

外腔式二极管激光器的低频电压波长 调制和谐波探测的实验研究*

肖连团 李昌勇 李 倩 贾锁堂 周国生

(山西大学电子信息技术系 太原 030006)

提要 对单模、可调谐外腔式二极管激光器采用调节激光外腔压电电压的方法实现波长调制,利用数字锁相放大器处理光谱信号的高次谐波。通过对 Cs 原子 D_2 线的谐波探测证明用高于二次的高次谐波探测气体的直接吸收光谱可以获得更高的分辨率和信噪比。

关键词 外腔式二极管激光,谐波探测,电压调制

1 引 言

对可调谐激光采用波长调制并对吸收信号进行二次谐波处理是近年来发展起来的一种新型的激光光谱分析法,已经被广泛应用于环境检测、大气科学、痕量分析、光谱测量等领域^[1,2]。波长调制技术通常采用改变二极管激光的驱动电流来调制激光波长,即把热介质控制在恒温状态,在 10 kHz~ 10 MHz 的调制频率范围内,改变注入电流来调制激光器的波长。为了得到最佳信噪比,需要在确定范围内注入调制电流,以便产生足够宽的光频带。但是这种波长调制法同时导致一定深度的振幅调制,造成较大的能量起伏,从而限制了测量的高灵敏度。另外,至关重要的是在调制过程中要避免有任何瞬间电流低于激光器阈值或高于允许的最大电流或导致激光模式跳变。

本文对外腔式二极管激光通过施加低频交流电压控制其反馈镜的压电陶瓷,实现输出光连续调谐的低频波长调制方法,测量 Cs 原子 D_2 线(未饱和)的调制吸收光谱,并利用锁相放大器获得了信号的谐波光谱。实验结果表明调制压电电压引起的输出光能量起伏较小,二次谐波($2f$)探测的信噪比有较大的改善,而高次谐波探测较常见的 $2f$ 探测方法具有更高的分辨率和信噪比。

2 实验装置

实验装置如图 1,用外腔式二极管激光器(美 New Focus 6017)作抽运源。该激光器采用 Harvey-Myatt 结构,其工作原理见参考文献[3]。实验中采用电压调制的方法,其过程为把调制电压加到激光器外腔的反馈镜后面的压电陶瓷上,使反馈镜产生转动,引起输出激光波长的

* 国家自然科学基金(19774039)和山西省自然科学基金(971026, 981003)资助项目。

收稿日期: 1999-07-11; 收到修改稿日期: 1999-08-27

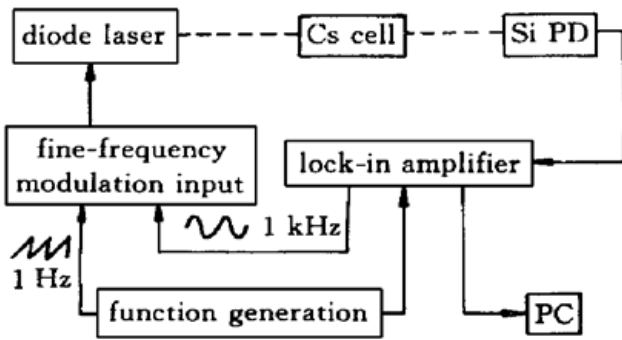


图 1 用于探测 Cs D_2 线谱谐波的实验装置结构图

PD: 光电二极管; PC: 计算机

Fig. 1 Schematic of optical and instrumentation setup used to detect the harmonic spectrum of the Cs D_2 line

PD: Si photodiode; PC: personal computer

变化。激光器的工作温度为 26°C , 固定输入电流 55 mA , 输出功率为 8.5 mW 。输出激光在短时间内的线宽小于 300 kHz (50 ms 内)。压电陶瓷的预置直流偏压为 95 V 左右, 激光输出的中心波长为 852.11 nm (空气中)。激光器的可调谐范围为 70 GHz , 电压调制(精细频率调制)带宽为 3.5 kHz , 调制度约为 0.7 GHz/V 。调制信号取自锁相放大器(美 SR830)的内部振荡器输出的正弦电压。函数信号发生器(美 HP 33120A)产生慢扫锯齿波电压, 与调制信号叠加后送入激光器的频率调制输入口, 叠加到预置直流偏压上实现对输出光波长的调制和扫描。

函数信号发生器输出的同步方波置入锁相放大器的辅助输入(ALX3), 作为锁相放大器内部存储数据的同步信号, 锁相放大器(SRS830)可以探测任何 $n \leq 19999$ 次谐波, 只要 n 次谐波频率值不超过 102 kHz 。谐波探测的转换可通过改变锁相放大器的谐波选择来实现。

在 $\Phi 20\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的石英样品池中抽真空至 $133.3 \times 10^{-6}\text{ Pa}$ 后充以纯金属铯作为实验样品, 光电探测器为一普通的 Si 光电二极管。通过计算机与数字锁相的数字化通信实现数据的采集和处理。

3 实验结果与分析

外腔式二极管激光器工作于正弦波电压调制下, 输出光频率 $\nu(t) = \nu_0 + a \sin(2\pi f t)$, 其中 ν_0 为激光器在预置直流偏压时输出的光频率大小, f 为调制频率, $a = m\gamma_0$, m 为调制深度系数, γ_0 代表气体吸收的多普勒谱线宽度。铯原子在室温及超低压状态下的吸收信号呈高斯线型, 即主要受温度展宽所影响, D_2 线(未饱和)的谱线线宽约为 500 MHz 。

3.1 调制频率的选择

选择合适的调制频率可获得更高的信噪比。D. B. Oh 等^[4]通过在 200 Hz 的正弦频率调制激光波长, 用外腔式二极管激光器在红外线($1.5\text{ }\mu\text{m}$)附近观察了乙炔的振动跃迁; Nguyen 等^[5]用外腔式二极管激光器在调制频率为 108 Hz 时, 探测了氧原子在 760 nm 附近的 R 段的电子吸收谱。基于 Harvey-Myatt 形式的外腔式二极管激光是利用压电陶瓷控制后镜的倾斜角的, 由于机械部件的作用, 决定了这种采用外部电压调谐激光波长的方法只能在低频下工作(带宽 $2\sim 4\text{ kHz}$)^[3]。图 2 给出在相同幅度正弦电压(625 mV RMS)作用下不同调制频率对应激光波长调谐大小的相对测量结果。可以看出, 调制频率

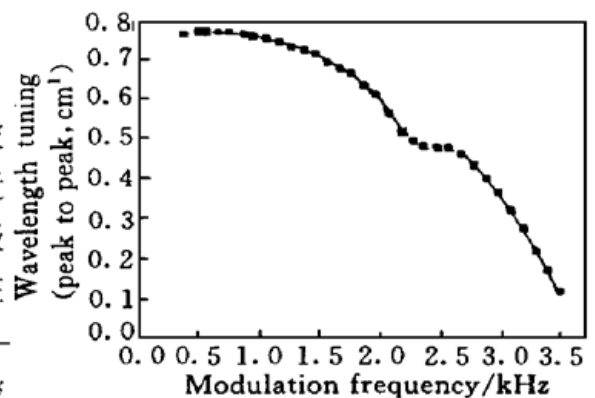


图 2 二极管激光器调制输出的频率特性曲线 (■为测量数据点)

Fig. 2 Tuning characteristics of a specific diode laser as a function of the modulation frequency (■ is the experimental data)

越大, 输出激光的波长调谐范围越小。这是由压电陶瓷的工作频率特性造成的。在波长调制光谱中, 通常采用高频调制以减小低频噪声 ($1/f$ 噪声), 兼顾到波长调谐范围(压电陶瓷的工作电压范围为 $0\sim 117\text{ V}$), 这里选择的调制频率为 1 kHz 。

3.2 信噪比的分析

采用 1 Hz 慢扫锯齿波电压频率(远小于调制频率 1 kHz), 把锁相放大器的积分时间固定在 30 ms , 保证吸收光谱完整记录并能定量分析。实验过程中把探测的背景信号作噪声, 以谐波信号作信息, 测量各种不同条件下的信噪比, 比较各种测试条件下的结果, 进行最佳信噪比分析。

图 3 中, $2(a)$, $4(a)$ 和 $6(a)$ 表示激光在调制的同时慢扫通过样品后探测到的二次、四次及六次谐波信号。 $2(b)$, $4(b)$ 和 $6(b)$ 记录的是在去掉样品后得到的二次、四次及六次谐波信

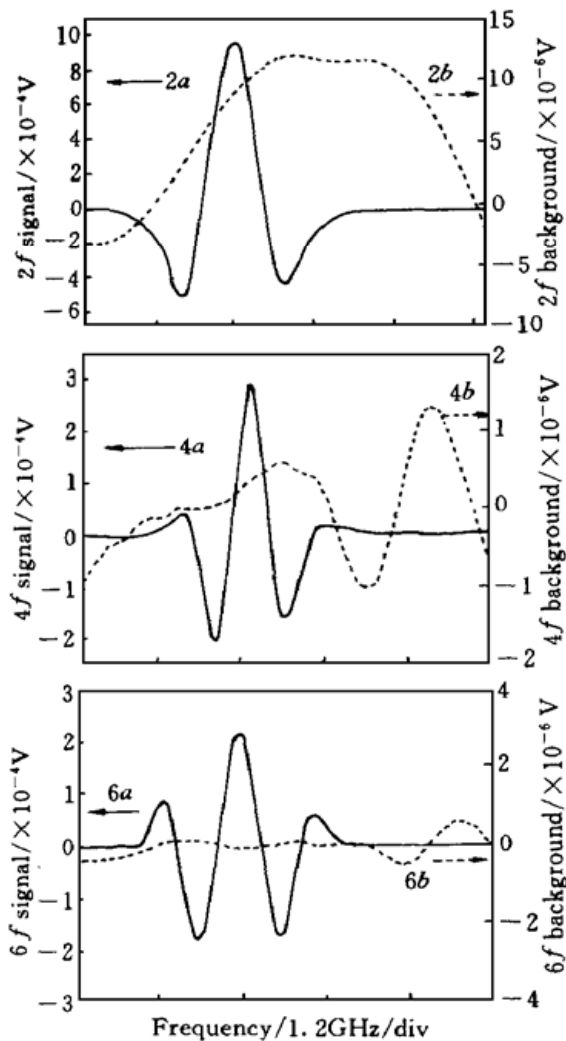


图 3 $2f$, $4f$ 和 $6f$ 谐波探测信号 $2a$ ($m = 2.1$), $4a$ ($m = 3.6$) 和 $6a$ ($m = 5.2$) 与其相应的背景信号 $2b$, $4b$ 和 $6b$ (m 为调制深度系数)

Fig. 3 The $2f$, $4f$ and $6f$ measured harmonic signals $2a$ ($m = 2.1$), $4a$ ($m = 3.6$) and $6a$ ($m = 5.2$) and its background signals $2b$, $4b$ and $6b$

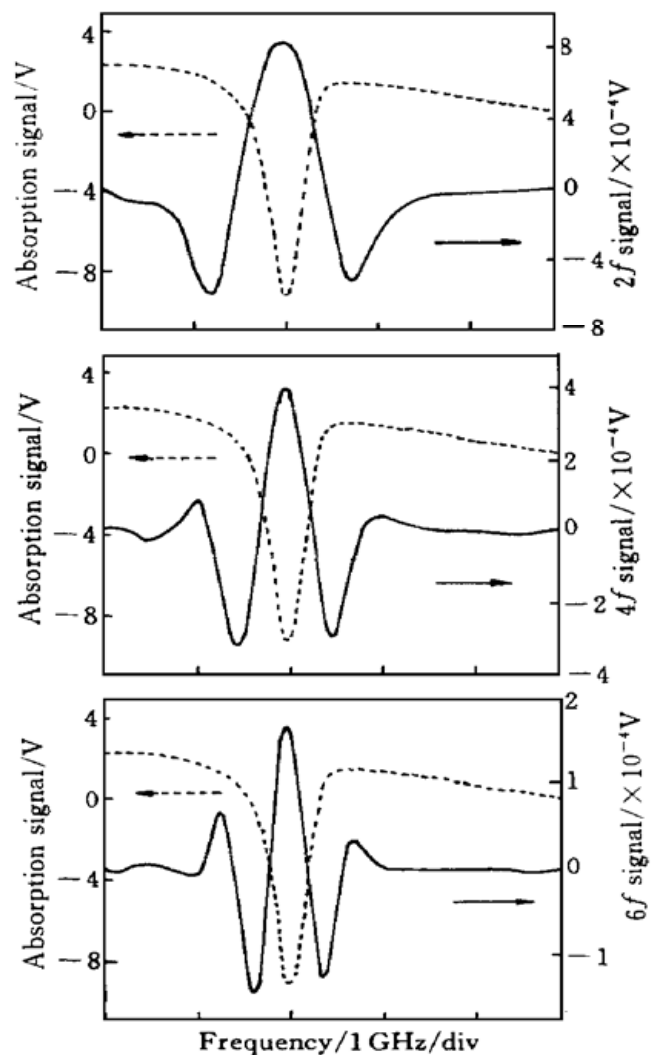


图 4 $2f$, $4f$ 和 $6f$ 谐波展宽光谱信号与铯原子 D_2 线的对比 ($m = 2.1$)

Fig. 4 Measured harmonic signals compared with the direct absorption of Cs D_2 line. Figure shows the $2f$, $4f$ and $6f$ modulation-broadened spectra (black line) and absorption line (dash line). Wavelength modulation index was fixed at $m = 2.1$

号,表示能量起伏对谐波信号产生的背景信号。波长调制过程的同时伴随着激光能量的调制,这些背景信号作为测量的基准决定了测量结果的下限。我们发现,谐波次数越高,背景信号即噪声越小,同时谐波信号也有一定程度的减小。对于高斯吸收谱线,对应于 $2f$, $4f$ 和 $6f$ 探测 m 的最佳值分别为2.1,3.6,5.2^[6]。实验测得当 $m = 2.1$ 时, $2f$ 探测的信噪比 $SNR = 80$;当 $m = 3.6$ 时, $4f$ 探测的 $SNR = 300$;在 $m = 5.2$ 时, $6f$ 探测的 $SNR = 460$ 。可见高次谐波探测可以提高信噪比。在高灵敏探测过程中用高次谐波探测比用二次谐波探测更为有利。

3.3 分辨率的分析

波长调制和谐波探测法提高了测量的信噪比,但是得到的是探测器的原输出信号经过数学转换并且产生了调制展宽的信号^[7],这种调制展宽严重地限制了高分辨率光谱的获得。Dharamsi等^[8,9]进行了Voigt线型下高次谐波探测用于气体高分辨率光谱的测量研究。图4为在固定调制深度系数 $m = 2.1$ 条件下,实验获得的 $2f$, $4f$ 和 $6f$ 谐波展宽光谱信号与铯原子 D_2 线的对比。实验结果表明,二次谐波探测产生的调制展宽最大,谐波次数越高,调制展宽越小。相应 $2f$ · $4f$ · $6f$ 展宽比率约为16·6·1。可见用高于二次谐波的较高次谐波探测微弱信号可以获得较高的分辨率。六次谐波探测的调制展宽(中心峰)接近直接吸收信号的线宽,可用来测量光谱的精细结构以及进行吸收谱线邻近的两种气体的痕量分析,实际测得的光谱分辨率与常见的频率调制(FM)^[6]得到的分辨率相近。

4 结 论

可调谐式二极管激光器由于其体积小、固体介质的可靠性与稳定性、以及价格低廉等特点,在光谱学和环境学中得到了广泛应用。Harvey-Myatt外腔式设计是在所有Fabry-Perot二极管激光器中实现无跳模、窄线宽的最佳方案之一^[3,10]。利用这种外腔式二极管激光的新型分析技术——低频波长调制和谐波探测法,我们对Cs原子 D_2 线(未饱和)进行了测量,获得了高次谐波探测方式下的高灵敏度以及高分辨率的吸收光谱。这种低频电压调制的方法较Bruce^[11]建议的高频波长调制的优点是不需要快速的光电探测器;同时,利用锁相放大器(如SR830)很容易获得信号的高次谐波。另外调制电压电压较常见的电流调制引起的输出光能量起伏小1~2个数量级,背景噪声较小,探测灵敏度得到了进一步提高。

在这里 $6f$ 谐波探测技术是最好的。二次谐波信号有很高的信号峰值,却也存在着很高的背景噪声,调制展宽最大; $6f$ 以上的高次谐波探测,虽然没有更高的背景噪声,但是信号的峰值变得很低,不利于探测和分析。在10 mW激光功率,10 Hz的测量带宽时,低频波长调制与谐波探测技术用于直接吸收测量可以获得大约 10^{-6} 的灵敏度^[7]。如果采用自动平衡探测器^[5], $2f$ 和 $4f$ 探测的信噪比会得到进一步改善。

参 考 文 献

- 1 I. Linnerud, P. Kaspersen, T. Jaeger. Gas monitoring in the process industry using diode laser spectroscopy. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**(3): 297~ 305
- 2 H. Riris, C. B. Carlisle, L. W. Carr *et al.*. Design of an open path near-infrared diode laser sensor: application to oxygen, water, and carbon dioxide vapor detection. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30): 7059~ 7066
- 3 K. C. Harvey, C. J. Myatt. External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12): 910~ 912

- 4 D. B. Oh, D. C. Hovde. Wavelength-modulation detection of acetylene with a near-infrared external-cavity diode laser. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30): 7002~ 7005
- 5 Q. V. Nguyen, R. W. Dibble. High-resolution oxygen absorption spectrum obtained with an external-cavity continuously tunable diode laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24): 2134~ 2136
- 6 J. A. Silver. Frequency modulation spectroscopy for trace species detection: theory and comparison among experimental methods. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(6): 707~ 717
- 7 E. I. Moses, C. L. Tang. High-sensitivity laser wavelength-modulation spectroscopy. *Opt. Lett.*, 1977, **1**(4): 115~ 117
- 8 A. N. Dharamsi, A. M. Bullock. Applications of wavelength-modulation spectroscopy in resolution of pressure and modulation broadened spectra. *Appl. Phys. B*, 1996, **63**(3): 283~ 292
- 9 A. N. Dharamsi, Y. Lu. Sensitive density-fluctuation measurements using wavelength-modulation spectroscopy with high-order-harmonic detection. *Appl. Phys. B*, 1996, **62**(3): 273~ 278
- 10 D. M. Bruce, D. T. Cassidy. Detection of oxygen using short external cavity GaAs semiconductor diode lasers. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(9): 1327~ 1332
- 11 D. T. Cassidy, D. M. Bruce, B. F. Ventrudo. Short-external-cavity module for enhanced single-mode tuning of InGaAsP and AlGaAs semiconductor diode lasers. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(10): 2385~ 2388

Experimental Study of Low-frequency Voltage Wavelength Modulation and Harmonic Detection Using an External-cavity Diode Laser

Xiao Liantuan Li Changyong Li Qian Jia Suotang Zhou Guosheng

(Department of Electronics & Information Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006)

Abstract A low-frequency wavelength modulation spectroscopy is acquired with an external-cavity tunable diode laser. The wavelength modulation is achieved using the voltage tuning by scanning the piezoelectric stepper motor with rotating of the end mirror in the laser cavity. With optimum modulation frequency of 1-kHz a harmonic detection processed by a lock-in amplifier for cesium D_2 line was carried out. It is found that $6f$ -harmonic detection is best here with the signal-to-noise voltage ratio (SNR) being 460. It is also shown that nearly overlapping lines may be better resolved by using $6f$ harmonic detection due to the much less modulation-broadened spectra.

Key words external-cavity diode laser, harmonic detection, voltage modulation