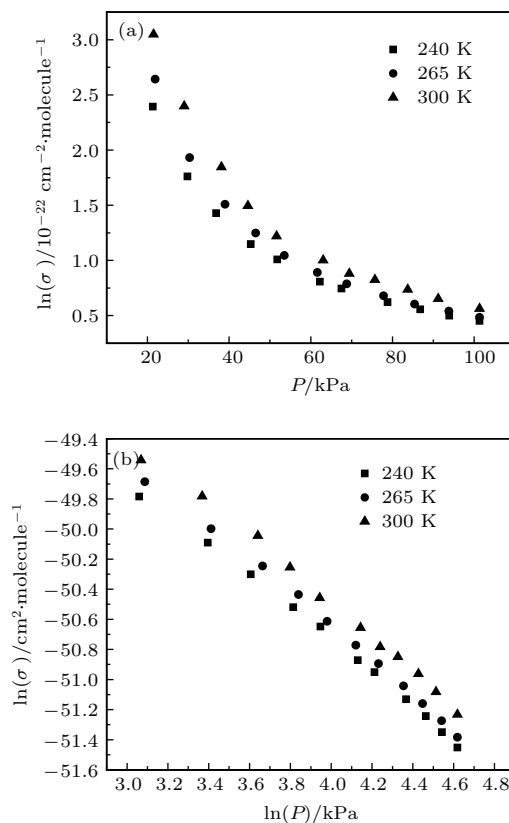


图6 240, 265, 300 K 时 (a) 吸收峰处的吸收截面与压强的关系, (b) 取对数之后吸收峰处的吸收截面与压强的关系  
Fig. 6. (a) The relationship between pressure and absorption cross section of peak at 240 K, 265 K and 300 K; (b) the relationship between pressure and the absorption cross section of peak at 240 K, 265 K and 300 K after taking the logarithm.

直线的斜率非常接近, 没有发现直线斜率与温度有明显的关系. 则可以得到初步的数值计算公式, 当温度一定时,

$$\sigma(P) = \sigma(T) \left( \frac{P}{P_0} \right)^{-1.0825}, \quad (14)$$

其中,  $P_0$  为标准大气压,  $\sigma(P)$  是压强为  $P$  时的吸收截面,  $\sigma(T)$  是温度为  $T$ 、压强为 1 atm 时的吸收截面.

由 (12) 式和 (13) 式可以推导出温度为  $T$ 、压强为  $P$  下的吸收峰处的吸收截面数值计算公式:

$$\sigma = \frac{(-4.41923 \times 10^{-6} LT + 0.2646L) RT}{1.01325L} \times \left( \frac{P}{1.01325 \times 10^5} \right)^{-1.0825}. \quad (15)$$

根据该数值公式就可以建立相应的吸收截面查找表, 为数据的反演提供参考.

### 5.3 谱线增宽

实验中测量了压强在 20—100 kPa 范围内不同温度的  $\text{CO}_2$  吸收谱线, 将吸收谱线导入 Origin 软件, 拟合得到了不同情况下的半高宽, 代入 (8) 式, 计算得到不同温度下的自增宽系数和空气增宽系数列于表 1.

表 1 不同温度下的自增宽系数和空气增宽系数  
Table 1. Self-broadening coefficient and air-broadening coefficient at different temperature.

温度/K	$Y_{\text{self}}/\text{cm}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$	$Y_{\text{air}}/\text{cm}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$
230	0.11772	0.08921
240	0.11418	0.08518
250	0.11078	0.08314
260	0.10871	0.08002
270	0.10720	0.07865
280	0.10402	0.07696
290	0.10102	0.07455
300	0.09912	0.07182
310	0.09685	0.07045
320	0.09495	0.06894

根据 (11) 式可知, 温度和增宽系数取对数后存在线性关系, 图 7(a) 为取对数之后自增宽系数与温度的关系, 温度相关指数为 0.644, HITRAN 数据库给出的参考值为 0.65, 相差 0.92%; 图 7(b) 为取

对数之后空气增宽系数与温度的关系, 温度相关指数为 0.764, HITRAN 数据库给出的参考值为 0.75, 相差 1.86%.

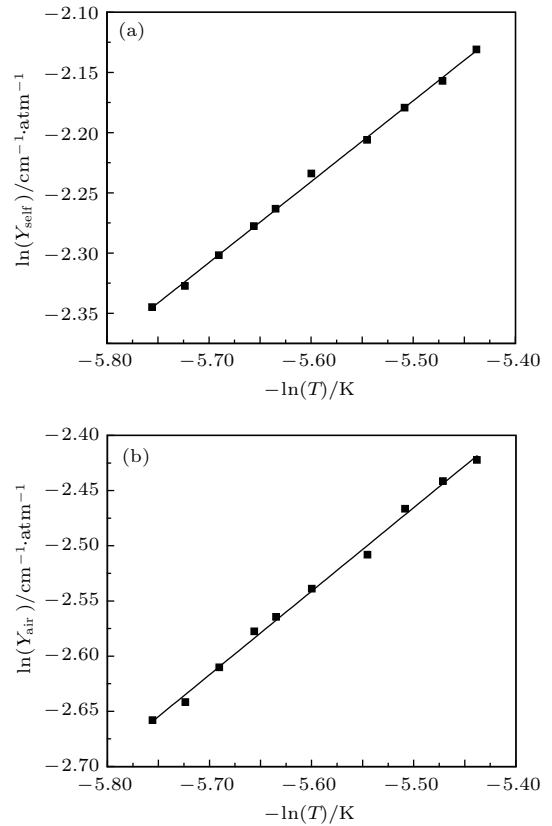


图 7 取对数之后 (a) 自增宽系数与温度的关系, (b) 空气增宽系数与温度的关系

Fig. 7. (a) The relationship between the self-broadening coefficient and the temperature after taking the logarithm; (b) the relationship between air-broadening coefficient and temperature after taking the logarithm.

## 6 结 论

本文自行构建了一套  $\text{CO}_2$  吸收谱线测量装置, 针对差分吸收激光雷达工作的具体温度、压力要求, 精确测量了  $\text{CO}_2$  在  $1.572 \mu\text{m}$  附近的吸收谱线, 并在此基础上构建了相关反演参数的定量计算模型. 这些模型已经应用于我国正在研制的高新一代  $\text{CO}_2$  探测激光雷达之中, 为其高精度反演奠定了技术基础. 但是值得注意的是, 在高空中, 压强和温度都存在一个渐进的变化, 并且空气中含有其他气体分子, 引起分子间作用力的改变, 这些因素导致激光雷达实际测量到的  $\text{CO}_2$  吸收谱线与实验室条件下测量的吸收谱线具有一定的差异, 所以实验室条件下测量的结果不能够直接使用.

本文获得的光学厚度与温度的经验公式具有较好的线性关系, 可以为CO<sub>2</sub>分子光谱相关理论模型研究提供实验依据. 但是本文中的计算模型是在230—320 K温度范围内研究获得的, 对于更广的温度范围, 其是否适用、适用的范围多大, 都有待进一步的研究. 希望通过更加细致、广泛的实验研究, 建立CO<sub>2</sub>分子光谱的吸收模型, 能够精确地表达不同波段、温度和压强下的吸收谱线变化, 然后通过研究其中的机理, 建立其他气体分子的吸收模型.

## 参考文献

- [1] Imaki M, Kameyama S, Hirano Y, Ueno S, Sakaizawa D, Kawakami S, Nakajima M 2009 *Opt. Lett.* **34** 10
- [2] Amediek, Fix A, Wirth M, Ehret G 2008 *Appl. Phys. B* **92** 295
- [3] Amediek A, Fix A, Ehret G, Caron J, Dyrand Y 2009 *Atmosph. Measur. Tech.* **2** 755
- [4] Sakaizawa D, Kawakami S, Nakajima M, Sawa Y, Matsueda H 2010 *J. Appl. Remote Sens.* **4** 1043548
- [5] Ambricof P F, Amodeo A, Girolamo P DI, Spinelli N 2000 *Appl. Opt.* **39** 366847
- [6] Ma X, Lin H, Ma Y Y, Gong W 2013 *Acta Opt. Sin.* **32** 17 (in Chinese) [马昕, 林宏, 马盈盈, 龚威 2013 光学学报 **32** 17]
- [7] Ma X, Gong W, Ma Y Y, Fu D W, Han G, Xiang C Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154251 (in Chinese) [马昕, 龚威, 马盈盈, 傅东伟, 韩舸, 相成志 2015 物理学报 **64** 154251]
- [8] Han G, Gong W, Ma X, Xiang C Z, Liang A L, Deng Y X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 244206 (in Chinese) [韩舸, 龚威, 马昕, 相成志, 梁艾琳, 郑玉新 2015 物理学报 **64** 244206]
- [9] Gong W, Han G, Ma X, Lin H 2013 *Opt. Commun.* **305** 180
- [10] Han G, Gong W, Lin H, Ma X, Xiang C 2014 *Appl. Phys. B* **117** 104
- [11] Gong W, Ma X, Dong Y, Lin H, Li J 2014 *Opt. Laser Technol.* **56** 52
- [12] Han G, Lin H, Ma X, Xiang Z 2014 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **53** 3221
- [13] Zhu X F, Lin Z X, Liu L M, Shao J Y, Gong W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 174203 (in Chinese) [朱湘飞, 林兆祥, 刘林美, 邵君宜, 龚威 2014 物理学报 **63** 174203]
- [14] Johannes B, Tommaso S, Daniele R, Marco M, Alain C, Samir K 2015 *J. Chem. Phys.* **142** 191103
- [15] Ivascu I R, Matei C E, Patachia M, Bratu A M, Dumitras D C 2015 *Rom. J. Phys.* **60** 1212
- [16] Klimeshina T E, Petrova T M, Rodimova O B, Solodov A A, Solodov A M 2015 *Atmos. Ocean. Opt.* **28** 387
- [17] Rothman L, Gordon I, Babikov Y, Barbe A, Chris Benner D, Bernath P, Birk M, Bizzocchi L, Boudon V, Brown L 2013 *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* **130** 4
- [18] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, Benner D C, Bernath P F, Birk M, Boudon V, Brown L R, Campargue A, Champion J P 2009 *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* **110** 533
- [19] Bragg S L, Lawton S A, Wiswall C E 1985 *Opt. Lett.* **10** 321
- [20] Joly L, Marnas F, Gibert F, Bruneau D, Grouidez B, Pierre H F, Durrya G, Dumelie N, Parvitte B, Zeninari V 2009 *Appl. Opt.* **48** 295475
- [21] Sakaizawa D, Nagasawa C, Nagai T, Abo M, Shibata Y, Nakazato M 2008 *J. Appl. Phys.* **47** 1325
- [22] Li J S, Durrya G, Cousin J, Joly L, Parvitte B, Flamant P H, Gibert F, Zeninari V 2011 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112** 1411
- [23] Joly L, Gibert F, Grouiez B, Grossela A, Parvitte B, Durrya G, Zéninaria V 2008 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **109** 426
- [24] Lu T X, Lu Z Q 2006 *The Theory and Application of Laser Spectroscopy* (Hefei: University of Science and Technology of China Press) p133 (in Chinese) [陆同兴, 路秩群 2006 激光光谱技术原理及应用 (合肥: 中国科学技术大学出版社) 第133页]
- [25] Bragg S L, Kelley J D 1987 *Appl. Opt.* **26** 506
- [26] Kielkopf J F 1973 *J. Opt. Soc. Am.* **63** 987
- [27] Zhou J, Zhang S L, Chen X H 2007 *Spectrosc. Spect. Anal.* **27** 71259 (in Chinese) [周洁, 张时良, 陈晓虎 2007 光谱学光谱分析 **27** 71259]



# Measurement of absorption spectrum around 1.572 $\mu\text{m}$ \*

Shao Jun-Yi<sup>1)</sup> Lin Zhao-Xiang<sup>1)†</sup> Liu Lin-Mei<sup>1)</sup> Gong Wei<sup>2)</sup>

1) (College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities,  
Wuhan 430074, China)

2) (State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan  
430079, China)

( Received 1 December 2016; revised manuscript received 17 March 2017 )

## Abstract

Differential absorption lidar (DIAL) is widely accepted as a most promising remote sensing technique for measuring the atmospheric CO<sub>2</sub>, and has been built in many countries to study the global climate change and carbon cycle. However, the imperfect information about CO<sub>2</sub> spectrum leads to evident errors in estimating some parameters (such as the absorption cross sections, the broadening coefficients, the optical depth, etc.) which are the critical parameters in retrieving processes of a DIAL, and will eventually result in unacceptable errors of  $X_{\text{CO}_2}$  retrievals. Coping with that problem, a self-built constant temperature differential absorption spectroscopy system has been set up which can be used to accurately measure the absorption spectrum of carbon dioxide in the band of 1.57  $\mu\text{m}$ .

On that basis, the absorption spectra of the pure carbon dioxide are measured respectively at the temperatures from 230 K to 320 K and the pressures from 20 kPa to 100 kPa by the highprecision oscilloscope and wavelength meter. A series of optical depths at absorption peak is respectively calculated at different temperatures and the results show that the optical depth linearly and monotonically changes while the temperature increases from 230 K to 320 K. At the same time, the relations between the corresponding absorption cross sections and temperature are analyzed, showing that the absorption cross sections first increases and then decreases with temperature increasing. The self-broadening coefficients are inferred from the spectral data at the same temperature and different pressures, and the temperature-dependent exponent is calculated. Furthermore, the air-broadening coefficients are calculated by carbon dioxide absorption spectrum data from different mixing ratios and its temperature-dependent exponent is obtained. The temperature-dependent exponent of self-broadening coefficient is 0.644 and the temperature-dependent exponent of air-broadening coefficient is 0.764, which are almost the same as the data in the high-resolution transmission molecular absorption database (HITRAN). The numerical calculation formulae of optical depth and absorption cross section are verified through these results.

Those parameters supplement the widely-used HITRAN database. Moreover, quantitative analysis is conducted to explore the influences of temperature and pressure on CO<sub>2</sub> spectrum, thereby establishing a function for modeling the differential absorption optical depth and the absorption cross-section. The above results have already been used in China's CO<sub>2</sub>-DIAL and lay a foundation of accurate retrieval. It is believed that other similar CO<sub>2</sub>-DIAL of which operating wavelength is around 1.572  $\mu\text{m}$  would also benefit from those newly measured parameters.

**Keywords:** atmospheric optics, lidar, absorption spectrum of CO<sub>2</sub>, the differential system of double optical path

**PACS:** 42.68.Ca, 42.25.Bs, 78.30.-j

**DOI:** 10.7498/aps.66.104206

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41127901).

† Corresponding author. E-mail: [lin\\_zhaox@126.com](mailto:lin_zhaox@126.com)