

引用格式: SONG Wei, ZHU Xinxin, WU Bin, 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  
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

# 基于调制转移光谱多参量相关的激光稳频特性研究

宋微,朱欣欣,吴彬,王河林,林强

(浙江工业大学 理学院 量子精密测量重点实验室,杭州 310023)

**摘 要:**基于调制转移光谱技术实现了分布式反馈半导体激光器在  $^{87}\text{RbD2}$  线  $F=2 \rightarrow F'=3$  上的频率锁定,并理论和实验研究了调制频率、解调相位、泵浦光偏振和磁场等多参量对调制转移光谱信号幅值、过零点斜率的影响,为选择和优化调制转移光谱稳频技术提供依据。研究表明,当泵浦光调制频率位于 9~15 MHz,调节信号相位改变量在  $\pi/5$  附近时,可获得最佳的锁频信号。实验中,当调制频率为 12.5 MHz,泵浦光与探测光偏振角为  $90^\circ$ ,外加磁场为 5 Gs 时,通过优化解调信号相位和比例积分微分控制参数,使调制转移光谱信号幅值及过零点斜率达到最佳,实现了分布式反馈半导体激光器的高精度频率锁定。锁频后的激光线宽约为 1.6 MHz,频率稳定度小于  $1.75 \times 10^{-9}$ ,该锁频激光系统可用作冷原子干涉的光源。

**关键词:**调制转移光谱;铷;分布式反馈半导体激光器;激光稳频;激光线宽

中图分类号:O433.5+4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215011.1114003

## Research on Frequency Stabilization Characteristics of Multi-parameter Dependent Laser Source Based on Modulated Transfer Spectrum

SONG Wei, ZHU Xinxin, WU Bin, WANG Helin, LIN Qiang

(Center for Optics and Optoelectronics Research, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Based on the modulation transfer spectroscopy technique, the frequency locking of the distributed feed back laser on the  $^{87}\text{RbD2}$  line  $F=2 \rightarrow F'=3$  is realized, and the multi-parameter pairs such as modulation frequency, demodulation phase and pump light polarization are theoretically and experimentally studied. Modulating the effects of the shifted spectral signal provides a basis for selecting and optimizing the modulation transfer spectral stabilization technique. The results show that the best frequency locking signal can be obtained when the pump modulation frequency is between 9~15 MHz and the phase change of the modulation signal is near  $\pi/5$ . In the experiment, when the modulation frequency is 12.5 MHz, the polarization angle of pump and probe light is  $90^\circ$ , and the applied magnetic field is 5 Gs, the amplitude and zero slope of modulation transfer spectroscopy signal are optimized by optimizing the demodulation signal phase and proportion, integral, differential control parameters, and the high-precision frequency locking of DFB laser is realized. The frequency line after the frequency-locked laser is about 1.6 MHz, and the

**基金项目:**国家重点研发计划(Nos.2016YFF0200206, 2017YFC0601602),国家自然科学基金(Nos.61727821, 61475139, 61478069, 11604296, 11404286, 51905482),中国自然资源航空物探遥感中心项目(No.DD20189831),浙江省新苗人才计划(No.2021R403093)

**第一作者:**宋微(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光技术及器件。Email:805865690@qq.com

**导师(通讯作者):**王河林(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为精密光学测量技术及器件。Email:whlin@zjut.edu.cn

**收稿日期:**2021-04-22; **录用日期:**2021-08-08

<http://www.photon.ac.cn>

frequency stability is less than  $1.75 \times 10^{-9}$ , it can be used as a light source in the cold atom interference experiment.

**Key words:** Modulated transfer spectroscopy; Rubidium; Distributed feedback semiconductor laser; Laser frequency stabilization; Laser linewidth

**OCIS Codes:** 140.3425; 300.6380; 300.6290; 300.3700; 300.2570

## 0 引言

许多原子物理实验,尤其是激光冷却和原子捕获领域的实验,对激光频率的稳定性具有很高的要求<sup>[1]</sup>。但是激光二极管自身的热扰动、控制电路的电子学噪声以及外部机械振动等因素往往使得激光频率的漂移达到几个GHz量级<sup>[2-3]</sup>,这对于许多原子物理实验来说是不可接受的,因此需要对激光器的频率进行高精度锁定。

目前实验室大多采用主动稳频<sup>[4]</sup>技术,简单来说就是选取一个标准频率(一般为原子或分子跃迁谱线中心频率或谐振腔共振频率)作为参考频率,当激光频率受外界干扰而偏离特定频率时,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,将光频率恢复至特定频率,从而实现稳频的目的<sup>[5]</sup>。常用的主动稳频技术包括饱和吸收谱稳频(Saturated Absorption Spectroscopy, SAS)<sup>[6]</sup>、消多普勒双色谱稳频(Dichroic Atomic Vapour Laser Lock, DAVLL)<sup>[7]</sup>、调频光谱(Frequency-Modulation Spectroscopy, FMS)<sup>[8]</sup>稳频、调制转移光谱(Modulation Transfer Spectroscopy, MTS)稳频<sup>[9]</sup>和频率-电压转换稳频(Frequency Voltage Change, FVC)<sup>[10]</sup>等。在这些稳频方法中,调制转移光谱锁频相较其他锁频方法具有明显优点:1)谱线背景稳定性不受光强、温度等外界干扰<sup>[11]</sup>;2)信号的过零点精确地以相应的原子跃迁频率为中心,不受磁场的影响;3)信号主要源于原子循环跃迁的贡献,每个超精细结构的基态都有一个较大的吸收峰,且过零点斜率较陡,有利于频率锁定<sup>[9, 10, 12]</sup>。因此,基于MTS光谱的激光稳频技术一直受到激光研究者的青睐。MTS激光稳频效果取决于MTS信号幅值、过零点斜率和误差信号等电学参量,而这些电学参量依赖于产生MTS信号的调制频率、解调相位、磁场和泵浦光偏振等光学参量,因此选择合适的光学参量使得MTS锁频效果达到最佳显得尤为重要。

分布式反馈半导体激光器(Distributed Feed Back, DFB),因其采用内嵌式的布拉格光栅结构,相较于传统的外腔半导体激光器,具有单模输出,无跳模范围大,且对震动不敏感,体积小等特点,长期工作稳定性较好<sup>[11]</sup>。于是将基于调制转移光谱的激光稳频技术用于DFB激光器频率锁定,发展集成度高、体积小和价格便宜的高频率稳定的窄线宽激光系统成为重要的研究主题。

本文利用MTS稳频技术,以<sup>87</sup>RbD2线 $F=2 \rightarrow F'=3$ 跃迁频率<sup>[13]</sup>为参考频率,实现了DFB激光器的高精度频率锁定。同时,为了得到最优化的MTS信号,提高激光器稳频效果,对影响MTS信号的泵浦光调制频率、泵浦光偏振、外界磁场和解调信号相位等多参量进行了详细的理论分析和实验研究。

## 1 MTS光谱理论分析

调制转移光谱(MTS)是一种基于四波混频效应<sup>[2, 14]</sup>的绝对锁频技术,其基本原理为一束经过相位调制的泵浦光与一束相向传输的未调制的探测光在非线性介质内发生四波混频效应,产生探测光的边带,即将泵浦光的边带转移到探测光上。通过光电探头获取探测光及其边带的拍频信号,再与本振源的调制信号解调滤波后,即可得到MTS光谱信号。激光器频率锁定后,当光频率产生扰动时,光电探头获取的误差信号经处理后通过PID控制器反馈到激光器控制端,补偿光频率误差,从而实现闭环控制<sup>[15]</sup>。

实验中使用电光调制器(Electro-optic Modulator, EOM)对泵浦光进行相位调制,相位调制信号为一个正弦信号,因此,当泵浦光经过EOM后,光波会有一个附加相位<sup>[16]</sup>

$$\Delta\varphi = \beta \sin(\omega_m t) \quad (\beta < 1) \quad (1)$$

式中, $\beta$ 为调制深度, $\omega_m$ 为调制频率。此时,泵浦光电场矢量可表示为

$$E = E_0 e^{i(\omega_0 t + \Delta\varphi)} \quad (2)$$

式中, $\omega_0$ 为调制前的激光频率。对式(2)进行傅里叶变换,得到的频域表达式为<sup>[2, 16]</sup>

$$E = E_0 \left[ J_0(\beta) e^{i\omega_0 t} + J_1(\beta) e^{i(\omega_0 + \omega_m)t} - J_1(\beta) e^{i(\omega_0 - \omega_m)t} \right] \quad (3)$$

式中,  $J_0$  和  $J_1$  为零阶和一阶贝塞尔函数。当调制深度较浅, 即  $\beta$  较小时, 泵浦光高阶边带所携带的能量很小<sup>[16]</sup>, 可忽略不计, 因此, 经过调制后的泵浦光只考虑一个载波和两个一阶边带三部分。

泵浦光与探测光在铷泡内相向传输, 发生四波混频效应, 泵浦光的一阶边带转移到探测光上<sup>[15]</sup>, 于是在光电探测器上得到的拍频信号为<sup>[9, 10, 12, 14-16]</sup>

$$S(\omega) = \frac{C}{\sqrt{\Gamma^2 + \omega_m^2}} J_0(\beta) J_1(\beta) \times \left[ (L_{-1} - L_{-1/2} + L_{1/2} - L_1) \cos(\omega_m t + \varphi) + (D_1 - D_{1/2} - D_{-1/2} + D_{-1}) \sin(\omega_m t + \varphi) \right] \quad (4)$$

式中,  $L_n = \Gamma^2 / \left[ \Gamma^2 + (\Delta\omega - n\omega_m)^2 \right]$  和  $D_n = \Gamma(\Delta\omega - n\omega_m) / \left[ \Gamma^2 + (\Delta\omega - n\omega_m)^2 \right]$  分别表示吸收线型(同相分量)和色散线型(正交分量),  $\Gamma$  为铷原子的自然线宽,  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$  是激光频率相对于亚多普勒谐振中心的失谐量,  $\varphi$  为拍频信号相对于本振源产生的调制信号的相位, 常数  $C$  表示介质和探测光束的所有其它特性的综合参数, 其与上述参数无关<sup>[9, 17]</sup>。  $J_n$  是  $n$  阶贝塞尔函数。由式(4)可以看出, 解调后的 MTS 信号与调制频率  $\omega_m$  和相位  $\varphi$  之间存在确定的函数关系, 当改变  $\varphi$  时, MTS 信号曲线可以在吸收线型与色散线型之间相互转换; 当改变调制频率  $\omega_m$  时, MTS 信号线型也会随之改变。

为了分析上述参量对 MTS 信号线型的影响, 数值模拟了不同调制频率下的 MTS 信号, 如图 1。模拟中  $^{87}\text{RbD2}$  的跃迁谱线特征参量由文献[18]给出,  $\Gamma = 6.065(9)$  MHz, EOM 的调制深度  $\beta = 0.28$ 。在图 1(a) 和 (b) 中, 当调制频率分别为 2 MHz、6 MHz、9 MHz、12.5 MHz 和 24.3 MHz 时,  $\omega_m/\Gamma = 0.33, 0.99, 1.48, 2.06$  和  $4.01$ 。从图 1 可以看出, 色散曲线与吸收曲线都是激光频率失谐量  $\Delta\omega$  的奇函数, 而且, 当  $\omega_m/\Gamma < 0.8$  时, 色散信号与吸收信号具有相似的线型(类色散线型), 而  $\omega_m/\Gamma > 2.6$  时, 两种信号也具有相似的线型(类吸收线型)。同时, 随着调制频率  $\omega_m$  的增大, 两种信号的线宽也随之增大。图 1(c) 和 (d) 分别为两种信号的峰峰值和过零点斜率。对于色散信号, 在  $\omega_m/\Gamma = 1.48$  附近峰峰值达到最大, 但过零点斜率最大的点则在  $\omega_m/\Gamma =$

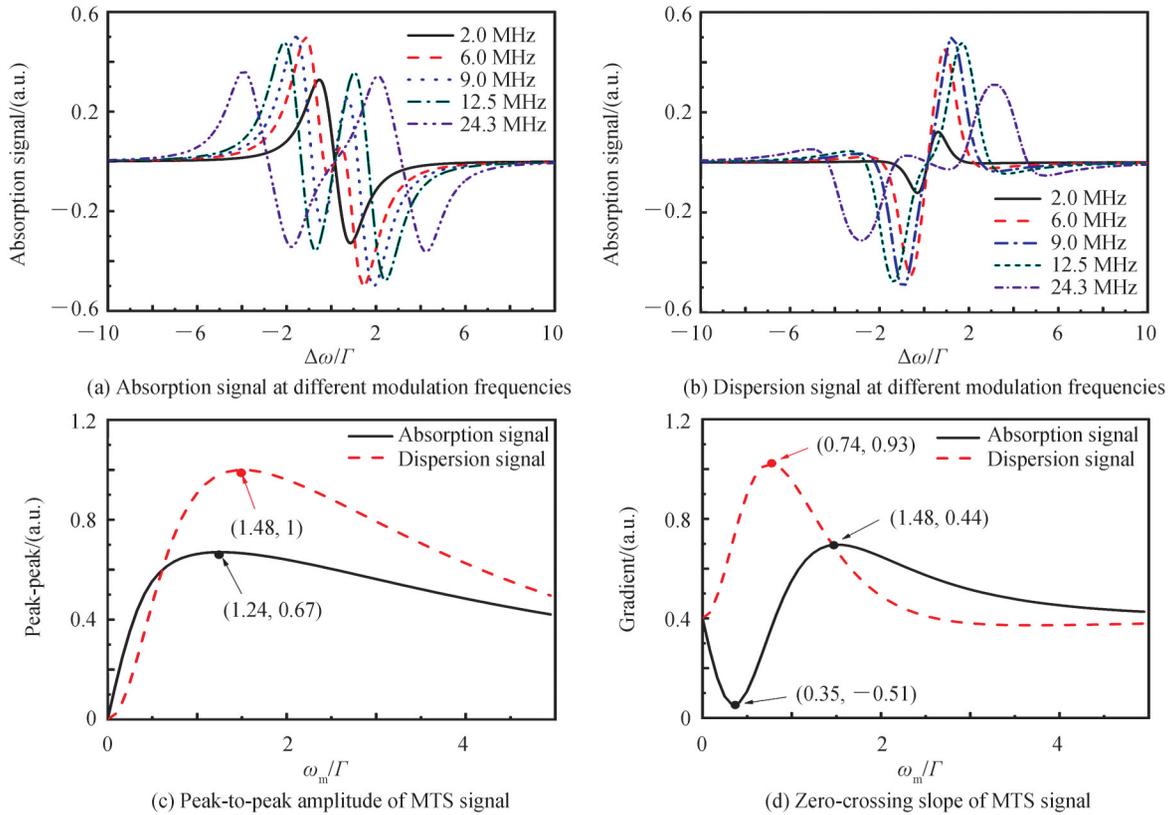


图 1 不同调制频率  $\omega_m$  下的 MTS 信号计算值  
Fig.1 The calculated MTS signal at different modulation frequencies  $\omega_m$

0.74附近。对于吸收信号,在 $\omega_m/\Gamma=1.24$ 附近,峰峰值达到最大,而最大过零点斜率则在 $\omega_m/\Gamma=1.48$ 附近。吸收信号的最大峰峰值约为色散信号的最大峰峰值的0.67倍,而最大过零点斜率为0.47倍。因此,不论是色散信号还是吸收信号,都无法在给定的调制频率下同时获得信号幅度与过零点斜率的最大值,需要结合实验进行优化选择。

进一步分析图1可知,信号的峰峰值并不一定对过零点斜率产生贡献,如调制频率为6 MHz的吸收信号与调制频率为24.3 MHz的色散信号。实际上,对于MTS稳频而言,关注的重点是过零点斜率和靠近零点的两极值点间的峰峰值是否最大。图2给出了靠近零点的两极值点间的峰峰值变化特征。可以看出,吸收信号和色散信号分别在 $\omega_m/\Gamma=0.74$ 和 $\omega_m/\Gamma=2.55$ 处出现断崖式下降,这是由于信号工作在这两个调制频率时,过零点斜率发生了变号,导致靠近零点的两极值点间的峰峰值出现了跳变,即曲线开始发生线型转变(由类色散线型转变为类吸收线型或反向)。为了使过零点斜率和靠近零点附近两极值点间的峰峰值达到最大,应使 $\omega_m/\Gamma=1.5\sim 2.5$ ,即应该选择调制频率在9~15 MHz之间,此时光谱信号为接近色散信号的混合信号<sup>[17]</sup>。基于理论分析结果,实验中选择的调制频率为12.5 MHz。

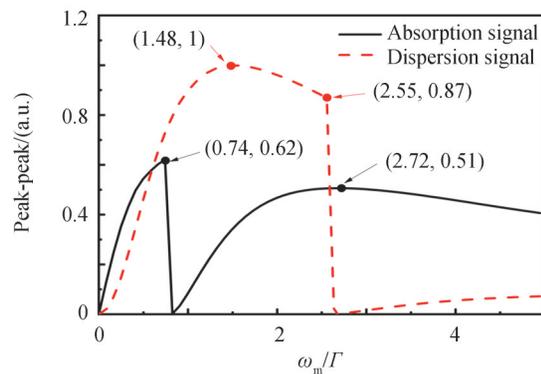


图2 不同调制频率下靠近MTS信号零点的极值点的峰峰值变化

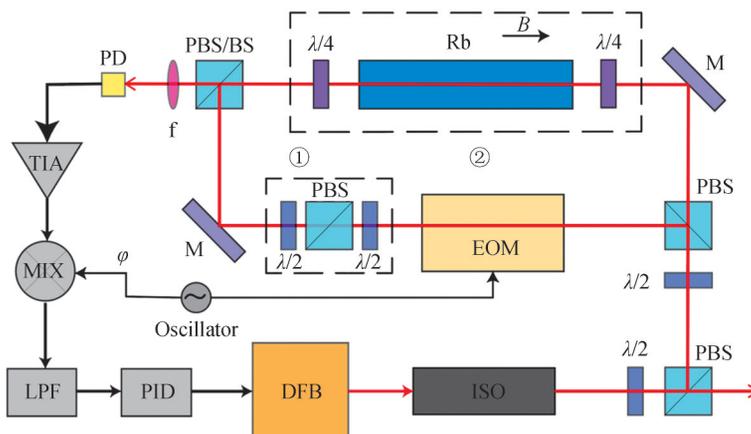
Fig. 2 The extreme point-to-point amplitude curve near the zero point of the MTS signal at different modulation frequencies

## 2 MTS多参量相关激光稳频实验及结果分析

### 2.1 实验系统

基于MTS光谱多参量相关的DFB激光锁频系统如图3。该系统中,DFB激光器输出功率为35 MW,光斑直径约为2.3 mm。激光经过光隔离器(TOPTICA DSR780)后在第一个PBS处分成两束,水平偏振光送到主光路,垂直偏振光(约3.5 Mw)进入MTS光谱光路用于激光器锁频。垂直偏振光在第二个PBS处分成探测光和泵浦光,其中探测光为0.7 MW,泵浦光为2.8 MW。实验室采用的EOM是New Focus 4001型,调制频率 $\omega_m=12.5$  MHz,调制深度 $\beta=0.28$ 。泵浦光经过EOM调制后,经第三个PBS/BS反射,在150 mm长的铷泡内与探测光发生四波混频。探测光及其边带的拍频信号被PD(Hamamatsu S1223)接收,转换成电压信号输出。PD前用一个焦距为120 mm的凸透镜会聚光束。PD接收的信号需要进行放大,实验室使用是自制的电流电压转换放大电路<sup>[15]</sup>。经放大后的信号与晶振(TCXO 12.500 MHz)产生的信号一起送入鉴相电路进行解调,然后再通过10 KHz的低通滤波电路,将高频信号过滤以提高信噪比。实验室使用Toptica的DigiLock 110模块作为PID控制系统来实现误差信号的负反馈。为了后期研究偏振和磁场对锁频的影响,图3中增加了偏振控制单元模块①和磁场控制单元模块②,外加磁场的方向与光传播方向在同一直线上。

实验中先用波长计将激光频率调至780.240 nm,然后对激光频率进行线性扫描,在DigiLock中观察MTS光谱曲线。优化泵浦光与探测光的重合度及分光比,使信号幅值达到最大,如图4所示,信噪比为60:1。通过与饱和吸收光谱图4比较,以 $^{87}\text{Rb } F=2\rightarrow F'=3$ 共振吸收峰为零失谐点, $^{85}\text{Rb}$ 较大的吸收峰对应 $F=3\rightarrow F'=4$ 跃迁频率,可以确定左吸收峰为 $^{85}\text{Rb } F=3\rightarrow F'=4$ ,右吸收峰为 $^{87}\text{Rb } F=2\rightarrow F'=3$ 。



DFB: Distributed feedback laser; ISO: Optical isolator; EOM: Electro-optic modulator; PBS: Polarizing beam splitting prism;  $\lambda/2$ : Half-wave plate; M: Mirror; f: Focusing lens; PD: Photodiode; TIA: Trans-impedance amplifier; LPF: Low-pass filter. The modules ① and ② are used for polarization experiment and magnetic field experiment respectively

图3 基于MTS光谱的激光锁频原理

Fig. 3 Schematic diagram of laser frequency lock based on MTS spectrum

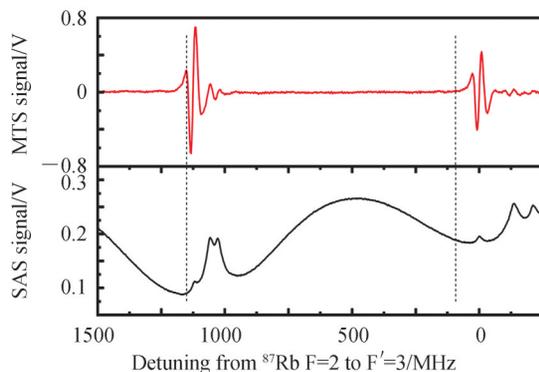


图4 MTS光谱信号曲线与饱和吸收光谱信号对比曲线

Fig.4 Comparison between the MTS spectral and the saturated absorption spectral

## 2.2 MTS光谱信号的相位相关特性

MTS光谱信号调制解调电路原理如图5,晶振产生的调制信号经放大后分成两路,一路作为EOM驱动信号用于调制,另一路经相移电路后与PD信号混频用于解调。鉴相电路输出信号的滤波和放大也在同一电路中完成。解调信号相位的改变通过一个由电位器、电容和运放组成的有源滞后移相电路实现,当改变电位器的阻值时,解调信号的相位呈现非线性变化,范围约为 $0\sim 90^\circ$ 。

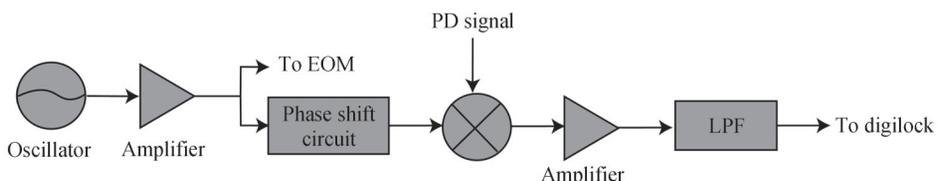


图5 MTS信号的调制解调电路原理

Fig. 5 Modulation and demodulation circuit principle of MTS signal

图6给出了理论上和实验上不同解调相位 $\varphi$ 下MTS光谱信号随失谐频率的变化。可以看出,当改变解调相位时,MTS信号曲线由色散信号逐渐向吸收信号转变。而且,实验测量的MTS信号曲线与理论计算的MTS信号曲线的幅值和过零点斜率(归一化后)基本相同,吸收峰线宽均小于 $8\Gamma$ ,实验结果与理论结果基本一致。进一步分析可知,当解调相位开始改变时,过零点斜率快速增大,但幅值下降较慢,当相位改变量在 $\pi/5$ 附近时,MTS信号有较大幅值的同时,过零点斜率也较大,即在 $\pm 1\Gamma$ 内信号为一陡峭的直线。继续

增大相位,过零点斜率基本不变,但幅值下降很快。综合考虑,相位改变量在 $\pi/5$ 附近时具有最佳的锁频条件,此时MTS信号为一类色散线型的混合信号。

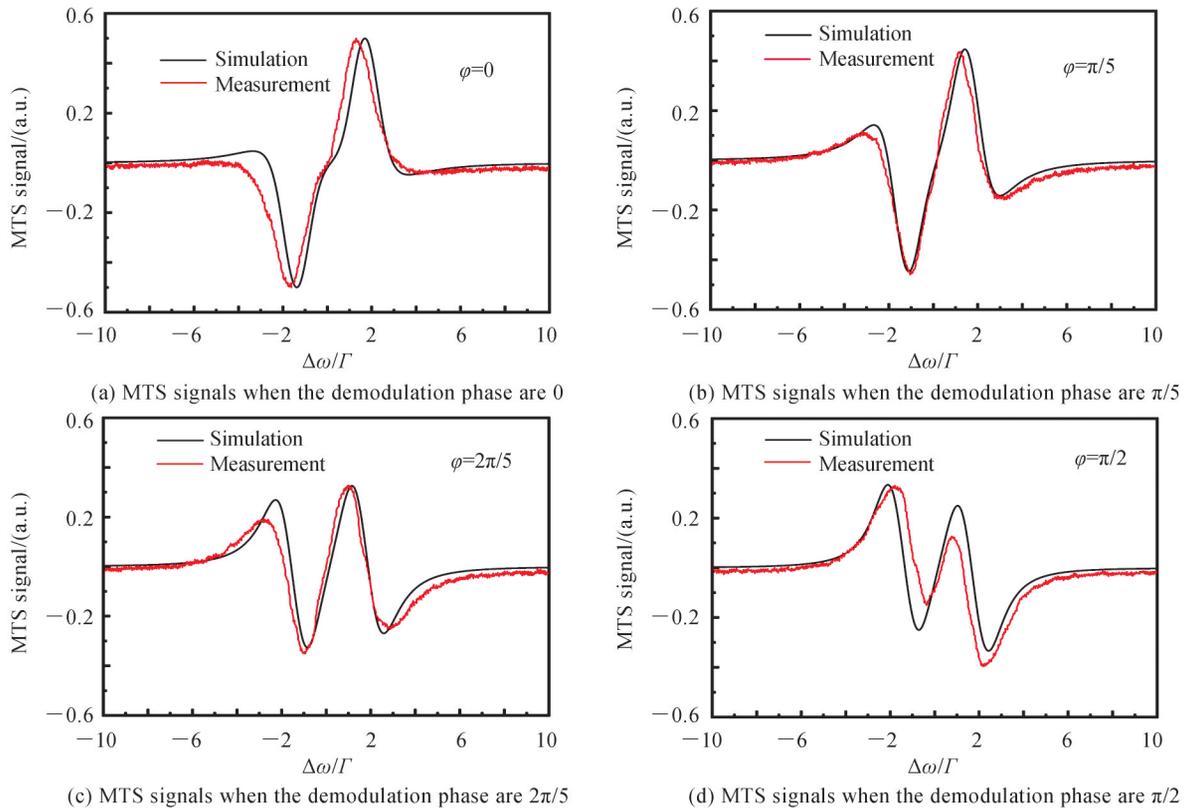


图6 不同解调相位 $\varphi$ 下MTS光谱信号随失谐频率的变化

Fig.6 The simulated and measured MTS signal vary with the different demodulation phases  $\varphi$

### 2.3 MTS光谱信号的偏振相关特性

在四波混频的非线性过程中,MTS信号的强度和偏振与入射光的偏振状态有关,因此改变入射光的偏振可以实现对四波混频信号的调制与相干控制<sup>[19]</sup>。本文通过改变泵浦光的偏振来研究入射光偏振对MTS信号的影响。实验中泵浦光与探测光均为线偏振光。实验光路装置如图3中①所示(注意:研究偏振相关MTS锁频时,模组②在实验中不放置),模组①内靠近EOM的半波片和PBS用于调节泵浦光功率,而另一个半波片用来调节泵浦光偏振。实验时,为了保证进入铷泡的泵浦光在偏振改变时,功率不变,将光路中靠近PD的偏振分束棱镜(PBS)换为不具有偏振选择的分束棱镜(BS)。此时,虽然分束棱镜BS会导致进入铷泡的泵浦光功率发生了变化,但可通过调节靠近EOM的半波片和PBS组合来保证进入铷泡的光功率不变,以实现最终进入铷泡的泵浦光偏振可变而功率不变。

首先,调节泵浦光偏振,使其与探测光偏振相同(水平偏振),即泵浦光和探测光之间的夹角为 $0^\circ$ (玻片架有刻度),并记录MTS信号的幅值。然后顺时针旋转半波片,每隔 $5^\circ$ 记录MTS信号幅值直至 $180^\circ$ 。每次旋转半波片后均需补偿泵浦光功率,使泵浦光与探测光功率比保持在4:1。图7显示了MTS信号幅值随泵浦光和探测光之间的夹角的变化关系。可以看到,MTS信号幅值的变化呈类余弦函数的周期性。当它们之间的夹角为 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $180^\circ$ 时,MTS信号具有最大幅值,此时泵浦光与探测光的偏振态相同或者垂直。当它们之间的夹角在 $30^\circ\sim 60^\circ$ 和 $120^\circ\sim 150^\circ$ 之间时,MTS信号幅值最小。因此,改变泵浦光的偏振状态,可以优化MTS信号强度幅度,提高锁频信号的信噪比。

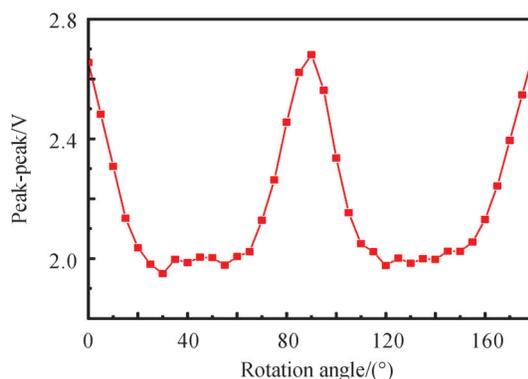


图7 MTS信号幅值与泵浦光和探测光偏振态之间的夹角的关系

Fig. 7 The relationship between the amplitude of the MTS signal and the angle between the polarization of the pump light and the probe light

#### 2.4 MTS光谱信号的磁场相关特性

除了偏振和相对对MTS信号影响外,磁场对激光锁频也会产生影响。通常情况下,磁场会引起塞曼效应,导致原子能级分裂,从而产生移频,进而会影响MTS锁频信号<sup>[2]</sup>。磁场对MTS锁频信号影响的光路如图3中②(注意:研究磁场相关MTS锁频时,模组①在实验中不放置)所示。实验中,在铷泡的两端各放置一个四分之一波片,旋转波片使得进入铷泡的探测光和泵浦光偏振状态分别为左旋圆偏振和右旋圆偏振,从而使原子能级极化,原子跃迁集中在 $5^2S_{1/2}F=2 m_F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}F'=3 m_F=3$ 。铷泡外置一个略长于铷泡的通电螺线管,螺线管磁场方向与两束光平行,通过调节螺线管的电流大小来控制磁场大小,进而研究磁场对锁频信号的影响。在铷泡外加入与光同向的外置磁场后,塞曼效应引起了原子谱线分裂。由于磁子能级的分裂,原来的跃迁变为 $^{87}\text{Rb}$ 的 $5^2S_{1/2}F=2 m_F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}F'=3 m_F=2$ 和 $5^2S_{1/2}F=2 m_F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}F'=3 m_F=3$ 两条谱线。这两条谱线是两条单独的MTS线性信号,均可进行锁定。随着磁场不断加大,两条谱线之间的距离不断变大,频率相差越来越大,当电流从 $-3.2\text{ A}$ 到 $3.2\text{ A}$ 变化时,可以实现超过 $200\text{ MHz}$ 的移频范围,导致MTS锁频信号幅度发生了较大的变化。图8表明,外加磁场后MTS信号幅度明显下降,且下降幅度可以达到磁致移频前MTS信号幅度的 $1/2$ 。因此,为了改善DFB激光锁频的稳定性,在某些磁场区域,尤其是变化磁场的区域,需要在铷泡外加上磁屏蔽。

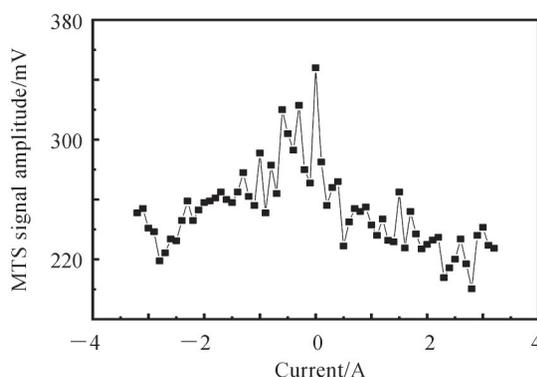


图8 螺线管电流与MTS信号幅度的关系

Fig.8 Relationship between solenoid current and MTS signal amplitude

### 3 DFB激光器稳频线宽特性分析

冷原子实验所使用的激光器通常为窄线宽激光器,尤其是用作Raman光的激光器线宽要求在 $1\text{ MHz}$ 左右<sup>[10]</sup>。由于光频率通常在百太赫兹量级,无法直接测量,因此实验室通常使用拍频<sup>[15]</sup>的方式测量激光器线宽。利用两台频率相近的激光器进行拍频来提取差频信号,通常在MHz或GHz,然后利用频谱分析仪可以观察低频电信号,分析该信号线宽可得到激光器频率稳定性等性能。实验中,将DFB激光器与一台已锁频

的DL pro激光器进行拍频(通常DL pro激光器线宽在100 kHz左右,比DFB激光器线宽要窄),拍频线宽反映的是DFB激光器的线宽情况。拍频结果如图9(a)、(b)所示。

当自由运转时,DFB激光器线宽(FWHM)约为2.6 MHz,此时线宽大于1 MHz,无法直接用做冷原子绝对重力仪光源。随后将激光器用MTS锁频,通过调节解调相位,使光谱信噪比大于60:1,且过零点斜率较大,此时线宽约为1.6 MHz,有压窄线宽的效果。激光频率锁定后线宽窄化的原因源自于调制转移光谱能提供强噪声抑制,因为在靠近锁定的跃迁谱线处展现出较强的多普勒背景下,MTS会产生无多普勒背景的对称亚多普勒特征,其结果使得交叉跃迁谱线和其他跃迁谱线被抑制<sup>[20]</sup>,即抑制了强噪声,从而使得激光器频率锁定后的线宽被压窄。除了激光线宽,实验中还记录锁频前后拍频中心频率的变化,如图9(c)、(d)所示。可以看出,激光器自由运转时光频率存在长期漂移,在250 s内频率变化了约30 MHz,且没有稳定的趋势,频率稳定性很差;当频率锁定后,在250 s内激光器频率漂移量小于0.7 MHz,对应的频率稳定度小于 $1.75 \times 10^{-9}$ ,且基本趋于稳定,因此锁频效果理想。而且,加入磁场后可以使锁定频率在200 MHz的范围内移动,很好地满足了冷原子实验的要求。考虑到在冷原子干涉实验,如冷原子绝对重力仪和磁力仪中,通常对冷却光和再泵浦光的线宽要求不高,因此该DFB激光稳频系统可用作冷原子干涉实验中冷却光和再泵浦光的光源。

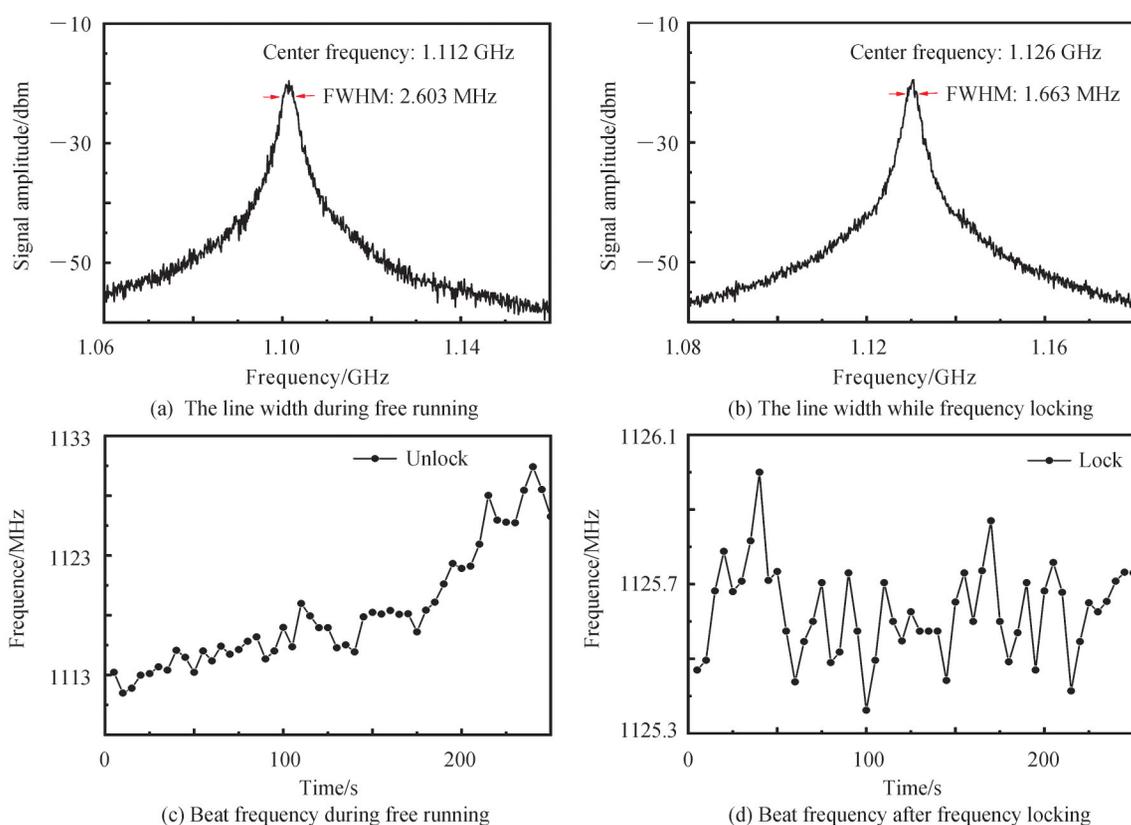


图9 MTS锁频前后的DFB激光器线宽

Fig.9 Linewidth of DFB laser before and after MTS frequency locking

## 4 结论

基于MTS稳频技术,以 $^{87}\text{Rb}$  D2线 $F=2 \rightarrow F'=3$ 跃迁频率为参考频率,实现了DFB激光器的高精度高稳定频率锁定。理论和实验研究了调制频率、调制相位、泵浦光偏振和磁场等多光学参量对MTS光谱信号幅值、过零点斜率的影响,且实验和理论研究结果高度一致。当泵浦光调制频率在9~15 MHz时,信号具有较大的幅值和过零点斜率,适合频率锁定;当调节信号相位改变量在 $\pi/5$ 附近时具有最佳的锁频条件,此时MTS信号为一类色散线型的混合信号;当泵浦光与探测光偏振相同时,MTS信号具有最大幅值。基于这些结果,通过选择12.5 MHz的调制频率,优化解调信号相位和PID参数,使MTS信号幅值及过零点斜率达到

最佳,实现了DFB激光器的高精度频率锁定。并且,在铷泡上加入纵向磁场后,发现塞曼效应导致MTS信号幅度发生了较大的变化,说明MTS锁频时给铷泡施加磁屏蔽的必要性。虽然锁频后拍频测量的DFB激光器线宽仍大于1 MHz,但锁频致使线宽窄化效应明显,而且锁频后频率稳定度小于 $1.75 \times 10^{-9}$ ,消除了锁频前的频率长漂问题。因此,该DFB激光稳频系统可用作冷原子干涉实验中冷却光和再泵浦光的光源。

#### 参考文献

- [1] CHU S. The manipulation of neutral particles [J]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1998, 169(3): 274-91.
- [2] XIE Chengxue . Laser frequency stabilization by using modulation transfer spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.  
解晨雪. 基于调制转移光谱的半导体激光器的稳频方法 [D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [3] RU Ning, WANG Yu, MA Huijuan, et al. Flexible control of semiconductor laser with frequency tunable modulation transfer spectroscopy [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(7): 321-324.
- [4] MASSEY G A, OSHMAN M K, TARG R. Generation of single-frequency light using the fm laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1965, 6(1): 10-11.
- [5] YUAN D D, HU S L, LIU H H, et al. Research of laser frequency stabilization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 22-28.  
苑丹丹, 胡姝玲, 刘宏海, 等. 激光器稳频技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 8: 22-8.
- [6] LIU X, BOUDOT R. A distributed-feedback diode laser frequency stabilized on doppler-free Cs D1 line [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2012, 61(10): 2852-2855.
- [7] MILLETT-SIKKING A, HUGHES I G, TIERNEY P, et al. DAVLL lineshapes in atomic rubidium [J]. *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics*, 2006, 40(1): 187-98.
- [8] BJORKLUND G C. Frequency-modulation spectroscopy: a new method for measuring weak absorptions and dispersions [J]. *Optics Letters*, 1980, 5(1): 15-17.
- [9] MCCARRON D J, KING S A, CORNISH S L. Modulation transfer spectroscopy in atomic rubidium [J]. *Measurement Science & Technology*, 2008, 19(10): 252-253.
- [10] HAN Shunli. Research on Raman-pulse-assisted atom interferometer [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.  
韩顺利. 拉曼脉冲型原子干涉仪的基础研究 [J]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [11] SO C, SPONG N, MHL C, et al. Zeeman-tunable modulation transfer spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5374-5378.
- [12] LIU Zhiheng. DFB diode laser frequency doubling and frequency locking via MTS [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.  
刘志恒. DFB激光器倍频与调制转移光谱锁频 [D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [13] LI L Z, PARK S E, NOH H R, et al. Modulation transfer spectroscopy for a two-level atomic system with a non-cycling transition [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2011, 80(7): 785-791.
- [14] XIN Jun. Research on nonlinear SU(1, 1) interferometer using four-wave mixing process based on rubidium atomic ensembles [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.  
忻俊. 基于铷原子系综四波混频过程的非线性SU(1,1)干涉仪的研究 [D]. 上海:华东师范大学, 2017.
- [15] CHENG Bing. Precise measurement of gravitational acceleration based on the cold atomic interferometer [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.  
程冰. 基于冷原子干涉的重力加速度精密测量研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [16] TAO Tianjong. Study of frequency stabilizing and phase locking for diode lasers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.  
陶天炯. 激光稳频锁相研究 [D]. 杭州:浙江大学.
- [17] JAATINEN E. Theoretical determination of maximum signal levels obtainable with modulation transfer spectroscopy [J]. *Optics Communications*, 1995, 120(1-2): 91-97.
- [18] STECK D A. Rubidium 87 D Line Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009(2): 31.
- [19] LI Yuanyuan. High-resolution spectroscopy of thermal atoms and polarization-modulated four-wave mixing [D]. Xi'an: Northwest University, 2009.  
李院院. 热原子的高分辨率光谱及偏振调制四波混频的研究 [D]. 西安:西北大学, 2009.
- [20] NEGNEVITSKY V, TURNER L D. Wideband laser locking to an atomic reference with modulation transfer spectroscopy [J]. *Physics*, 2013, 21(3): 3103.

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China (Nos. 2016YFF0200206, 2017YFC0601602), National Natural Science Foundation of China (Nos. 61727821, 61475139, 61478069, 11604296, 11404286, 51905482), Project of China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center (No. DD20189831), Xinmiao Talent Plan of Zhejiang (No. 2021R403093)