

关于氨气分子在 $1.5 \mu\text{m}$ 吸收谱线及其在激光稳频上的应用

安浩哲 吴铁 蒋佩璇 谢毅

(北京邮电学院, 北京 100088)

摘要 本文介绍了氨气分子在 $1.5 \mu\text{m}$ 波段的六条吸收谱线, 并将理论计算的吸收线形半值全宽与实验值加以比较, 测得了波长为 $1.53735 \mu\text{m}$ 的激光通过气压为 $2.79 \times 10^3 \text{ Pa}$ 的氨分子吸收室后的吸收波形及其一阶微分波形, 并利用其对外腔半导体激光器进行稳频, 绝对频率稳定度可达 1 MHz 。

关键词 吸收谱, 稳频, 激光器, 氨气

On the NH_3 molecule's absorption line in $1.5 \mu\text{m}$ band and its application in frequency stabilization of laser

AN Haozhe, WU Tie, JIANG Peixuan, XIE Yi

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

Abstract This paper presented six absorption lines of NH_3 molecule in $1.5 \mu\text{m}$ band. The absorption profiles of the $1.5361 \mu\text{m}$ wave length laser in six different absorption cell are observed and compared the calculated half linewidth with the experimental value. At the same time the absorption profile and its differential profile of the $1.53735 \mu\text{m}$ laser passed through an absorption cell filled with NH_3 molecule with the barometric pressure of $2.79 \times 10^3 \text{ pa}$ are also observed. Using the results the frequency stabilization of external cavity semiconduct laser is carried out and the absolute frequency stabilization can reach 1 MHz .

Key words absorption line, frequency stabilization, laser, NH_3

现有的光通信系统基本上都是对半导体激光的光强进行调制, 没有充分利用激光所具有的相干性, 若利用其相干性, 对其频率或相位加以调制, 就能实现更高速、更大容量的通信, 这就要求半导体激光器的频率非常稳定, 因此必须对激光器进行稳频。由于用(原子)分子吸收谱线稳频具有精度高、受环境影响小, 并且单模光纤在 $1.5 \mu\text{m}$ 波段的损耗达 0.2 dB/km 以下, 故本文研究了氨气分子在 $1.5 \mu\text{m}$ 波段的吸收谱线, 并用此作为频率参考, 对半导体激光器进行稳频。

1 氨气分子在 $1.5 \mu\text{m}$ 波段的吸收谱线

粒子能级间跃迁时, 辐射或吸收具有某一确定中心频率和一定谱宽的电磁波, 氨气分子在

红外波段就具有一系列吸收谱线,它属于振动红外光谱,表 1 给出了氨气分子在红外光谱中的各个基频。

Table 1 The basal frequency of NH_3 molecule in infrared

Wavenumber (cm^{-1})	U_1	U_2	U_3	U_4
	3335.9	931.58	3414	1627.5
	3337.5	968.08		

在 1.5 μm 波段,有由以上基频组成的泛频谱带和组合频率谱带的谱线,测量吸收谱线的装置如图 1 所示,用锯齿波发生器扫描外腔半导体激光器的腔长,即扫描半导体激光器的纵模频率,当氨气分子对某一频率的激光有吸收时光探头测得的光功率有明显的下降。

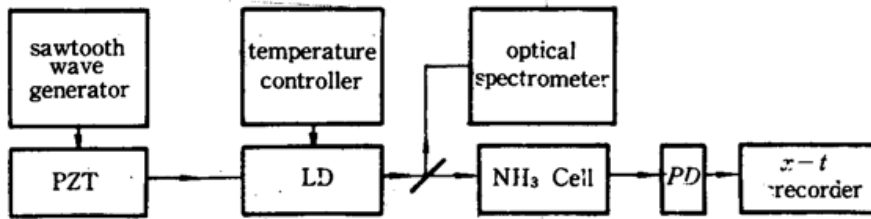


Fig. 1 Block diagram of NH_3 molecule absorption line measuring system

氨气分子吸收室是长为 50 cm,端面半径为 1 cm 的圆柱形玻璃管。氨气压为 $2.79 \times 10^3 \text{ Pa}$,吸收室的温度为 292.2 K,表 2 给出了它在 1.5 μm 波段的 6 条吸收谱线及测得的吸收率。

Table 2 The absorption lines of NH_3 molecule in 1.5 μm wave range

Wavelength (μm)	1.5179	1.5184	1.5193	1.5198	1.5361	1.53735
Absorption rate (%)	11	4	17	10	23	10

图 2 (a), (b) 是中心波长为 1.5198 μm 的激光光谱和吸收波形。

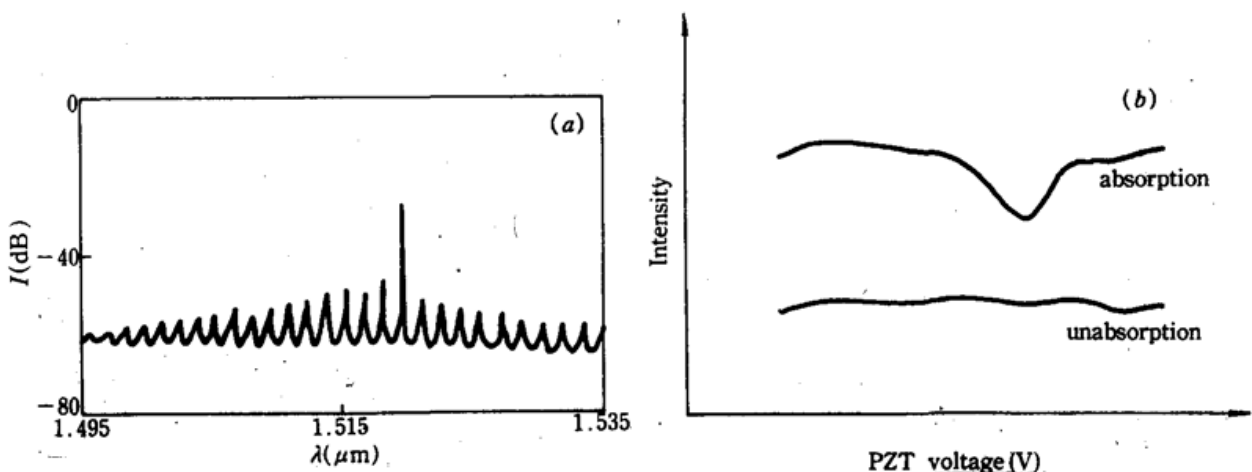


Fig. 2

(a) Laser spectrum of 1.5198 μm wavelength, (b) Absorption profile of 1.5198 μm wavelength

其它波长激光的吸收波形与此类同,只是由于模式不同,吸收波形的半值全宽、吸收深度有所不同。

令进入吸收室的光强为 I_0 ,气体对光的吸收系数为 $\alpha(\nu)$,吸收室的长度为 L ,则通过吸收室后的光强为

$$I = I_0 \exp[-\alpha(v)L] \quad (1)$$

令吸收的中心频率为 ν_0 , 则一般情况下, $\alpha(\nu)$ 取值为^[1]

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \exp\left\{-\left[\frac{2\sqrt{\ln 2}(\nu - \nu_0)}{\Delta D}\right]^2\right\} \quad (2)$$

$$\Delta D = \frac{2\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2\ln 2 K_B T}{M}} \quad (3)$$

式中, c 为光速, K_B 为玻尔兹曼常数, T 为气体的绝对温度, M 为分子的质量, 而

$$\alpha_0 = \frac{2}{\Delta D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\pi e^2}{mc} (M_1 - M_2) f \quad (4)$$

e 为电子电荷, M_1, M_2 分别是单位体积的基态和激发态的振子数, m 为电子质量, f 为振子强度,

$$\frac{dI}{d\nu} = G \exp[-\alpha(\nu)L] \alpha(\nu) \alpha(\nu) \Delta \quad (5)$$

$$G = -\frac{4I_0 L \ln 2}{\Delta D^2} \quad \Delta = 2(\nu - \nu_0)$$

$$Q = \frac{dI}{d\nu} = G \exp[-\alpha(\nu)L] \alpha(\nu) \cdot \Delta \quad (6)$$

上式即为一阶微分波形的表达式, 它在中心频率处的斜率为

$$\left. \frac{dQ}{d\nu} \right|_{\nu=\nu_0} = G \exp(-\alpha_0 L) \alpha_0 \quad (7)$$

令吸收深度为峰值吸收深度一半处的频率为 ν_1 , 则由(1)式, 有

$$\alpha(\nu_1 - \nu_0) = \Delta D \left\{ -\frac{1}{\ln 2} \ln \left[-\frac{1}{\alpha_0 L} \ln \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \exp(-\alpha_0 L) \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (8)$$

上式即为半值全宽的表达式, 由式(7), (8)可以看出, 当 α_0 增大时, 一阶微分波形在吸收波形中心频率处的斜率增大, 而吸收波形的半值全宽减小。

为了比较同一波长的激光在不同吸收室的吸收波形, 制作了 6 支吸收室, 各吸收室情况如表 3 所示。

Table 3 The state of every NH_3 cell

Number of cell	Length (cm)	Pressure (Pa)	Cell facet
0	50	2.790×10^3	
1	10	0.368×10^3	with AR coating and Brewster window
2	10	1.410×10^3	with AR coating and Brewster window
3	50	1.410×10^3	with AR coating
4	50	2.790×10^3	with AR coating
5	10	2.790×10^3	with AR coating and Brewster window

当激光波长为 $1.5361 \mu\text{m}$, 吸收室温度为 292.2 K 时, 各吸收室的吸收率、吸收系数、半值全宽值见表 4。

由实验结果可以看出, 当吸收室长度小而且气压低时, 无吸收现象, 这是由于吸收室内参与吸收的分子数少的缘故, 如 1 吸收室和 2 吸收室, 当吸收室气压不同而其它条件相同时, 气压高的吸收率大, 吸收系数大, 如 4 吸收室和 3 吸收室所示, 这是由于在同样的条件下, 气压高的吸收室 ($M_1 - M_2$) 大, 参与吸收的分子数多的缘故, 吸收室两端镀膜的比没有镀膜的吸收率大, 如 4 吸收室和 0 吸收室所示, 这是由于镀膜后, 等效于加大了激光器的输出功率。

当吸收室的温度下降时,由式(3),(4)可知,因 $(M_1 - M_2)$ 增大, ΔD 减小,所以 α_0 增大。

Table 4 The information of every NH_3 ($T = 292.2 \text{ K}$)

Number of cell	Absorpt. γ rate	Absorption coefficient	Half line width in exp.	Half line width in theory
0	23%	5.288	740 MHz	791 MHz
1				
2				
3	17%	3.843	658 MHz	796 MHz
4	25%	5.776	781 MHz	789 MHz
5	5%	4.846	658 MHz	757 MHz

2 用氨气分子吸收谱线稳定半导体激光器的频率

根据式(1),如果给半导体激光器加上一个调制频率为 ω ,最大调制频偏为 W 的调制信号,则通过吸收室后的光强为

$$I[v(t)] = I(v + W\cos\omega t) \quad (9)$$

上式的傅氏展开为

$$I[v(t)] = \sum_{p=0}^{\infty} I_p(v) \cos p\omega t \quad (10)$$

若送至锁定放大器的标准信号为

$$V = V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (11)$$

则相敏检波器对吸收波形的一阶微分信号为

$$V_0 = \frac{1}{2} V_m W I^{(1)}(v) \sin\phi \quad (12)$$

$$\Delta V_0|_{v=v_0} = -\frac{1}{2} \alpha V_m W I^{(2)}(v) \sin\phi \Delta v \quad (13)$$

α 为系统增益,从上式可以看出,一阶微分信号的变化量与频率变化量成正比,因此,当测得一阶微分信号的斜率后,误差电压的变化就可反映出频率的抖动,进而用电压负反馈对半导体激光器进行稳频,一阶微分信号的斜率越大,则系统对半导体激光器的频率变化越敏感,稳频效果就越好,因此,要取得好的稳频效果,应降低吸收室的温度,使 ΔD 增大, M_1 增大, M_2 减小,这样就导致了 α_0 的增大使一阶微分信号在吸收中心频率处的斜率增大。稳频系统如图3所示。

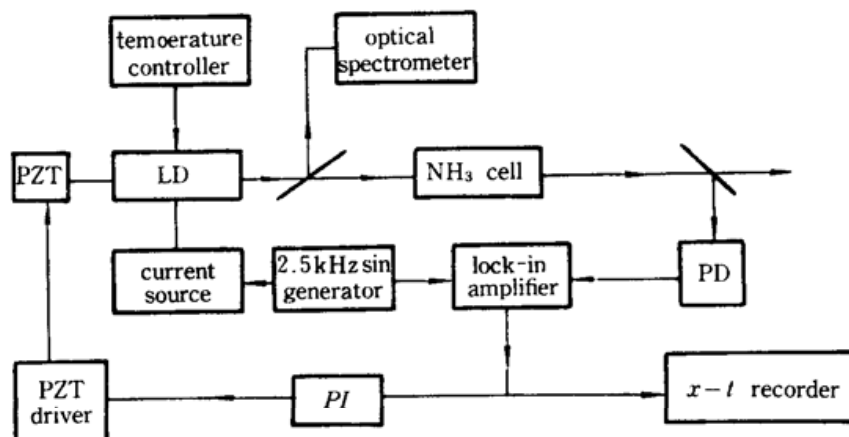


Fig. 3 Frequency stabilizing system

本实验中,激光器是粘有压电陶瓷的自聚焦棒外腔的半导体激光器,且用 F-P 腔进行扫描。吸收室是 0 吸收室,当调节压电陶瓷上电压为 17 V 时,谱线移动一个自由程的 1/3,所用

F-P 腔的自由程为 1.82 GHz, 故可得压电陶瓷电压变化 1 V 时, 激光器频移量为 35.69 MHz。

当激光器发射波长为 1.53735 μm 的激光时, 吸收波形和一阶微分波形见图 4。稳频和未稳频时的频率抖动见图 5。从图 4 (b) 看出, 当一阶微分信号变化 1060 mV 时, 激光器压电陶瓷电压变化 6.25 V, 故从图 5 可算出稳频后的频率抖动值为 1 MHz。由于在激光器的输出端没有加隔离器, 故在压电陶瓷调制激光器腔长时, 在某些长度处发生跳模现象, 使一阶微分波形两个极大值处的频差与吸收波形的半值全宽有误差。

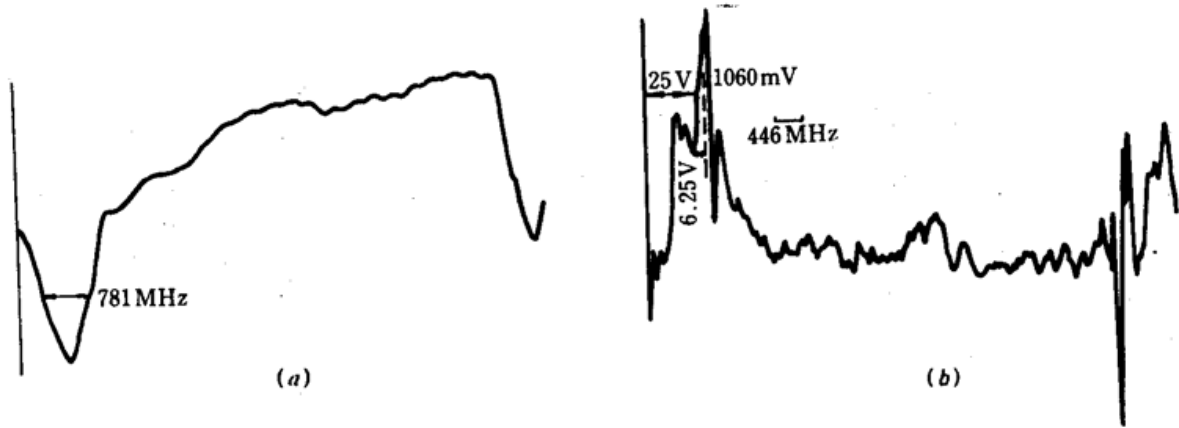


Fig. 4

(a) Absorption profile of 1.53735 μm wavelength; (b) Differential profile

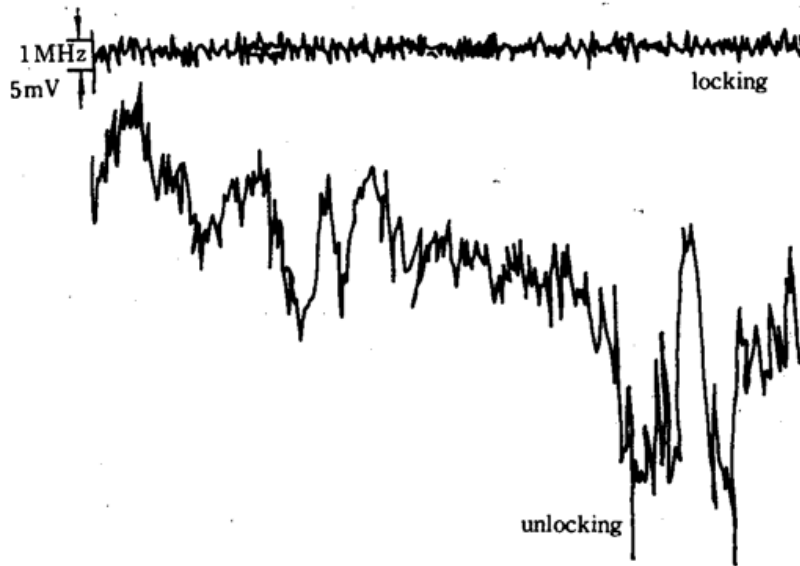


Fig. 5 Frequency fluctuation when frequency stabilized and unstabilized

参 考 文 献

- 1 佐藤孝, 须具浩之 *et al.*, 电子通信学会论文志, J69-C(3), 600(1986)