

# H<sub>2</sub>O 分子泛频振动谱的半导体激光检测\*

陈 荣 王庆吉 郑乐民

(北京大学无线电电子学系, 北京 100871)

## 提 要

本文使用 0.82 μm AlGaAs 激光二极管(LD)观测 H<sub>2</sub>O 分子 (0, 0, 0) — (2, 1, 1) 泛频振动吸收谱, 获得 822.6~823.2 nm 波长范围内 H<sub>2</sub>O 分子 26 条泛频吸收谱线。其中, 检测谱线的最小吸收系数  $\alpha_{\min} \sim 3 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ , 对  $\alpha \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  谱线所获得的信噪比(SNR)约 60。本文还观测了气体压强对泛频谱线形、线宽的影响, 测量了泛频谱线的压强增宽系数  $\beta_p \sim 0.128 \text{ MHz/Pa}$ 。

关键词: 泛频振动谱, 压强增宽。

## 一、引 言

室温下工作的近红外激光二极管(LD), 不仅在光通信、光信息处理等领域有重要应用, 而且在高灵敏、高分辨激光光谱中也有巨大应用前景。从光谱学观点看, LD 有两个突出的特点: 一是易调谐, 二是便于调制。改变 LD 的工作温度和注入电流, 可以在较大范围内对激光频率连续调谐; LD 的光束易于调制, 尤其是便于实现高速调制(调制频率大于 1GHz), 从而获得光谱的高灵敏检测<sup>[1]</sup>。

近些年来, 有作者使用 0.82 μm AlGaAs LD 研究了 H<sub>2</sub>O 分子泛频(overtone)振动谱。H. Tsuchida<sup>[2]</sup> 观测了 822.7 nm、823.39 nm 和 824.35 nm 三个波长附近的共 10 条 H<sub>2</sub>O 分子泛频吸收线, 谱线(一次和二次微商信号)的 SNR~10。L. G. Wang<sup>[3]</sup> 等利用温度精密扫描方法, 观测了 817.07 nm ~ 817.22 nm (0.15 nm 范围)内的 3 条 H<sub>2</sub>O 分子泛频吸收线, 多普勒受限吸收谱线的 SNR~10, 在扫描温度过程中, 谱线直流本底发生明显弯曲。文献[3]作者使用调频谱(FMS)技术消除了本底畸变, 提高了检测信噪比和灵敏度。

本文使用温度调谐和电流调谐相结合的方法, 检测到 0.6 nm 范围(822.6 nm 至 823.2 nm)内吸收系数  $\alpha \geq 3 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$  的所有 H<sub>2</sub>O 分子泛频吸收谱线。利用光强相减放大的检测技术, 消除了光本底、光强噪声和因扫描注入电流引起光强变化的影响, 提高了检测的信噪比和灵敏度。对  $\alpha \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  吸收谱线, 其 SNR~60, 优于文献[2]、[3]用类似方法得到的结果。此外, 本文观测了蒸汽压强对泛频谱线形、线宽的影响。测量了谱线的压强增宽系数  $\beta_p \sim 0.128 \text{ MHz/Pa}$ , 与文献[4]推算得到的结果(0.11 MHz/Pa)基本相符。

## 二、实验原理

实验装置示于图 1。LD 固定在电热致冷热沉上, LD 发射的激光束由准直透镜准直后

收稿日期: 1991年3月4日; 收到修改稿日期: 1991年5月17日

\* 自然科学基金资助的项目。

输出。光束通过由格兰棱镜和  $\lambda/4$  波片组成的光隔离器, 由分束镜  $S_1$  分成两束。其中一束 ( $I_1$ ) 通过 H<sub>2</sub>O 吸收室被探测器  $D_1$  接收; 另一束被  $S_2$  反射的光 ( $I_2$ ) 直接被探测器  $D_2$  接收。  $D_1$  和  $D_2$  接收的光信号在检测系统中相减放大, 获得的信号用示波器观测或用记录仪记录。透过  $S_2$  的光束 ( $I_3$ ) 射入 F-P 扫描干涉仪, 用以监视 LD 的输出模式和标定吸收谱线间的相对频率。吸收谱线的中心波长用自制的、用钠的饱和吸收线标定的 6 位激光波长计测定, 准确度达  $10^{-6}$ 。

H<sub>2</sub>O 分子吸收室是一带有冷子的柱泡, 长 105 cm, 气室抽成低真空。冷子与气室相通, 其内装约 2 ml 的去离子水。控制冷子温度, 使气室中水汽压强达到冷子温度下的饱和蒸汽压。

本实验使用的 AlGaAsLD (Hitachi, HLP1400) 工作波长  $\lambda \sim 0.82 \mu\text{m}$ , 激光线宽  $\Delta\nu_L \sim 30 \text{ MHz}$ , 峰值输出光功率  $P_{\text{max}} \sim 15 \text{ mW}$ 。实验测定, 该 LD 热调率  $\beta_t \sim -27.2 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ , 电调率  $\beta_e \sim -3.4 \text{ GHz}/\text{mA}$ 。实验中, 当 LD 工作温度从  $8^\circ\text{C}$  变到  $20^\circ\text{C}$  时, 激光波长从  $822.6 \text{ nm}$  变到  $823.2 \text{ nm}$  (其中有跳模发生)。固定 LD 工作温度, 用一线性很好的斜波信号扫描注入电流来调谐 LD 输出频率, 观测和记录 H<sub>2</sub>O 分子泛频振动谱线。再结合温度调谐记录全部谱线。

当电扫描 LD 注入电流时, 激光功率会随之变化。HLP 1400LD 功率-电流变化率  $\beta_p \sim 0.6 \text{ mW}/\text{mA}$ , 为克服扫频引起功率变化的影响, 本实验采用相减放大检测系统, 它可将直流光本底和因扫描注入电流引起的光强变化全部减掉, 并将光噪声由原来的  $10 \text{ mW}$  减小到低于  $2 \text{ mW}$  (探测器取样电阻  $5.6 \text{ M}\Omega$ ), 这时的剩余噪声主要来自激光频率噪声。

### 三、实验结果与讨论

实验结果如下:

1. 入射到 H<sub>2</sub>O 吸收室光强  $\sim 80 \mu\text{W}/\text{mm}^2$ , 气室温度  $\sim 23.5^\circ\text{C}$ , 冷子温度  $20^\circ\text{C}$  (相当于 H<sub>2</sub>O 气压为  $0.131 \text{ Pa}$ )。在  $8^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  范围内顺序改变 LD 工作温度使 LD 稳定工作于某一温度上, 以  $8 \text{ mA}/16 \text{ ms}$  (相当于  $27 \text{ GHz}/16 \text{ ms}$ ) 扫描注入电流, 用示波器观测到如图 2 中 A、B、C、...、G 七幅照片所示的共 26 条泛频吸收谱线。用自由光谱区为  $1.82 \text{ GHz}$  的 F-P 扫描干涉仪测量 A 照片中谱线线宽 (HMF<sub>W</sub>)  $\sim 1.3 \text{ GHz}$ 。

改变 LD 工作温度, 以  $12 \text{ mA}/40 \text{ s}$  ( $41 \text{ GHz}/40 \text{ s}$ ) 速率扫注入电流, 用记录仪分段记录泛频谱线, 并使相邻两组谱线至少有一条公共谱线, 这样就可将  $822.6 \text{ nm} \sim 823.2 \text{ nm}$  波段内所有谱线连在一起。用波长计测定某一条谱线的绝对波长 (如, 测定  $\nu$  线波长  $\lambda_\nu \sim 823.125 \text{ nm}$ , 见表 1), 用 F-P 干涉仪标定其余各谱线波长。在同样实验条件下, 用记录仪记录吸收信号强度  $I_s$  和该信号相应的本底光强  $I_0$ , 就可算出谱线的吸收系数  $\alpha = I_s/I_0 L$ , 其中  $L$  是 H<sub>2</sub>O 吸收室的长度。  $I_0$  是通过遮住光束  $I_2$  (图 1) 只记录探测器  $D_1$  的输出而得

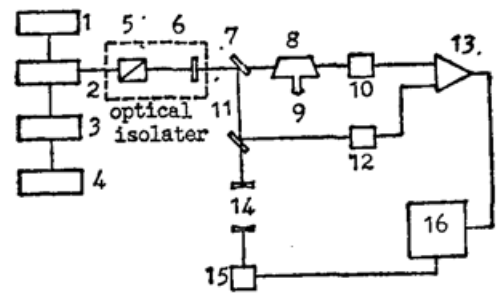


Fig. 1 Experimental setup

1—temperature controller, 2—diode laser LD, 3—current driver, 4—frequency scanner, 5—Glan-Thompson prism, 6— $\lambda/4$  plate, 7, 11—splitter  $S_1, S_2$ , 8—watercell, 9—cold point, 10, 12, 15—detector  $D_1, D_2, D_3$ , 13—subtraction-amplifier, 14—Fabry-Perot Cavity, 16—oscilloscope/recorder

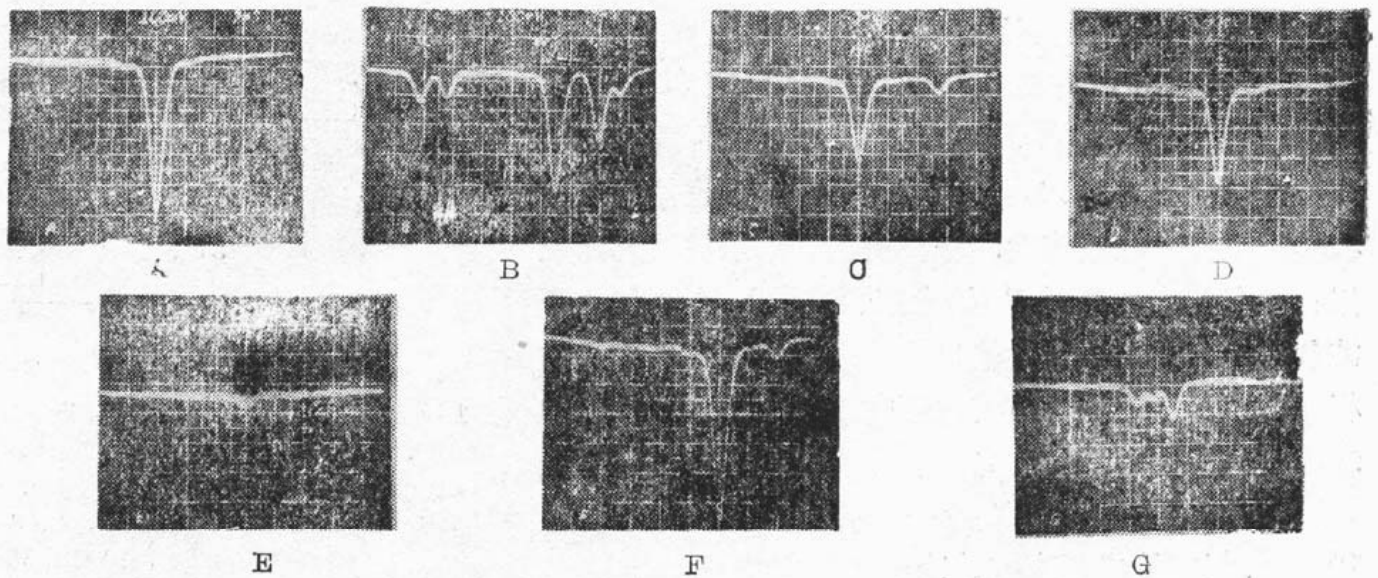


Fig. 2 Photos of overtone spectrum of water vapor

到的。以  $a, b, c, \dots, x, y, z$  标志的 26 条谱线的  $\lambda, \alpha$  值列于表 1 中, 它们的谱图示为图 3。图 3 中的  $a, b, c$  三条,  $d, e, f, g, h, i, j$  七条,  $\dots$  分别与图 2 中照片 A、B、C、 $\dots$ 、G 对应。

Table 1 The wavelength ( $\lambda$ ) and the absorption coefficient ( $\alpha$ ) of the absorption lines of water vapor

	$\lambda(0.1 \text{ nm})$	$\alpha(10^{-4} \text{ cm}^{-1})$		$\lambda(0.1 \text{ nm})$	$\alpha(10^{-4} \text{ cm}^{-1})$
$a$	8226.89	0.10	$n$	8228.88	0.18
$b$	8226.96	3.20	$o$	8229.67	0.05
$c$	8227.03	0.05	$p$	8229.74	1.34
$d$	8227.93	0.82	$q$	8229.82	0.05
$e$	8228.02	0.69	$r$	8230.46	0.18
$f$	8228.07	0.07	$s$	8231.00	0.03
$g$	8228.19	0.14	$t$	8231.11	0.04
$h$	8228.24	2.71	$u$	8231.20	0.10
$i$	8228.33	1.61	$v$	8231.25	2.46
$j$	8228.37	0.49	$w$	8231.38	0.19
$k$	8228.66	0.06	$x$	8231.62	0.45
$l$	8228.72	1.10	$y$	8231.65	0.25
$m$	8228.79	0.03	$z$	8231.70	0.67

2. 改变冷子温度, 但保持气室温度 ( $22^\circ\text{C}$ ) 一定, 观测不同冷子温度 (不同气压) 时谱线的线形与线宽。图 4 照片给出冷子温度为  $-1.5^\circ\text{C}$ 、 $12.1^\circ\text{C}$  和  $21^\circ\text{C}$  时,  $b$  线 (图 3) 的线形, 照片下面是 F-P 干涉仪的监测信号 (自由光谱区  $\sim 1.82 \text{ GHz}$ )。实验测量  $b$  线在 6 个不同气压时的谱线宽度 (见表 2), 线宽与压强关系如图 5 所示。由图 5 得到  $b$  线在多普勒线形上的压强增宽系数为  $0.128 \text{ MHz/Pa}$ , 该结果与文献 [4] 推算得到的压强增宽系数 ( $0.11 \text{ MHz/Pa}$ ) 基本相符。由图 5 曲线外推得到 0 压强时线  $b$  线宽  $\sim 1.05 \text{ GHz}$ 。

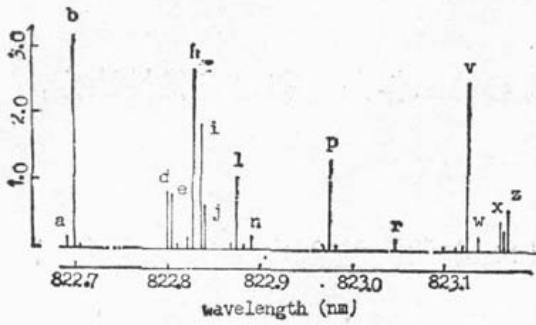


Fig. 3 Diagram of overtone spectrum of water vapor

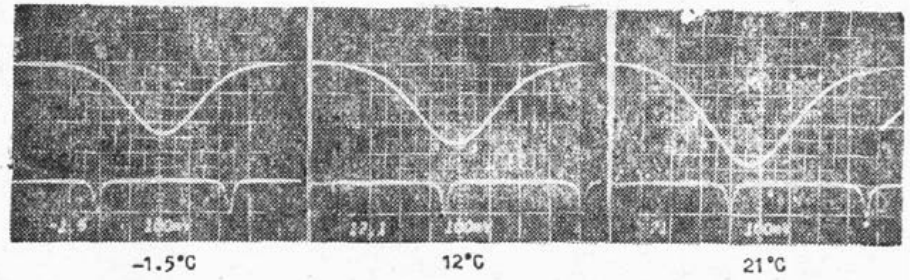


Fig. 4 Photos of pressure broadening of line *b* (The Lower trace in each photo is the monitoring signal from F-P cavity)

Table 2 Pressure broadening of line *b*

$t_{H_2O}$ —temperature of water in cold point;  $p$ —pressure of Water vapor in water cell  
 $\Delta\nu$ —linewidth of absorption lines

	$t_{H_2O} (^{\circ}C)$	$p (Pa)$	$\Delta\nu (GHz)$
1	-1.5	532	1.10
2	3.0	758.1	1.13
3	7.9	1034	1.17
4	12.1	1396.5	1.22
5	16.5	1862	1.26
6	21.0	2487.1	1.35

对实验结果作如下说明:

1. W, Baumann 和 R, Mecke<sup>[5]</sup> 利用太阳谱的大气吸收线得到 H<sub>2</sub>O 的近红外泛频振动谱, 在 822.6 nm 至 823.2 nm 波段观测到 6 条吸收谱线。它们与本实验观测的 26 条谱线中的 8 条强线吻合很好, 即图 3 中的 *b* (822.696 nm), *d* (822.796 nm), *e* (822.802 nm), *h* (822.824 nm), *i* (822.833 nm), *l* (822.872 nm), *p* (822.974 nm), *v* (823.125 nm) 8 条强线。其中因 *d* 与 *e*, *h* 与 *i* 谱线相距太近而在文献 [5] 中没能分辨出来。

文献 [2] 作者根据文献 [5] 的结果, 从所观测的三段吸收谱线中各识别出一条强线的波长值: 822.70 nm, 823.39 nm 和 824.35 nm (没用波长计测量), 其中 822.7 nm 附近的 3 条谱线结构与本实验获得的谱线 *h*、*i*、*j* 结构相同 (见图 2B), 而与本实验标定的波长 822.7 nm 附近的谱线 (图 2A) 差异较大。经作者进一步测定及与文献 [5] 进行多谱线整体比较, 文献 [2] 的那 3 条谱线应为 *h* (822.824 nm)、*i* (822.833 nm) 和 *j* (822.837 nm) 线。

2. H<sub>2</sub>O 分子室温下的多普勒增宽  $\Delta\nu_D \sim 1.07 GHz$ , 冷子温度为 20°C (气压 0.131 Pa) 时的压力增宽  $\Delta\nu_p \sim 0.3 GHz$ , 与  $\Delta\nu_D$  可比拟, 因此观测的谱线应为综合线形, 用 Voigt 函数表示。严格地给出压强增宽系数应由 Voigt 函数计算得到, 所以, 作者测定的压

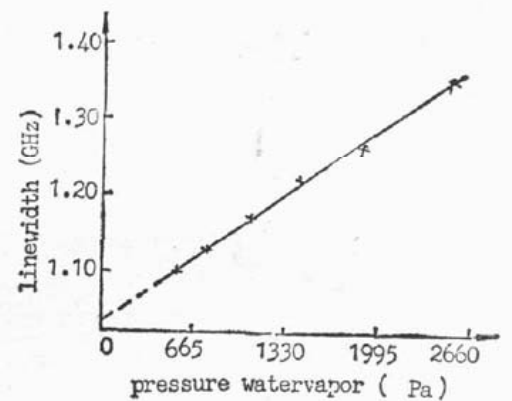


Fig. 5 The relation between the linewidth and pressure of line *b*

强增宽系数(0.128 MHz/Pa)应是 Doppler 线形上的压强增宽。

3. 在不考虑光反馈的情况下, LD 的频率稳定性  $df$  仅由它的工作温度和电流稳性决定:

$$df = \frac{df}{dt} \cdot dt + \frac{df}{dI} \cdot dI,$$

或  $|df| = |\beta_t| dt + |\beta_e| dI$ 。本实验中 LD 温度稳定性  $dt < 1 \times 10^{-3} \text{C}$ , 注入电流稳定性  $dI < 1 \mu\text{A}$ , 由此得到  $|df| < 30.6 \text{ MHz}$ 。

输出光束线宽由 LD 本身线宽(30 MHz)和注入电流噪声大小决定。实验中用蓄电池作电源驱动 LD, 在 100 kHz 带宽内电流噪声小于  $0.5 \mu\text{A}$ , 由此引起的线宽增宽为 1.7 MHz, 远小于 LD 本身线宽。本实验谱线分辨率最终决定于激光器的线宽。

4. 精心设计探测系统, 特别是使用低噪声相减放大技术, 使光谱检测灵敏度也有提高。检测最小吸收系数  $\sim 3 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ , 优于一般多普勒受限光谱的检测灵敏度, 接近调频谱(FMS)的水平。例如, 文献[3]报道, 当调频指数为  $\beta \sim 0.50$  时, 检测灵敏度为  $3.0 \times 10^7$ , 当  $\beta \sim 0.35$  时, 检测灵敏度则为  $6.7 \times 10^{-6}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] W. Lenth and M. Gehrtz, *Appl. Phys. Letter*, 1985, **47**, 1263.
- [2] H. Tsuchida *et al.*; *Japanese J. Appl. Phys.*, 1982, **21**, No. 1 (Jan), L1~L3.
- [3] L. G. Wang, *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**, No. 5(May), 871~876.
- [4] N. C. Wang and J. L. Hall, *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, No. 12(Dec), 2300~2303.
- [5] W. Baumann and R. Meche, *Z. Phys.*, 1933, **81**, 445~463.

## The overtone vibration spectrum of water vapor by using an AlGaAs diode laser

CHEN RONG, WANG QINGJI AND ZHENG LEMIN

(Department of Radio-Electronics, Beijing University, Beijing 100871)

(Received 4 March 1991; revised 17 May 1991)

### Abstract

26 absorption lines of water vapor in vibration-rotation band have been observed by using an AlGaAs diode laser around 822.6~823.2 nm. The minimum absorption coefficient  $\alpha \sim 3 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$  and the SNR-60 (for  $\alpha \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ) have been detected. A pressure broadening coefficient of 0.128 MHz/Pa was measured.

**Key words:** overtone vibration spectrum, pressure broadening.