

用振镜调频技术获得 SF₆ 分子 高精度微分光谱*

吴桂林 韩健德 徐绍华 杨维纲 郑丽华

(大连理工大学物理系, 大连 116024)

摘要 利用振动腔外反射镜使入射到低气压 SF₆ 气体吸收池内的 CO₂ 激光的频率受到 Doppler 调制,并用相敏检波技术得到 SF₆ 分子的一阶微分光谱。对几条 SF₆ 分子吸收线的频率间隔进行了高精度的测量。最后讨论了这种获得微分光谱方法的优点。

关键词 多普勒效应,频率调制激光光谱,饱和吸收

1 引言

利用饱和吸收光谱技术,可获得无多普勒加宽的高分辨率激光光谱,从而可研究原子和分子的精细结构和超精细结构,同时对建立光频标和进行其他精密物理实验有重大意义。然而,由于通常的物质的吸收系数较小,饱和吸收峰难以从很强的激光输出功率背景和激光噪声中分辨出来。采用微分光谱技术,即用一个低频信号调制激光频率,当在可调谐区域内慢扫描激光频率时,运用相敏检波技术得到一阶微分信号,从而使原先淹没在激光输出功率背景和激光噪声中的饱和吸收峰可以较清楚地看到。但由于输出功率曲线本身的微分信号也比较大,如果吸收线的中心频率与激光增益曲线的顶点频率不一致,检测到的微分信号不对称,并且微分信号的过零点偏离吸收线中心,这就使精确确定谱线的中心位置变得困难。

用三次谐波检测技术^[1],可部分地消除激光输出功率背景的影响,从而提高谱线位置的测量精度,这种技术已被成功地用于激光频率稳定^[1,2]。由于该技术不能完全消除激光输出背景曲线的影响并要求检测系统具有很高的灵敏度,特别是由于存在调制加宽和调制畸变,严重影响了谱线中心频率和谱线宽度的测量精度。

激光输出功率背景和激光噪声对吸收谱线产生影响的根本原因,是在激光谐振腔上加交流调制信号,致使激光频率在受到调制的同时激光强度也受到调制。本工作通过振动腔外反射镜实现激光频率的多普勒调制,从而检测 SF₆ 分子对 CO₂ 激光支线的饱和吸收微分光谱。由于采用这种调频方法可从根本上消除激光参数对吸收过程的影响,所以得到的微分信号的过零点与气体分子的吸收线中心完全一致。

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994年9月22日; 收到修改稿日期: 1994年11月21日

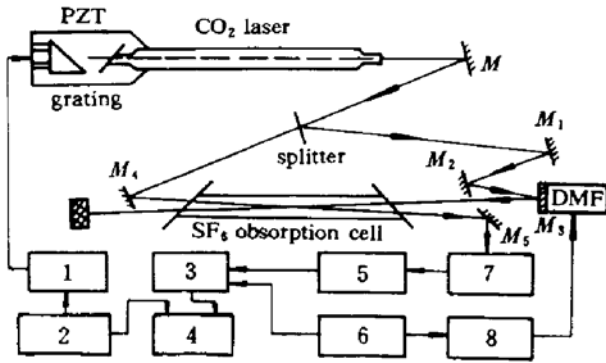


Fig. 1 Experimental setup

- 1, HV amplifier; 2, Sawtooth generator; 3, lock in;
4, x-y recorder; 5, preamplifier; 6, audio oscillator;
7, HgCdTe; 8, power amplifier

2 基本原理和实验装置

当平面反射镜以速度 V 运动时, 由于多普勒效应, 在实验室坐标系中观测到的经过该反射镜反射的光频率 ν 相对于入射到反射镜上的光谱 ν_0 产生的多普勒频率偏移 $\Delta\nu$ 为

$$\Delta\nu = 2(V/c)\nu_0 \cos\theta \quad (1)$$

式中 c 为真空中的光速, θ 为光传播方向与镜片运动方向的夹角。若反射镜以频率 f 作正弦运动, 则多普勒频移也以频率 f 作正弦变化。

实验装置如图 1 所示。半内腔 CO_2 激光器由金属基底凹面光栅和 ZnSe 平面镜构成, 腔长 1.1 m。用刻线为 120 条/mm 的 Littrow 光栅选择 CO_2 激光振荡支线, 光栅的一级衍射效率为 92%; 凹面曲率半径为 8 m, 固定在压电元件 PZT 上。激光器输出光束经分束板 S 分成强度比为 10:1 的两束光, 其中强光束经平面反射镜 M_1 , M_2 和 M_3 反射后通过低气压 SF_6 气体吸收池作为饱和光, 反射镜 M_3 固定在多普勒频率调制器 DFM 上。当 DFM 振动时, 经 M_3 反射的激光的频率受到多普勒调制, 该光束射出吸收池后被吸收掉。较弱的激光束经平面刀口反射镜 M_4 反射后进入吸收池作为探测光, 再经刀口反射镜 M_5 反射至 HgCdTe 探测器。由(1)式可知, 为了获得大的多普勒频移, 要求 M_3 沿传播方向振动, 使用刀口反射镜 M_2 使激光传播方向与 M_3 振动方向之间的夹角 θ 很小, 致使 $\cos\theta \approx 1$; 同时, θ 很小可以使 M_3 振动引起的反射光束的侧向平移很小, 从而确保两束激光在吸收池内的重迭区不发生变化。此外, 为了避免激光返回激光谐振腔引起激光频率的扰动, 饱和光束和探测光束之间应有一个夹角, 为使重迭作用区尽可能大以提高信号信噪比, 此夹角应尽可能小。所用吸收池长 1 m, 两束光在吸收池处的光斑直径为 8 mm, 两束光之间的夹角为 20 mrad。为保证激光管放电稳定, 选用了高稳流激光电源, 电流稳定度优于 1×10^{-3} ; 实验中还采取了一系列防振和隔声等被动稳频措施。

本实验采用饱和光频率调制方案。当通过 CO_2 激光谐振腔上的压电元件 PZT 慢扫描激光频率, 使之接近 SF_6 分子吸收线中心频率时, 弱探测光才对强饱和光产生的“烧孔”发生作用, 此时接收到的探测光含有与饱和光调制频率相同的强度调制成分。在适当相位条件下用锁相放大器和 x-y 记录仪可检测和记录到饱和吸收一阶微分光谱。

3 实验结果及分析

用 173 Hz 的正弦电压驱动 DFM 时, 对于 CO_2 激光获得的最大多普勒频移为 300 kHz。当饱和光功率为 200 mW、探测光功率为 20 mW、吸收气体压强为 2 Pa 时, 利用上述装置记录到的对应于 CO_2 激光 10 P(16) 支线的 SF_6 分子饱和吸收微分光谱如图 2 所示。由于锁相放大器只对调制频率附近且有特定相位的信号有响应, 因而其他频率成分的吸收背景噪声均在该技术中被消除, 所得到的饱和吸收峰的一阶微分信号的过零点亦为吸收线中心。由饱和吸收峰的一阶微分信号的峰峰频率间隔可得到饱和吸收峰的宽度。

实验中仔细研究了饱和光功率、吸收气体压强和频率调制宽度对微分光谱的影响。结果表明, 当饱和光功率从小到大变化时, 微分信号幅度增加, 同时微分信号的峰峰频率间隔增大, 原

因是较强的饱和光引起 SF₆ 气体在多普勒线型中的“烧孔”变深和功率加宽。所以，在能够得到具有较好信噪比的微分信号的前提下，选用较小的饱和光强度有利于获得高分辨率微分光谱。由于压力加宽的存在，增大吸收气体压强会使“烧孔”变宽，而过小的气体压强又会使“烧孔”变浅，均得不到好的微分信号。实验发现，当 SF₆ 气体压强为 1~2 Pa 时，可得到好的微分信号。当然，由于不同的吸收线的吸收系数不同，最佳饱和光强度和最佳压强也会有相应的差异。研究发现，当激光的频率调制宽度小于 300 kHz 时，微分信号幅度与频率调制宽度成正比，并且无调制加宽。

利用与 CO₂ 激光的 10 P(16) 支线对应的不同 SF₆ 分子饱和吸收峰的一阶微分曲线作为鉴频曲线，分别将两台相同的激光器锁定到不同吸收线的中心，并用拍频方法测量了 SF₆ 分子饱和吸收线的频率间隔。经过不同日期反复多次的实验，测得 SF₆ 吸收线 Q53F₁~Q38F₁+E+F₂，Q38F₁+E+F₂~Q43F₁ 以及 Q38F₁+E+F₂~Q45F₂ 之间的频率间隔分别为 9.93 MHz，16.49 MHz 和 19.36 MHz，测得拍频值的最大偏差小于 0.5 MHz。这一结果与文献[3]报道的结果 9.475 MHz，16.660 MHz 和 19.755 MHz 相一致。

4 结 论

(1) 利用腔外多普勒频率调制方法得到的微分光谱不但具有很高的灵敏度，而且微分信号的过零点不受输出功率曲线背景和激光噪声的影响，从而可以精确地确定分子吸收线的中心频率；(2) 这种调制方法信噪比高，仅要求有 200 kHz 的频率调制宽度，调制加宽很小，有利于精确测量吸收线的宽度；(3) 以往用三次谐波检测技术时需要调制激光谐振腔且要求宽调频宽度，而用这种调制方法不需调制谐振腔，仅饱和光频率受到小调制，即激光的光谱纯度高，所以调制加宽和调制畸变小，有利于获得更高的光谱分辨率。

我们认为，这种获得高分辨率微分光谱的方法可以在饱和吸收光谱中普遍适用。

参 考 文 献

- 1 A. J. Wallard. Frequency stabilization of the He-Ne laser by saturated absorption in iodine vapour. *J. Phys. Eng.*, 1972, 5: 926~930
- 2 吴桂林, 滕永杰, 徐绍华等. CO₂ 激光器腔外吸收室 4.3 μm 荧光稳频技术. 大连理工大学学报, 1989, 29(6): 635~638, 644
- 3 B. Bobin, C. J. Bordé, J. Bordé *et al.*. Vibration-rotation molecular constants for ground and ($\nu_3 = 1$) states of ³²SF₆ from saturated absorption spectroscopy. *J. Mol. Spectrosc.*, 1987, 121: 91~127

High Precision Spectroscopy of SF₆ with a Frequency Modulation Technique

Wu Guilin Han Jiande Xu Shaohua Yang Weigang Zheng Lihua

(Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

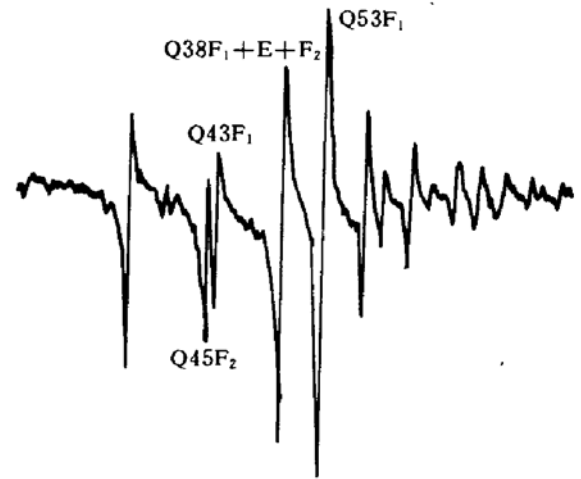


Fig. 2 The SF₆ differential spectrum obtained with the 10 P(16) line of a CO₂ laser

Abstract An incident CO₂ laser beam into a low pressure SF₆ cell was frequency modulated by an external dithering mirror through the Doppler effect. The differential spectrum of SF₆ has been detected by utilizing the phase-sensitive technique. The frequency differences among several saturated absorption lines of SF₆ were precisely measured. The practical significance of the method is discussed.

Key words FM laser spectroscopy, Doppler effect, saturated absorption

CHINESE JOURNAL OF LASERS B

Vol. B4, No. 2 (Series No. 20), April 20, 1995

(March/April)

CONTENTS

• LASER DEVICES •

Dye laser-pumped Cr:LiSrAlF₆ laser *WU Xing T. Okada K. Haeda* (97)

• LASER PHYSICS AND LASER CHEMISTRY •

Two-photon induced UV fluorescence in photo-active spiropyran molecules
..... *Chi Lunguang Wang Zugeng* (101)

Spectral study of fullerene doped optical glasses
..... *Meng Zhucong Lin Fucheng, Mao Sen et al.* (105)

Low-temperature spectral properties and zero-phonon transitions of alkali halide crystal materials
bombarded with electrons and implanted with ions *Gu Hongen* (111)

Pure dispersive optical bistability of four-level system in a Fabry-Perot cavity
..... *Ji Ying Lin Fucheng* (117)

Range and line resolved Brillouin scattering in pure water using pulsed Nd:YAG laser
..... *Liu Dahe Quan Xiaohong* (123)

Propagation and beam quality of flattened Hermite-Gauss beams
..... *Hua Renzhong Qian Liejia Fan Dianyuan et al.* (127)

• HOLOGRAPHY AND INFORMATION PROCESSING •

Two-dimensional compact perfect shuffle optical interconnection
..... *Zhang Erping Yu Chongxiu Zhou Jing et al.* (133)

Complex-valued vector-matrix multiplication architecture *Zhou Changhe Liu Liren* (137)

Hybrid binary joint transform correlator for adaptive real-time pattern recognition
..... *Wang Dayong Xie Weixin Li Yulin et al.* (143)

Polarization spectral hole-burning in organic materials *Yin Yu Zhao Youyuan et al.* (151)

• THIN FILM TECHNOLOGY •

KrF laser-induced damage to ZrO₂/SiO₂ coatings *Wang Naiyan Gao Huailin* (161)

Study of the thermal diffusivity of optical coating by photo-thermal deformation technique
..... *Zhou Dongping Fan Zhengxiu* (169)

• LASER APPLICATIONS •

Study of the laser light effect on improving sheep semen quality
..... *Yue Wenbin Liu Wenzhong Hu Yueling et al.* (175)

Measurement of vibration derivative's amplitude and phase by strobe and optical phase shifting
shearography *F. Chen Y. Y. Hung G. M. Grown* (181)

Optical measuring method for quality monitoring purpose in laser welding of tin-plates
..... *Luo Hong Hu Lunji Huang Shuhuai et al.* (187)