

文章编号: 0258-7025(2003)09-0791-04

铯原子 D₂ 线调制转移光谱的实验研究

刘涛, 李利平, 闫树斌, 雷宏香, 张天才, 王军民*

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西太原 030006)

摘要 以光栅外腔半导体激光器(ECDL)作为光源,获得了铯原子 D₂ 线 B 线($6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=3,4,5$)的调制转移光谱(MTS)。与传统的饱和吸收光谱作了比较,并对不同调制频率下的调制转移光谱特性作了实验研究。将频率调制信号直接加在声光频移器上,相对简化了调制转移光谱的实验装置。

关键词 量子光学;铯原子 D₂ 线;调制转移光谱;声光调制器

中图分类号 O 431.2 **文献标识码** A

Experimental Investigation of Modulation Transfer Spectrum of Cesium D₂ Line

LIU Tao, LI Li-ping, YAN Shu-bin,

LEI Hong-xiang, ZHANG Tian-cai, WANG Jun-min

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
and Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract Employing a grating-external-cavity diode laser (ECDL) as laser source, the modulation transfer spectrum (MTS) of cesium D₂ line ($6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=3,4,5$) is obtained. Instead of using a electro-optical modulator (EOM), a directly frequency modulation to an acousto-optical modulator (AOM) in MTS device is adopted, which more or less simplifies the spectroscopic device. Under different modulation frequencies the character of MTS is investigated experimentally.

Key words quantum optics; cesium D₂ line; modulation transfer spectroscopy; acousto-optical modulator

1 引言

基于非线性近简并四波混频过程的光谱方法——调制转移光谱(MTS)^[1~4]可以从根本上消除谱线的多普勒背景,而且具有高灵敏度、高分辨率等优点,是目前最先进的高分辨光谱技术之一。考虑一束弱探测光和另一束受到频率调制的强抽运光相向在原子(或分子)气室中传播的情形。被调制的抽运光其频率成分中有抽运光中心频率 ν 以及频率调制所产生的边带 $\nu \pm nf$, f 为调制频率。在调制较浅

时可近似忽略高阶边带,而仅考虑正负一阶边带 $\nu \pm f$ 。在原子(或分子)样品的三阶非线性效应作用下,发生近简并四波混频过程,强抽运光的频率调制可以转移到原本未调制的弱探测光上(故称为调制转移光谱)。并且这种调制转移仅在亚多普勒共振条件得到满足的情况下产生^[1, 3],调制转移光谱中不再存在多普勒背景。弱探测光中的一阶边带与探测光中心频率的拍频信号用光电探测器接收,再经相敏检波,当激光频率扫过原子(或分子)样品的吸收线时即可获得调制转移光谱。

收稿日期:2002-04-23;收到修改稿日期:2002-07-23

基金项目:国家自然科学基金(批准号:60178006)、山西省自然科学基金(项目编号:20021030)和山西省回国留学人员科研项目资助课题。

作者简介:刘涛(1976.6—),男,江西吉安人,博士研究生。现主要从事光场与原子相互作用方面的实验研究。E-mail: liutao@mail.sxu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wvjmm@sxu.edu.cn

当调制频率小于原子(或分子)样品谱线的亚多普勒线宽时,调制转移光谱为类色散型函数,中心点处具有较大的斜率,具有良好的鉴频特性,可用于激光器的绝对稳频^[4~7]。其优点是:不仅谱线的多普勒频移问题可得到解决,而且由于调制转移光谱中激光频率调制不是直接加在激光器上,还可避免对激光器直接进行频率调制扰动而导致的额外频率噪声。

I_2 分子吸收线由于在光频标中的特殊地位, I_2 分子在 612 nm^[4,10], 532 nm^[5~9] 及 541 nm^[11] 处吸收线的调制转移光谱及其在激光绝对稳频中的应用方面受到了较多的关注。此外, R. Blatt 研究组先后在实验中研究了 Te_2 分子在 467 nm^[12] 和 493 nm^[13] 处吸收线的调制转移光谱; Nobuhiko Ito^[14] 采用半导体激光器谐振倍频获得的 421 nm 可调谐蓝光进行了铷 85 原子 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ 跃迁线的调制转移光谱研究,并尝试了采用调制转移光谱进行锁频。

我们则采用光栅外腔式半导体激光器(ECDL)作为光源通过铯气室获得了铯原子 D_2 线 B 线的调制转移光谱,并在不同调制频率下对调制转移光谱特性作了研究。与通常采用的调制转移光谱装置的不同点是:将频率调制直接加在了抽运光路中的声光频移器上,而未采用电光相位调制器,相对简化了实验装置。

2 实验装置

实验装置示意图见图 1。852 nm 的 Littman 光栅外腔式半导体激光器的输出通过 40 dB 的光隔离器以消除光反馈,再通过分束器分出两束功率小于 2 mW 的光束,一束用作铯饱和和吸收光谱监测,作为标准频率,另一束进入铯调制转移光谱装置。用作饱和和吸收光谱的光束经半波片和偏振分光棱镜反射到铯气室的轴向上,通过四分之一波片变换为圆偏振光进入铯气室作为饱和吸收的抽运光束;透射部分经中性衰减片后被全反镜原路返回铯气室作为探测光束,经偏振分光棱镜透射后进入光电探测器。

用于调制转移光谱的光束经半波片和偏振分光棱镜分为偏振相互垂直的两束,可以通过适当旋转半波片以改变两束光之间的相对强度。其中较强的一束(s 偏振)经声光调制系统 AOM(Crystal Technology Inc., Model 3080122)后被频移 80 MHz,反射进入 30 mm 长的铯气室(室温下工作,未

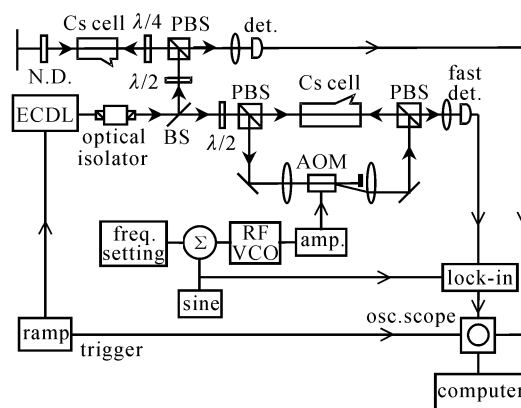


图 1 实验装置示意图

ECDL:光栅外腔半导体激光器;BS:分束片; $\lambda/2$:半波片; $\lambda/4$:四分之一波片;PBS:偏振分光棱镜;N. D.:中性衰减片;det.:光电探测器;AOM:声光调制器;amp.:射频功放;RF VCO:射频压控振荡器; Σ :加法器;freq. setting:射频压控振荡器频率设置电压;sine:正弦波信号;lock-in:锁相放大器;ramp:三角波扫描信号

Fig. 1 Diagram of experimental setup

ECDL: a grating-external-cavity diode laser; BS: beam splitter; $\lambda/2$: half-wave plate; $\lambda/4$: quarter-wave plate; PBS: polarization beam splitter cube; N. D.: neutral density filter; det.: photo-detector; AOM: acousto-optic modulator; amp.: radio-frequency power amplifier; RF VCO: radio-frequency voltage-controlled oscillator; Σ : signals combiner; freq. setting: voltage of frequency setting for RF VCO; sine: sine-wave signal; lock-in: lock-in amplifier; ramp: triangle-wave ramp signal

对铯气室控温)作为抽运光束(铯泡前光功率约 1 mW 左右,光斑直径约 3 mm)。射频压控振荡器(RF-VCO, Mini-Circuits ZOS100)输出经适当衰减后由射频功放模块(Mini-Circuits ZHL-1-2W)放大用来驱动 AOM。与通常采用的调制转移光谱装置的不同点是:未采用电光相位调制器,而是将频率调制直接加在抽运光路的声光频移器上,从而相对简化了光谱装置。正弦频率调制信号通过加法电路与 RF-VCO 频率设定用的直流电压叠加后加到 RF-VCO 频率控制端口,在实现抽运光频移的同时实现频率调制。光路中 AOM 前面的聚焦透镜使入射到 AOM 的光束的光斑大小合适,以提高 AOM 衍射效率;AOM 后面的透镜将一级衍射光准直,与入射光方向平行。实验中 AOM 前面使用焦距 200 mm 的凸透镜,经仔细调整 AOM,所获得的典型衍射效率约 70%。

较弱的一束(p 偏振)进入铯气室,与抽运光束相向传输且光路严格重合,作为探测光束(功率约 100 μ W 左右,光斑直径约 2 mm)。 p 偏振的探测光经偏振分光棱镜透射与抽运光分开,进入光电探测

器,探测经过四波混频过程在探测光中产生的一阶频率边带与探测光中心频率的拍频信号。在调制频率附近的交流信号成分,与正弦频率调制信号送入锁相(SRS Model SR-844, 25 kHz~200 MHz)在调制频率处进行相敏检波。由于调制频率 f 远低于声光频移器 AOM 的工作频率 80 MHz,故强抽运光被频移 80 MHz 即可起到光隔离的作用。

3 实验结果及讨论

激光频率由加在 ECDL 光栅外腔压电陶瓷(PZT)上的低频三角波电压在铯原子 D_2 线 B 线($6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=3,4,5$)附近扫描。此时,

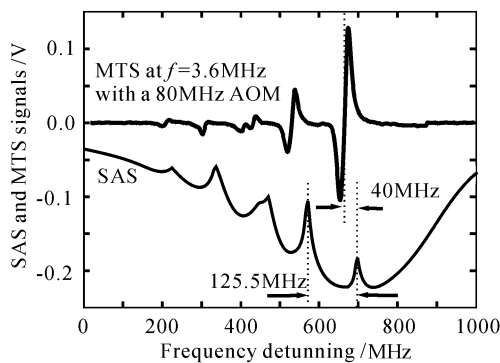


图 2 上方曲线(MTS)为铯原子 $6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=3,4,5$ 跃迁典型的调制转移光谱,抽运光路中的声光调制器工作在 80 MHz,其正弦调制频率为 3.6 MHz。下方曲线(SAS)为相应的饱和吸收光谱。相对于饱和吸收光谱而言,调制转移光谱红移了 40 MHz,正好是声光调制器工作频率的一半。曲线中的 6 个分量从左到右分别对应于铯原子 $F=4 \rightarrow F'=3$ 跃迁, $F=4 \rightarrow F'=3,4$ 交叉线, $F=4 \rightarrow F'=4$ 跃迁, $F=4 \rightarrow F'=3$ 和 5 交叉线, $F=4 \rightarrow F'=4$ 和 5 交叉线,和 $F=4 \rightarrow F'=5$ 跃迁

Fig. 2 Typical modulation transfer spectrum of cesium $6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=3,4,5$ line with a modulation frequency of 3.6 MHz in 80 MHz-shifted pump beam (MTS, upper curve). A red shift of 40 MHz, a half of the working frequency of AOM, is indicated in comparison with the saturated absorption spectra (SAS, lower one). From left to right the six components in each curve correspond to $F=4 \rightarrow F'=3$ transition, $F=4 \rightarrow F'=3$ and 4 crossover, $F=4 \rightarrow F'=4$ transition, $F=4 \rightarrow F'=3$ and 5 crossover, $F=4 \rightarrow F'=4$ and 5 crossover, and $F=4 \rightarrow F'=5$ transition, respectively

可在示波器中比较由饱和吸收装置输出的带有多普勒背景的饱和吸收谱与由调制转移光谱装置中经锁相放大器相敏检波后输出的调制转移光谱。图 2 中下方的曲线为典型的铯原子 D_2 线 B 线的饱和吸收光谱,上方的曲线则是在调制频率 $f=3.6$ MHz 时获得的典型的铯 D_2 线 B 线调制转移光谱(记录时间常数为 300 μ s,多普勒背景被彻底消除)。图 2 中,对应于 $F=4 \rightarrow F'=5$ 超精细跃迁的饱和吸收谱线半高宽度约 15 MHz,较铯原子 D_2 线的自然线宽 $\Gamma=5.2$ MHz 要宽;对应于 $F=4 \rightarrow F'=4$ 超精细跃迁和 $F=4 \rightarrow F'=3,5$ 交叉线二者未能分得很开。这主要是由于实验中饱和吸收光谱装置及调制转移光谱装置中的抽运光和探测光仍较强,因此造成亚多普勒谱线较明显的强度展宽,光栅外腔式半导体激光器的典型线宽约 300 kHz,对亚多普勒谱线线宽的影响应较小。图 2 另一个特点是:调制转移光谱中各超精细跃迁分量及交叉线分量相对于饱和吸收谱存在着频移(此处为红移,红移还是蓝移取决于 AOM 一级衍射光是 +1 级还是一级),这是抽运光路中的 AOM 造成的。相对频移量正好为抽运光频移(80 MHz)的一半,即 40 MHz。在声光频移器作用下,调制转移光谱装置中抽运光相对于探测光有一频率失谐。两束激光相向传播,相对于一定速度分量的铯原子分别发生多普勒红移及蓝移,频移量大小相等。只有某一速度分量附近的铯原子才能同时与抽运光、探测光共振,即发生调制转移过程。由于红移、蓝移失谐相等,所以调制转移光谱的频移量正好为 AOM 频移量的一半。

图 3 显示的是在抽运光的调制频率分别为 3 MHz, 3.6 MHz, 4 MHz 和 5 MHz 时,调制转移光谱中对应于 $F=4 \rightarrow F'=5$ 超精细跃迁的类色散型结构中心的相对斜率变化情况。最大相对斜率对应的调制频率约为 3.6 MHz 左右,而铯原子 D_2 线各超精细跃迁的自然线宽 Γ 约 5.2 MHz。这一结果与文献[4]中的结论基本吻合,即当调制频率 $f \sim 0.7\Gamma$ 时,相应的调制转移光谱谱线中心的斜率最大。

图 4 则给出了在抽运光的调制频率分别为 5 MHz 和 94 kHz 时实验中所得到的典型的调制转移光谱(记录时间常数为 300 μ s)。由图 4 中(a)和(b)的比较,可明显地看到对应于 $F=4 \rightarrow F'=5$ 超精细跃迁和 $F=4 \rightarrow F'=4,5$ 交叉线的调制转移光谱信号的相对幅度正好发生了反转。反转的原因目前尚不清楚,有待进一步的研究。

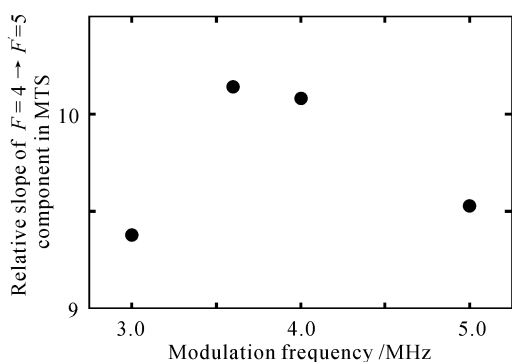


图 3 铯原子 D_2 线调制转移光谱中对应于 $F = 4 \rightarrow F' = 5$ 超精细分量的信号中心其相对斜率随抽运光调制频率的变化

Fig. 3 Relative slope of MTS signal corresponding to $F = 4 \rightarrow F' = 5$ hyperfine component of cesium D_2 line versus the modulation frequency used for the pump beam

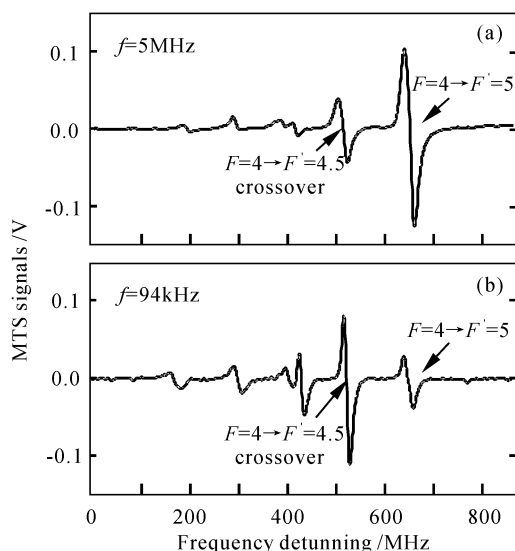


图 4 在调制频率分别为 5 MHz(a)和 94 kHz(b)时实验得到的铯原子典型的调制转移光谱。在这两种情形下, $F = 4 \rightarrow F' = 5$ 超精细跃迁与 $F = 4 \rightarrow F' = 4,5$ 交叉的相对幅度发生了反转

Fig. 4 Cesium MTS signals obtained with modulation frequency of 5 MHz (a) and of 94 kHz (b). Relative amplitude of $F = 4 \rightarrow F' = 5$ hyperfine component and $F = 4 \rightarrow F' = 4,5$ crossover is reversed in these two cases

致谢 作者感谢与张靖博士所作的有益讨论。感谢彭堃焯教授的鼓励与大力支持。

参 考 文 献

1 R. K. Raj, D. Bloch, J. J. Snyder *et al.*. High-frequency optical heterodyned saturation spectroscopy

via resonant degenerate four-wave mixing [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **44**(19):1251~1253

- 2 J. H. Shirley. Modulation transfer processes in optical heterodyne saturation spectroscopy [J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(11):537~539
- 3 G. Camy, Ch. J. Bordé, M. Ducloy. Heterodyne saturation spectroscopy through frequency modulation of the saturating beam [J]. *Opt. Comm.*, 1982, **41**(5):325~330
- 4 Ma Longsheng, J. L. Hall. Optical heterodyne spectroscopy enhanced by an external optical cavity: toward improved working standards [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(11):2006~2012
- 5 M. L. Eickhoff, J. L. Hall. Optical frequency standard at 532 nm [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1995, **44**(2):155~158
- 6 J. L. Hall, Longsheng Ma, M. Taubman *et al.*. Stabilization and frequency measurement of the I_2 -stabilized Nd:YAG laser [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, **48**(2):583~586
- 7 F. L. Hong, J. Ishikawa, Jun Ye *et al.*. Frequency comparison of $^{127}I_2$ stabilized lasers [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, **48**(2):532~536
- 8 Naicheng Shen, Erjun Zang, Hongjun Cao *et al.*. Modulation transfer spectroscopy of $^{127}I_2$ hyperfine structure near 532 nm using a self-made diode-pumped Nd:YVO₄-KTP laser [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, **48**(2):604~607
- 9 Bi Zhiyi, Luo Ming, Ding Jingxin. Modulation transfer spectrum using Nd:YVO₄ minilaser [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(12):1699~1703 (in Chinese)
- 10 G. Galzerano, F. Bertinetto, E. Bava. Characterization of the modulation transfer spectroscopy method by means of He-Ne lasers and $^{127}I_2$ absorption lines at $\lambda = 612$ nm [J]. *Metrologia*, 2000, **37**(2):149~154
- 11 P. Cancio Pastor, P. Zeppini, A. Arie *et al.*. Sub-Doppler spectroscopy of molecular iodine around 541 nm with a novel solid state laser source [J]. *Opt. Comm.*, 2000, **176**:453~458
- 12 L. S. Ma, Ph. Courteille, G. Ritter *et al.*. Spectroscopy of Te₂ with modulation transfer: reference lines for precision spectroscopy in Yb⁺ at 467 nm [J]. *Appl. Phys. B*, 1993, **57**:159~162
- 13 C. Raab, J. Bolle, H. Oberst *et al.*. Diode laser spectrometer at 493 nm for single trapped Ba⁺ ions [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**(6):683~688
- 14 Nobuhiko Ito. Doppler-free modulation transfer spectroscopy of rubidium $5^2S_{1/2} - 6^2P_{1/2}$ transitions using a frequency-doubled diode laser blue-light source [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(7):2655~2662