

文章编号 2097-1842(2024)04-0801-09

调制转移光谱对激光频率起伏分辨率的影响因素分析及优化方法

王越伟¹, 卢飞飞¹, 侯晓凯¹, 王军民^{1,2*}

(1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西太原 030006;
2. 省部共建极端光学协同创新中心, 山西大学, 山西太原 030006)

摘要:采用电光位相调制器对泵浦光进行位相调制, 得到射频调制转移光谱 (MTS), 并研究 MTS 光谱的类色散信号中心过零点斜率优化问题。通过改变泵浦光的调制频率, 泵浦光与探测光的光斑大小, 研究 MTS 光谱信号过零点斜率与二者之间的参数依赖关系, 在泵浦光调制频率为~3.6 MHz(大约是自然线宽的 0.69 倍) 时, 得到最佳的 MTS 光谱信号。最后利用最优的 MTS 光谱将 DL Pro @ 852 nm 激光频率锁定到铯原子 D2 线 ($F=4$) - ($F=5'$) 循环跃迁, 在 60 min 采样时间内激光频率起伏约为 170 kHz, 与自由运转时激光器~11 MHz 的频率起伏相比, 频率起伏得到了显著改善。

关键词: 调制转移光谱; 激光频率鉴别; 激光频率稳定; 铯原子 D2 线; 循环跃迁; 电光位相调制

中图分类号: O433 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0191

The influence factors and optimization of modulation transfer spectroscopy for laser frequency discrimination

WANG Yue-wei¹, LU Fei-fei¹, HOU Xiao-kai¹, WANG Jun-min^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics,
Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

* Corresponding author, E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn

Abstract: We use an electro-optical potential phase modulator to modulate the pump light to obtain radio frequency modulation transfer spectroscopy (MTS), and study the optimization problem of the zero-crossing slope of the center of the dispersive signal of the MTS spectrum. By changing the modulation frequency of the pump light, the spot size of the pump light and the probe light, we study the parameter dependence between the zero-crossing slope of the MTS spectral signal and the modulation frequency, and spot size. The optimal MTS spectral signal is obtained when the pump light modulation frequency is ~3.6 MHz (about 0.69 times the natural linewidth). Finally, by using the optimal MTS spectrum, the DL Pro @ 852 nm laser

收稿日期: 2023-10-27; 修订日期: 2023-12-13

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2021YFA1402002); 国家自然科学基金面上项目 (No. 11974226)

Supported by The National Key R & D Program (No. 2021YFA1402002); National Natural Science Foundation of China (No. 11974226)

frequency is locked to the cesium atom D2 line ($F = 4$) - ($F' = 5'$) cycle transition, and the laser frequency fluctuation is about 170 kHz in the 60 minutes sampling time, which is significantly improved compared with the frequency fluctuation of the laser ~ 11 MHz during free running.

Key words: modulation transfer spectroscopy; laser frequency discrimination; laser frequency stabilization; Cesium D2 line; cycling transition; electro-optical phase modulation

1 引 言

激光频率的稳定性在许多原子物理实验,尤其是激光冷却、原子俘获、吸收光谱和光频原子钟实验中,具有很高的要求^[1-7]。自由运转下的激光器很容易受到外界因素例如温度、气压、振动、噪声等影响,从而改变激光器谐振腔的几何长度和腔内介质折射率,使得激光器频率抖动过大,无法满足应用需求。因此,需要采用稳频技术来获得稳定的激光频率^[1-4]。主动稳频方法的实质是保持谐振腔光程长度的稳定性,即选取一个频率作为参考标准(一般为原子或分子跃迁谱线中心频率或谐振腔共振频率),当激光频率受外界因素的影响偏离参考频率时,通过提取误差信号并反馈给控制系统自动调节激光器腔长使激光频率恢复到特定的参考频率上,从而达到主动稳频的目的^[8-9]。原子双向色性稳频技术、偏振光谱法、Pound-Drever-Hall法、饱和吸收光谱法、调制转移光谱法(MTS)在实验中应用广泛^[8-9]。因为原理与装置的简单,饱和吸收光谱法得到了大量的应用,但相较于调制转移光谱法来说,饱和吸收光谱法具有多普勒背景,鉴频曲线易产生偏移,导致频率锁定点出现漂移^[10-12]。调制转移光谱法相较于其他主动稳频方法来说具有明显的优点:谱线无多普勒背景,可实现亚多普勒分辨率;鉴频曲线的过零点信号精确地以相应的原子跃迁频率为中心;信号主要来自于原子的封闭跃迁,在超精细能级跃迁中,这个性质尤为重要^[13-17]。基于以上性质,利用调制转移光谱进行锁频的技术从诞生之初就广泛受到实验人员的关注。

1980年, Bjorklund^[1]在 Harris 等人的研究基础上,开创了一种新型的波长调制激光光谱方法,其是利用一个外部相位调制器驱动的、与感兴趣的频谱特征相比宽度较大的无线电频率进行的。最终给出了对于钠蒸气中的 F-P 共振、十二条蒸气吸收线和饱和孔的实验结果。1992年 Yoshi-

take 等^[18]以 C_2H_2 和 $H^{13}C^{14}N$ 吸收谱线为基准,实现了对 1550 nm 半导体激光器输出频率的稳频。1995年, Pisani 等^[19]将 CO_2 激光器稳定在 OsO_4 的吸收谱线上。1998年, Bruner 等^[20]采用倍频方式,将 1054 nm 半导体激光器输出激光频率稳定在 ^{39}K 原子 D_1 线。1998年, Ye 等^[21]采用外腔增强技术改进频率调制,将探测灵敏度提高到 10^{-13} 数量级。1999年, Galzerano 等^[22]选取碘蒸气的 P(54)32 吸收谱线作为基准,对波长为 532 nm 的 Nd: YAG 激光器实现了稳频。2003年, 刘涛等^[11]利用 Cs 原子 D2 线的调制转移光谱实现了光栅外腔式半导体激光器相对于 Cs 原子 D2 线超精细跃迁的偏频锁定。调制转移光谱由于是对泵浦光束进行调制,所以避免了对激光器直接进行频率扰动而引起的附加频率噪声^[12]。2004年, Guo 等^[23]采用碘蒸气的 P(50)6-6 吸收谱线实现了对 1314 nm Nd:YAG 激光器的稳频。2006年, Leonhardt 等^[24]采用倍频的方法,将 1064 nm 的环形激光器稳频在 I_2 分子蒸气吸收谱线上。2007年, Galzerano 等^[25]以水蒸气吸收谱线为基准,实现了对 0.94 μm 外腔半导体激光器的稳频。2008年, McCarron 等^[26]用自制的电光调制器(EOM)研究了 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 中 D2 线跃迁的调制转移光谱。在实验中对于 ^{87}Rb 原子 D2 线 ($F = 2$) \rightarrow ($F' = 3$) 循环跃迁和 ^{85}Rb 原子 D2 线 ($F = 3$) \rightarrow ($F' = 4$) 循环跃迁,通过扩束望远镜对泵浦光束和探测光束扩束,显著提高了调制转移光谱信号的幅度和中心过零点斜率,改善了其激光稳频性能^[27]。在研究调制转移光谱的稳频效果时,主要关注的是调制转移过零点光谱斜率大小及峰峰间幅值等参数^[28-29]。调制转移光谱在激光稳频方面具有明显优势:其信号是平坦、零背景的;信号由封闭的循环跃迁所主导。本文利用 Cs 原子 D2 线的调制转移光谱,将激光器锁定在 Cs 原子 D2 线 ($F=4$) - ($F'=5$) 循环跃迁线上,实现了对 DLPro 激光器高精度、稳定锁定。在本文中,分析研究了泵浦光位相调制频率、泵浦光与探测光光斑大小

等参量对 MTS 调制信号的影响。在确定最合适的参量对激光器进行锁频后,观察 MTS 对于激光器频率起伏的分辨率。

2 调制转移光谱原理

调制转移光谱的核心为近简并非线性的四波混频效应,实验中较弱的一束光称为探测光,较强的一束光称为泵浦光,文中认为两束光同轴反向传输。其中,经过调制的泵浦光的频率成分含有泵浦光本身频率 ω_c 及经过 EOM 调制后产生的边带 $\omega_c \pm n\omega_m$ ^[11-12]。在本实验中,由于调制深度较浅,所以仅考虑正负一阶边带 $\omega_c \pm \omega_m$,所以有^[9,26]:

$$E = E_0 \sin [t\omega_c + \delta \sin \omega_m t] \quad (1)$$

$$E = E_0 \left[\sum_{n=0}^{\infty} J_n(\delta) \sin(\omega_c + n\omega_m)t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(\delta) \sin(\omega_c - n\omega_m)t \right] \quad (2)$$

其中 δ 为调制指数, $J_n(\delta)$ 为 n 阶贝塞尔函数,通常情况下调制指数 $\delta < 1$,所以探测光可以由一束强的频率为 ω_c 的载波和两个较弱的频率为 $\omega_c \pm \omega_m$ 的边带完全描述^[26]。探测光与相向传输、经过相位调制的泵浦光在原子气室中产生近简并四波混频,泵浦光中的 $\omega_c + \omega_m$ 与 $\omega_c - \omega_m$ 频率分量分别与探测光发生相互作用,最终将调制边带转移到探测光上。这里四波混频是一个非常必要的过程,并且仅在满足亚多普勒共振条件时才会发生调制转移,因此调制转移信号的稳定性几乎与残余线性吸收效应也无关,其稳定性与极化、温度和激光强度波动引起的吸收变化也无关。这会产生一个平坦的、无多普勒背景的信号,这是调制转移光谱的主要优势之一^[26]。另一个优势是信号的过零点位置总是落在亚多普勒共振的中心,而且不受磁场或者波平面的相关角度改变的影响。因为原子在循环跃迁时不能弛豫到其他基态,所以在循环跃迁时可以观察到最强的调制信号。本实验中,利用 Cs 原子 D2 线 ($F=4$) - ($F'=5$) 循环跃迁进行最终的激光器锁频。在通过原子气室以后,探测光被光电探测器接收,气室中探测光与其边带的拍频产生了频率为 ω_m 的信号。探测器中的拍频信号以下述形式给出^[9,26]:

$$S(\omega_m) = \frac{C}{\sqrt{\Gamma^2 + \omega_m}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\delta) J_{n-1}(\delta) \times [(L_{(n+1)/2} + L_{(n-2)/2}) \cos(\omega_m t + \Phi) + (D_{(n+1)/2} + D_{(n-2)/2}) \sin(\omega_m t + \Phi)] \quad (3)$$

$$L_n = \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + (\Delta - n\omega_m)^2} \quad (4)$$

$$D_n = \frac{\Gamma(\Delta - n\omega_m)}{\Gamma^2 + (\Delta - n\omega_m)^2} \quad (5)$$

式中, Γ 为自然线宽, Δ 为线中心的失谐量, Φ 是探测器相对于经过调制的泵浦光的相位。常数 C 代表了设备其他的参数。在仅考虑一阶边带时,方程(3)简化为^[9,26]:

$$S(\omega_m) = \frac{C}{\sqrt{\Gamma^2 + \omega_m}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_0(\delta) J_1(\delta) \times [(L_{-1} - L_{(-1)/2} + L_{1/2} - L_1) \cos(\omega_m t + \Phi) + (D_1 - D_{(-1)/2} + D_{-1} - D_{1/2}) \sin(\omega_m t + \Phi)] \quad (6)$$

其中,正弦项为信号的正交分量,余弦项为信号的同向分量。因此,使用相敏检测装置,通过设置参考信号的相位来选择正交或同向信号成分,就有可能恢复亚多普勒共振的吸收和色散成分。

3 实验装置

利用德国 Toptica 公司研发的 DL Pro @ 852 nm 光栅外腔半导体激光器产生 852 nm 激光,使用光隔离来消除光反馈,第一个半波片用来调节进入 Cs 原子 D2 线的饱和谱与调制谱的光功率大小。光经过第一个 PBS 后分为两束,一束光经过反射以后进入 Cs 原子饱和吸收谱装置,用作 Cs 原子典型饱和谱的监测,其中半波片用来控制进入饱和吸收谱装置时 P 光与 S 光的分光比;另一束光进入 Cs 原子的调制转移谱装置,同理,半波片用来调节进入调制转移谱的 P 光与 S 光分光比。在经过 PBS 分光以后,P 光作为泵浦光进入 EOM 进行位相调制,S 光作为探测光经过反射进入 Cs 原子气室,两束光在原子气室中发生非线性四波混频,使泵浦光上的调制信号被转移到探测光上。然后,探测光进入光电探测器,光信号转变为电信号经过放大器后与相移器信号进行调制解调。因为高频信号无法在示波器显示,所以

使用低通滤波器将其中的高频部分与直流信号滤除,最后得到 Cs 原子 D2 线的调制转移信号。

图 1(彩图见期刊电子版)中蓝框部分(a)为 Cs 原子饱和吸收谱装置,绿框部分(b)为 Cs 原子调制转移谱装置。用于饱和谱的 S 偏振光,经过半波片调节,通过旋转半波片来控制 P 光与 S 光

的比例,再经过 PBS 分光以后,较强的 S 偏振光(1.1 mW)作为饱和谱的泵浦光,较弱的 P 偏振光(420 μ W)作为饱和谱的探测光,探测光进入探测器 1,扫描激光器频率后得到 Cs 原子典型的饱和吸收谱。

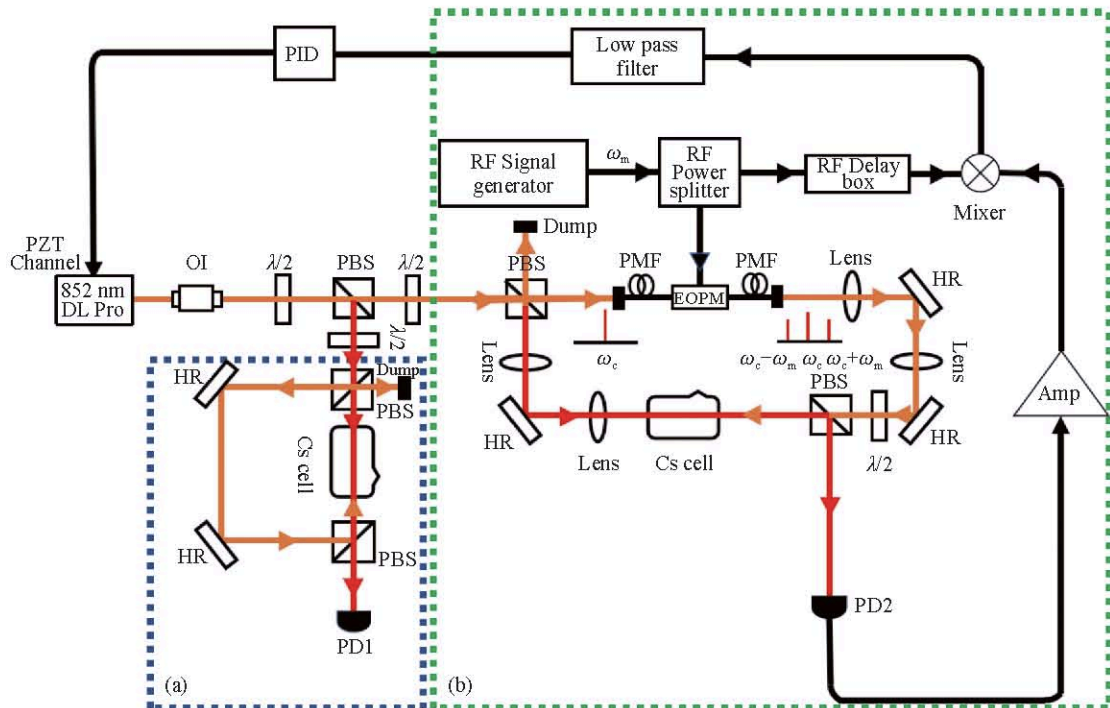


图 1 实验装置图。(a) 铯原子气室饱和吸收光谱仪;(b) 铯原子气室调制转移光谱仪。图 1 中, ω_m 为调制频率, ω_c 是泵浦光频率, PMF 为保偏光纤, PBS 为偏振分束棱镜, EOPM 为带输入输出单模保偏光纤的电光位相调制器, AMP 为放大器, RF 为射频, PID 为比例-积分-差分放大器

Fig. 1 Diagram of experimental setup. (a) Cesium atomic gas chamber saturation absorption spectrometer; (b) Cesium atomic gas chamber modulation transfer spectrometer. ω_m is the modulation frequency, and ω_c is the frequency of pump light. The upper and lower sidebands are at frequencies with $\omega_c + \omega_m$ and $\omega_c - \omega_m$. Key to figure: $\lambda/2$: half-wave plate; PMF: polarization maintaining fiber; PBS: polarization beam splitter cube; EOPM: polarization-maintaining-fiber pig-tailed electro-optic phase modulator; PZT: piezoelectric transducer; Amp: amplifier; RF: radio frequency; PID: proportional-integral-differential amplifier

用于调制转移谱的 P 偏振光经过半波片调节,通过旋转半波片来控制 P 光与 S 光的比例,再经过 PBS 分光以后,再分为两束,较强的 P 偏振光(1.1 mW)作为调制转移谱的泵浦光,较弱的 S 偏振光(420 μ W)作为调制转移谱的探测光,在两束光的光路上分别搭建了望远镜系统来改变两束光的光斑大小,将泵浦光扩束为 ~ 6 mm,使得其能完全覆盖探测光。探测光经过 PBS 反射后,由于光斑经过扩束以后较大,使用一个透镜将其聚焦,使其能够完全打入探测器 2,探测器 2 将信号转化为电信号,扫描激光器频率,最终得到 Cs 原

子 D2 线的调制转移光谱。得到的调制转移光谱信号输入到 PID 中,最后反馈到激光器中。

4 实验结果与分析

图 2(彩图见期刊电子版)红色部分是 Cs 原子的饱和吸收谱信号,黑色部分是泵浦光调制频率为 3.6 MHz 时的调制转移光谱信号。在调制转移光谱中,信号的幅值强弱主要由封闭跃迁决定。Cs 原子 D2 线中 ($F=4$) - ($F=5'$) 为循环跃迁。可以明显看出,在 ($F=4$) - ($F=5'$) 循环跃迁时,MTS

信号过零点斜率最大。易知, 当选择此跃迁线来对激光器进行锁频以后, 对激光器的残余频率起伏分辨率最大。

图 3(a)(彩图见期刊电子版)为不同调制频率下的 Cs 原子的 MTS 信号。在调制频率由小到大的过程中, 分别对 MTS 信号进行测量, 泵浦光调制频率分别为 1.6 MHz(1)、3.6 MHz(2)、7 MHz(3) 和 9 MHz(4)。由图 3(b) 可以看出当调制频率为 3.6 MHz 时 Cs 原子 D2 线的调制转移光谱过零点信号斜率最大, 与公式 (3) 的理论拟合结果接近, 也与参考文献 [6] 的结论基本相符, 即调制频率 $\omega_m \approx 0.69\Gamma$ 时, (Γ 为谱线循环跃迁自然线宽), 相应的调制转移光谱中心过零点斜率最大。同样, 对于 ^{87}Rb 原子 $F=2-F'=3$ 循环跃迁, 其自发辐射线宽为 6.0 MHz, 在其调制频率 ω_m 为 $6.0 \text{ MHz} \times 0.69 \approx 4.2 \text{ MHz}$ 时, 对应的 MTS 谱的中心过零点的斜率

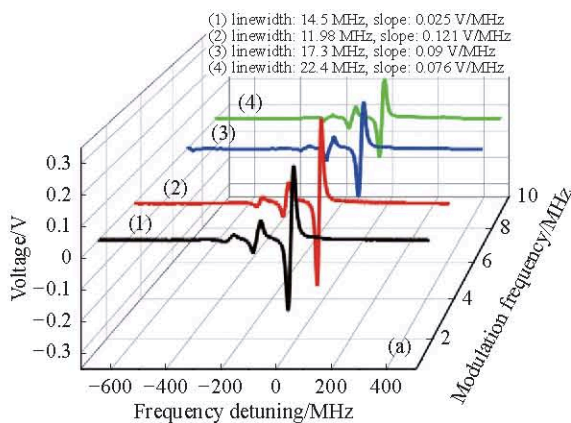


图 3 不同调制频率下 Cs 原子 D2 线 ($F=4$) - ($F=5'$) 循环跃迁的 (a) 调制转移光谱信号及 (b) 调制转移光谱信号过零点斜率
Fig. 3 (a) Modulation transfer spectral signal and (b) the slope of the zero-crossing point of the modulation transfer spectral signal of cesium ($F=4$) - ($F=5'$) cycling transition in D2 line at various modulation frequencies

当泵浦光与探测光光斑大小相同, 同时改变两束光的光斑大小, 观测在不同调制频率下 Cs 原子 $F=4-F'=5$ 跃迁线线宽的变化情况, 如图 4(a) 所示。其中, 调制频率分别为 1.6 MHz(square dot)、3.6 MHz(round dot)、7 MHz(triangle dot) 和 9 MHz(lozenge dot)。实验结果表明, 在调制频率相同、保证探测光与泵浦光的功率不变的情况下, 两者光斑越大, Cs 原子 $F=4-F'=5$ 跃迁线线宽越窄。这是因为光在穿过原子气室时存在功率展宽与渡越展宽。Cs 原子 $F=4-F'=5$ 跃迁线的饱和光强约为 1.12 mW/cm^2 。实验中主要由较强的泵浦光对原子进行激发, 所以只需考虑泵浦光的功率即可:

最大, 信号幅度最大^[27-29]。

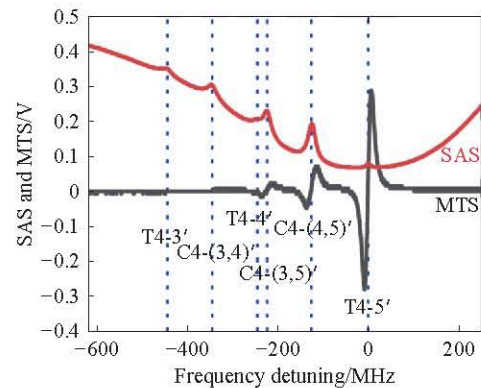
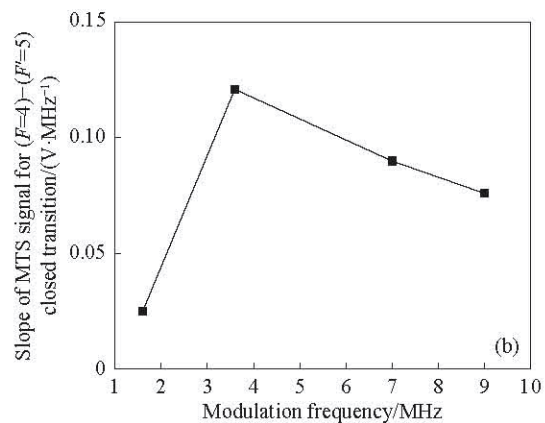


图 2 Cs 原子饱和吸收谱与调制频率为 3.6 MHz 时典型的调制转移光谱

Fig. 2 The cesium saturated absorption spectroscopy (SAS) and the cesium modulation transfer spectroscopy (MTS) with a phase modulation frequency of 3.6 MHz



$$\Gamma' = \Gamma \sqrt{1 + \frac{I}{I_{\text{SAT}}}} \quad (7)$$

根据式 (7) 可以计算出谱线在各个光斑高斯直径下的功率展宽。实验所用泵浦光功率为 1.1 mW, 在选择的 5 组光斑下均存在饱和现象, 谱线均存在功率展宽。此外, 在光与原子相互作用过程中还存在渡越展宽。光斑越小, 光与原子相互作用时间就越短, 相应的谱线渡越展宽也就越大。在本实验中, 泵浦光调制频率为 3.6 MHz 时, 将泵浦光与探测光光斑都扩束至 6 mm, 如图 4(a) 所示, 得出此时 Cs 原子 $F=4-F'=5$ 跃迁线的线宽约为 11 MHz。考虑到存在的渡越展宽现象, 实验结果与理论相符。此外, 从实验结果还可

得知, 调制频率对跃迁线宽并无明显影响。

图 4(b) 为在保证探测光、泵浦光功率大小不变、调制频率为 3.6 MHz 的条件下, 分别调节两束光的光斑大小, 观测光斑大小对 Cs 原子 D2 线

(F=4) - (F'=5) 循环跃迁过零点斜率大小的影响。显然, 当两束光光斑高斯直径相同时, Cs 原子 D2 线 (F=4) - (F'=5) 循环跃迁的调制转移光谱的中心过零点信号斜率最大。

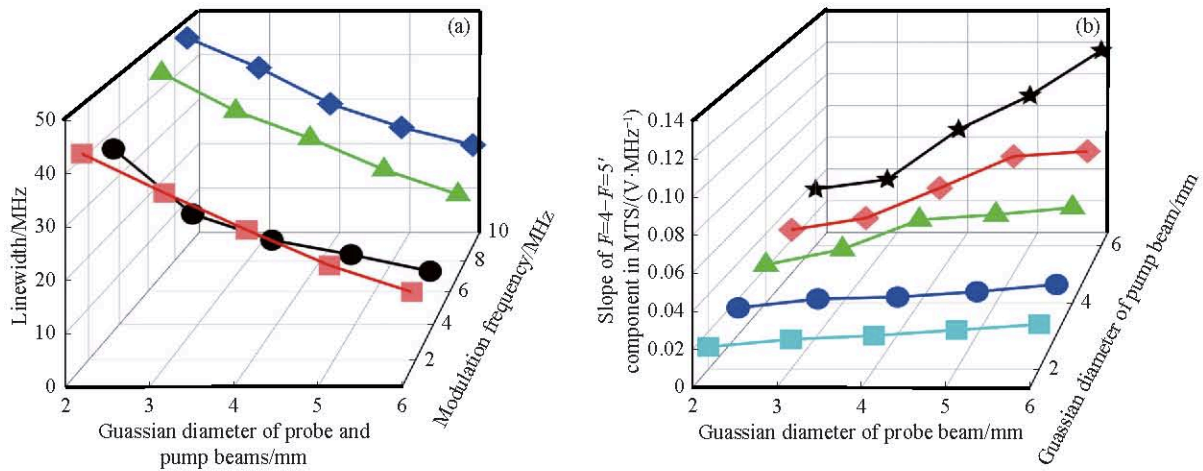


图 4 (a) 调制频率、光斑大小对 Cs 原子 D2 线 (F=4) - (F'=5) 循环跃迁的调制转移光谱线宽的影响; (b) 探测光与泵浦光光斑大小对 Cs 原子 D2 线 (F=4) - (F'=5) 循环跃迁的调制转移光谱过零点斜率的影响

Fig. 4 (a) Effects of modulation frequency and spot size on the MTS linewidth of cesium (F=4) - (F'=5) cycling transition in D2 line; (b) influence of probe and pump beam sizes on the MTS slope of cesium (F=4) - (F'=5) cycling transition in D2 line

5 稳频实验及讨论

图 5(a) (彩图见期刊电子版) 红色部分为遮挡泵浦光后得到的多普勒展宽背景, 蓝色部分为多普勒背景的微分信号, 黑色部分为 Cs 原子 D2 线的饱和吸收谱, 差分信号利用黑色部分中 (F=4) -

(F'=4, 5) 交叉线与 (F=4) - (F'=5) 超精细跃迁线的频率间隔得到, 计算出室温下多普勒展宽透射谱的半高全宽约为 450 MHz。为减少外界环境误差的影响, 利用激光器自由运转时的电压信号起伏的峰峰值作为信号起伏标准, 并利用相应的微分信号斜率计算得到激光器自由运转时的频率起伏约为 11 MHz。

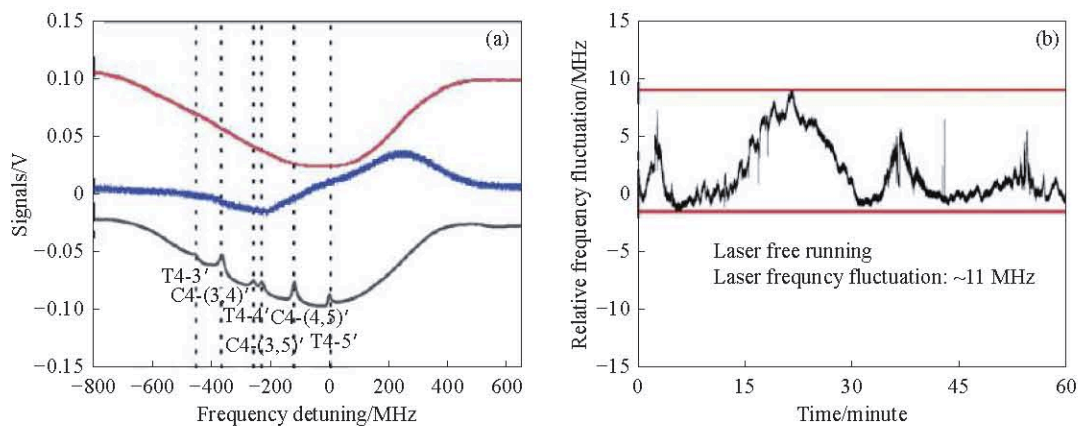


图 5 (a) Cs 原子多普勒展宽的吸收光谱及其微分信号以及带多普勒背景的饱和吸收光谱。 (b) DL Pro @ 852 nm 光栅外腔半导体激光器自由运转时的典型频率起伏

Fig. 5 (a) Cs atomic Doppler broaden absorption spectrum and its first order differential spectrum, and the saturated absorption spectrum with Doppler background. (b) Typical frequency fluctuation of DL Pro @ 852 nm in the free running case

将所有参数优化至最佳以后, 利用调制转移光谱将 ECDL 激光器锁定到 Cs 原子 $F=4-F'=5$ 超精细跃迁线上, 然后对激光器进行长时间的监测来分析利用 MTS 对激光器进行锁频的灵敏度。最后, 采用此信号的峰峰值来对激光器残余频率起伏进行估计, 如图 6(a) 所示。可得激光器的频

率起伏约为 170 kHz。与激光器自由运转时的频率起伏相比, 使用 MTS 信号将激光器锁定的方法, 显著地改善了激光的频率稳定度。

从图 6(b) 可以明显看出, 在对激光器利用 MTS 进行锁频以后, 频率稳定度提高了两个数量级, 当泵浦光调制频率为 3.6 MHz 时锁频效果最好。

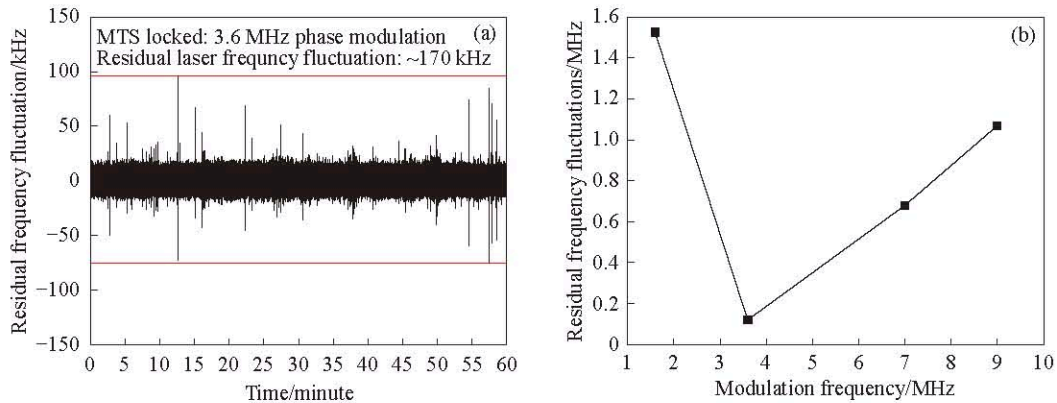


图 6 (a) 调制频率为 3.6 MHz 时对激光器进行 MTS 锁频后的典型残余频率起伏; (b) 不同调制频率下对激光器进行 MTS 锁频后的典型残余频率起伏

Fig. 6 (a) Typical residual frequency fluctuations after MTS lock of the laser at a phase modulation frequency of 3.6 MHz; (b) typical residual frequency fluctuations after MTS lock of the laser at various phase modulation frequencies

6 结 论

本文探究了不同参数对 MTS 光谱信号过零点斜率的影响, 主要研究了泵浦光调制频率与不同的探测光、泵浦光光斑大小这几个参数。发现当探测光功率为 420 μ W, 泵浦光功率为 1.1 mW 的情况下, 调制频率为 3.6 MHz、探测光、泵浦光光斑高斯直径为 6 mm 时, MTS 光谱过零点斜率最大。说明在这种条件下, 调制转移光谱对激光

频率起伏的分辨率达到最大, 灵敏度也达到最高。将各参数优化至最佳后, 利用最优的 MTS 光谱, 将 DL Pro @ 852 nm 激光频率锁定到铯原子 D2 线 ($F=4$) - ($F=5'$) 循环跃迁线。这样, 相较于 ECDL @ 852 nm 激光系统自由运转时, 输出激光频率在一小时内的频率起伏约为 11 MHz。采用铯原子气室调制转移光谱 (MTS) 技术将 ECDL 激光系统的输出激光频率锁定在铯原子 $6S_{1/2}$ ($F_g=4$) - $6P_{3/2}$ ($F_g=5$) 跃迁线, 一小时尺度的残余频率起伏改善至 ~ 170 kHz, 改善了约 65 倍。

参考文献:

- [1] BJORKLUND G C. Frequency-modulation spectroscopy: a new method for measuring weak absorptions and dispersions [J]. *Optics Letters*, 1980, 5(1): 15-17.
- [2] LEE S, MOON G, PARK S E, *et al.*. Laser frequency stabilization in the 10–14 range via optimized modulation transfer spectroscopy on the 87 Rb D 2 line [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(4): 1020-1023.
- [3] 刘瑞斌, 殷允嵩. 激光诱导击穿光谱技术相关物理机制研究进展 [J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(1): 19-37.
LIU Rui-bin, YIN Yun-song. Research progress on the related physical mechanism of laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 19-37. (in Chinese).
- [4] CAMY G, BORDÉ C J, DUCLOY M. Heterodyne saturation spectroscopy through frequency modulation of the saturating beam [J]. *Optics Communications*, 1982, 41(5): 325-330.
- [5] TAKAMOTO M, HONG F L, HIGASHI R, *et al.*. An optical lattice clock [J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 321-324.
- [6] LUDLOW A D, ZELEVINSKY T, CAMPBELL G K, *et al.*. Sr lattice clock at 1×10^{-16} fractional uncertainty by remote

- optical evaluation with a Ca clock[J]. *Science*, 2008, 319(5871): 1805-1808.
- [7] 任颀杰, 颜昌翔, 徐嘉蔚. 增强吸收光谱技术的研究进展及展望[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(6): 1273-1292.
REN Y J, YAN CH X, XU J W. Development and prospects of enhanced absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1273-1292. (in Chinese).
- [8] 程军杰, 曹智, 杨灿然, 等. 便携式远程激光诱导击穿光谱系统及其定量分析性能[J]. *应用化学*, 2022, 39(9): 1447-1452.
CHENG J J, CAO ZH, YANG C R, *et al.*. Quantitative analysis with a portable remote laser-induced breakdown spectroscopy system[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(9): 1447-1452. (in Chinese).
- [9] MA L S, HALL J L. Optical heterodyne spectroscopy enhanced by an external optical cavity: toward improved working standards[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, 26(11): 2006-2012.
- [10] ZHANG J, WEI D, XIE CH D, *et al.*. Characteristics of absorption and dispersion for rubidium D₂ lines with the modulation transfer spectrum[J]. *Optics Express*, 2003, 11(11): 1338-1344.
- [11] 刘涛, 李利平, 闫树斌, 等. 铯原子 D₂ 线调制转移光谱的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(9): 791-794.
LIU T, LI L P, YAN SH B, *et al.*. Experimental investigation of modulation transfer spectrum of cesium D₂ line[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(9): 791-794. (in Chinese).
- [12] LEE S, LEE S B, PARK S E, *et al.*. Compact modulation transfer spectroscopy module for highly stable laser frequency[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 146: 106698.
- [13] 杨舒涵, 乔顺达, 林殿阳, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(1): 151-157.
YANG SH H, QIAO SH D, LIN D Y, *et al.*. Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 151-157. (in Chinese).
- [14] ZHOU Z CH, WEI R, SHI CH Y, *et al.*. Observation of modulation transfer spectroscopy in the deep modulation regime[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(12): 124211.
- [15] 贾豫东, 林志立, 欧攀, 等. 调制转移光谱光频率标准系统中电光参数的优化研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(12): 124214.
JIA Y D, LIN ZH L, OU P, *et al.*. Optimization of electro-optical parameter of optical frequency standard system based on modulation transfer spectroscopy technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(12): 124214. (in Chinese).
- [16] CHENG B, WANG ZH Y, WU B, *et al.*. Laser frequency stabilization and shifting by using modulation transfer spectroscopy[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(10): 104222.
- [17] SHANG H, ZHANG T, MIAO J, *et al.*. Laser with 10–13 short-term instability for compact optically pumped cesium beam atomic clock[J]. *Optics express*, 2020, 28(5): 6868-6880.
- [18] YOSHITAKE S, AKIYAMA K, IRITANI M, *et al.*. 1.55- μm -band practical frequency-stabilized semiconductor laser using C₂H₂ or HCN absorption lines[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1837: 124-133.
- [19] PISANI M, SASSI M P, ZUCCO M. High spectral purity CO₂ laser stabilized using a molecular frequency reference[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44(2): 159-161.
- [20] BRUNER A, ARIE A, ARBORE M A, *et al.*. Frequency stabilization of a diode laser at 1540 nm by locking to sub-Doppler lines of potassium at 770 nm[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(6): 1049-1052.
- [21] HALL J L, MA L SH, TAUBMAN M, *et al.*. Stabilization and frequency measurement of the I₂-stabilized Nd: YAG laser[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, 48(2): 583-586.
- [22] GALZERANO G, SVELTO C, BAVA E, *et al.*. High-frequency-stability diode-pumped Nd: YAG lasers with the FM sidebands method and Doppler-free iodine lines at 532 nm[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(33): 6962-6966.
- [23] GUO R X, HONG F L, ONAE A, *et al.*. Frequency stabilization of a 1319-nm Nd: YAG laser by saturation spectroscopy of molecular iodine[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(15): 1733-1735.
- [24] LEONHARDT V, CAMP J B. Space interferometry application of laser frequency stabilization with molecular iodine[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17): 4142-4146.
- [25] GALZERANO G, LAPORTA P. Absolute frequency stabilization of diode lasers around 0.94 μm [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(2): 365-368.
- [26] MCCARRON D J, KING S A, CORNISH S L. Modulation transfer spectroscopy in atomic rubidium[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(10): 105601.

- [27] 洪毅, 侯霞, 陈迪俊, 等. 基于 Rb^{87} 调制转移光谱稳频技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2101003.
HONG Y, HOU X, CHEN D J, *et al.*. Research on frequency stabilization technology of modulation transfer spectroscopy based on Rb^{87} [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2101003. (in Chinese).
- [28] 宋微, 朱欣欣, 吴彬, 等. 基于调制转移光谱多参量相关的激光稳频特性研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1114003.
SONG W, ZHU X X, WU B, *et al.*. Research on frequency stabilization characteristics of multi-parameter dependent laser source based on modulated transfer spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1114003. (in Chinese).
- [29] 喻晓, 吕梦洁, 张旭, 等. 基于铷原子调制转移光谱技术的 1560 nm 光纤激光器频率锁定研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(3): 0301002.
YU X, LV M J, ZHANG X, *et al.*. Research on frequency locking of 1560 nm fiber laser based on rubidium atomic modulation transfer spectroscopy technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(3): 0301002. (in Chinese).

作者简介:



王越伟(2001—), 男, 山西柳林人, 博士研究生, 主要从事冷原子物理、激光光谱技术及精密测量等方面的研究。E-mail: 202312607025@email.sxu.edu.cn



王军民(1967—), 男, 山西河曲人, 理学博士, 教授, 光学专业和原子分子物理专业博士生导师, 主要从事量子光学、冷原子物理及精密测量等方面的研究。E-mail: wjmm@sxu.edu.cn