

激光与光电子学进展

应用于积分球冷原子钟的窄线宽激光稳频系统

齐航航^{1,2}, 杨博文^{1,2}, 赵浩杰^{1,2}, 肖玲¹, 邓见辽^{1*}, 成华东^{1*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过调制转移光谱稳频的方式, 将外腔半导体激光器频率锁定于⁸⁷Rb原子D₂线超精细跃迁5²S_{1/2}, F=2→5²P_{3/2}, F=3, 使激光器线宽由自由运转的382.18 kHz压窄至稳频后的37.94 kHz。稳频后的窄线宽激光用于积分球冷原子钟的探测光, 可以将激光频率噪声对原子钟短期稳定度的影响降低至 $5.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 。

关键词 激光器与激光光学; 调制转移光谱; 激光稳频; 外腔半导体激光器; 积分球冷原子钟; 频率稳定度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222036

Narrow Linewidth Laser Frequency Stabilization System for Integrating Sphere Cold Atom Clock

Qi Hanghang^{1,2}, Yang Bowen^{1,2}, Zhao Haojie^{1,2}, Xiao Ling¹, Deng Jianliao^{1*}, Cheng Huadong^{1*}¹Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this study, the frequency of the external cavity diode laser (ECDL) is locked to the hyperfine transition of ⁸⁷Rb D₂ line 5²S_{1/2}, F=2→5²P_{3/2}, F=3 using modulation transfer spectroscopy (MTS) frequency stabilization. The laser linewidth is narrowed from 382.18 kHz in the free-running mode to 37.94 kHz after frequency stabilization. The narrow linewidth laser after frequency stabilization can be utilized as the probe light for the integrating sphere cold atom clock. Thus, the contribution of the laser frequency noise to the short-term instability of the atomic clock could be smaller than $5.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$.

Key words laser and laser optics; modulation transfer spectroscopy; laser frequency stabilization; external cavity diode laser; integrating sphere cold atom clock; frequency stability

1 引言

积分球冷原子钟具有结构简单、易于集成化、稳定度高且频率漂移小等优点, 可以用作星载原子钟和地面守时钟^[1-3]。实验研究表明, 探测光的频率噪声是影响积分球冷原子钟频率稳定度的重要因素之一。2017年, 王秀梅等^[4]分析了探测光频率噪声对积分球冷原子钟频率稳定度的影响, 目前外腔半导体激光器的频率噪声对积分球冷原子钟短期稳定度的影响约为 $2.5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 。为了进一步提高积分球冷原子钟的稳定度, 需要压窄激光器线宽, 减小激光器的频率噪

声。常用的激光稳频方法有饱和吸收光谱(SAS)稳频^[5-7], Pound-Drever-Hall(PDH)稳频^[8-10]、调制转移光谱(MTS)稳频^[11-17]等, 这些方法各有优缺点。SAS稳频装置简单, 但通常需要对激光器电流进行调制, 会引入额外的调制噪声^[18], 并且剩余的多普勒本底会导致锁定频率存在误差^[19]。PDH稳频将激光器频率锁定在特定的法布里-珀罗(F-P)腔上, 稳频效果受F-P腔的影响较大, 因而对F-P腔要求高, 且对振动以及温度敏感。MTS稳频方法将激光器频率锁定在原子超精细跃迁谱线上, 相较于PDH稳频方法具有结构简单、对环境振动不敏感和抗干扰性强的优点, 并且由于调

收稿日期: 2022-07-11; 修回日期: 2022-07-27; 录用日期: 2022-08-04; 网络首发日期: 2022-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(61875215, 12174409)

通信作者: *chenghd@siom.ac.cn; **jldeng@siom.ac.cn

制转移过程为非线性过程,因此解调信号没有多普勒背景。本文采用 MTS 稳频方法压窄激光器线宽。

目前,关于 ^{87}Rb MTS 稳频技术的研究,大多采用 ^{87}Rb 的 D_2 线闭合跃迁 $5^2S_{1/2}$, $F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}$, $F=3$ 作为参考频率。2013 年, Negnevitsky 等^[11] 用基于声光调制器 (AOM) 的 MTS 稳频技术, 激光器锁定线宽达到 163 kHz。2014 年, 韩亚帅等^[12] 采用 MTS 稳频, 激光器锁定 30 min 后的残余频率起伏为 ± 85 kHz, 并比较了射频频率调制光谱 (RF-FMS) 与 MTS 的锁定效果。2018 年, 茹宁等^[13] 利用 AOM 移频, 实现可调谐 MTS 稳频, 移频范围为 60 MHz 附近。2020 年, 栾广建等^[14] 采用 MTS 方法对分布反馈式半导体激光器进行稳频, 稳频线宽为 136 kHz。除采用 ^{87}Rb 的 D_2 线 $5^2S_{1/2}$, $F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}$, $F=3$ 作为参考频率外, 2021 年洪毅等^[15] 将激光器锁定在 ^{87}Rb $5^2S_{1/2}$, $F=1 \rightarrow 5^2P_{3/2}$, $F=0, 1$ 交叉共振峰, 获得 20 h 频率漂移峰峰值为 105 kHz, 并研究了不同偏振方向的探测光和泵浦光对 ^{87}Rb 超精细跃迁 $5^2S_{1/2}$, $F=1 \rightarrow 5^2P_{3/2}$, $F=0, 1, 2$ 误差信号的影响。2018 年, Wu 等^[16] 研究了 ^{87}Rb 原子 D_1 线的调制转移光谱, 并研究了温度对光谱信号幅度的影响。2022 年, 喻晓等^[17] 以 1560 nm 窄线宽激光器作为种子光源, 倍频到 780 nm, 利用 MTS 稳频技术, 将 780 nm 锁定在 ^{85}Rb D_2 线的 $5^2S_{1/2}$, $F=3 \rightarrow 5^2P_{3/2}$, $F=4$, 实现 1560 nm 和 780 nm 的稳频输出。

本文利用 MTS 稳频方法, 通过反馈激光器电流, 将外腔半导体激光器锁定在 ^{87}Rb 的 D_2 线 $5^2S_{1/2}$, $F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}$, $F=3$ 超精细跃迁频率, 使激光器线宽从自由运转的 382.18 kHz 压窄至稳频后的 37.94 kHz, 将其作为积分球冷原子钟探测光, 可以将激光器频率噪声对原子钟短期稳定度的影响降低至 $5.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$, 从而进一步提高积分球冷原子钟的性能。该窄线宽激光器方案也可以应用于其他精密测量领域, 比如原子干涉仪、原子磁强计等。

2 基本原理

MTS 采用电光调制器 (EOM) 对泵浦光进行调制, 调制信号是频率为 ω_m 的正弦波。光束通过 EOM 后, 其光场可表示为

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

式中: E_0 为光场振幅; ω_c 为激光中心频率; δ 为调制深度; ω_m 为调制频率; $J_n(\delta)$ 为 n 阶贝塞尔函数; t 为时间。在调制深度较低 ($\delta < 1$) 情况下, 高阶边带 ($n > 1$) 可以忽略, 式 (1) 只有载波频率 ω_c 和一阶边带 $\omega_c \pm \omega_m$ 。可见, 光场经过调制频率为 ω_m 的 EOM, 获得频率为

$\omega_c \pm \omega_m$ 的边带。在 Rb 泡中, 泵浦 (pump) 光的一阶边带和未经调制的探测 (probe) 光, 在满足共振条件时发生四波混频过程, 从而使 probe 光获得调制。通过光电探测器测量获得 probe 光与其边带的拍频信号, 其表达式^[20-21] 为

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

式中: Γ 是原子自然线宽; L_n 是洛伦兹线型; D_n 是色散线型; C 和 B 是常数。

$$L_n = \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + (\Delta - n\omega_m)^2}, \quad (3)$$

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

式中, Δ 是激光频率相对共振跃迁频率的失谐。当调制深度 $\delta < 1$ 时, 可以忽略高阶项, 只取 $n=0$ 和 $n=1$ 项, 式 (2) 可以简化为

$$S(\omega_m) = \frac{1}{\sqrt{\Gamma^2 + \omega_m^2}} J_0(\delta) J_1(\delta) \times [C(L_{-1} + L_{1/2} - L_{-1/2} - L_1) \cos(\omega_m t + \varphi) + B(D_1 - D_{1/2} - D_{-1/2} + D_{-1}) \sin(\omega_m t + \varphi)]. \quad (5)$$

探测得到的拍频信号通过解调可以得到 MTS 的鉴频信号, 从而可以进行激光器的频率锁定。

3 实验装置

利用 MTS 实现激光器稳频的实验装置如图 1 所示。实验中信号发生器 1 (SG1) 生成 110 MHz 的射频信号驱动 AOM, SG2 生成 12.5 MHz 的 EOM 驱动信号和解调本振信号, 解调信号与 EOM 驱动信号频率相同, 具有固定相位差。实验使用的 780 nm 外腔半导体激光器, 通过调节注入电流和温度, 可以实现波长调谐。激光器输出光经过光学隔离器后, 通过偏振分束器 1 (PBS1) 后分成光束 1 和光束 2, 光束 1 为激光器输出, 用于后续实验, 光束 2 进入 MTS 光路, 获得鉴频信号用于稳频。光束 2 首先双次通过 AOM, 选择负一级衍射光移频 -220 MHz。移频后的光束经 PBS3 分为光束 3 和光束 4, 分别为 probe 光和 pump 光。pump 光通过 EOM 后获得调制, 调制频率为 12.5 MHz。pump 光和 probe 光扩束后对向通过 Rb 泡, 受到调制的 pump 光和未受调制的 probe 光在 Rb 泡内重合, 发生调制转移过程。通过 Rb 泡的 probe 光经过 PBS4 透射进入光电探测器 (PD), 光电探测信号与 SG2 产生的本振信号经过混频、滤波后生成鉴频信号, 该鉴频信号进入比例积分微分 (PID) 模块反馈激光器电流, 从而实现 780 nm 外腔半导体激光器频率锁定。

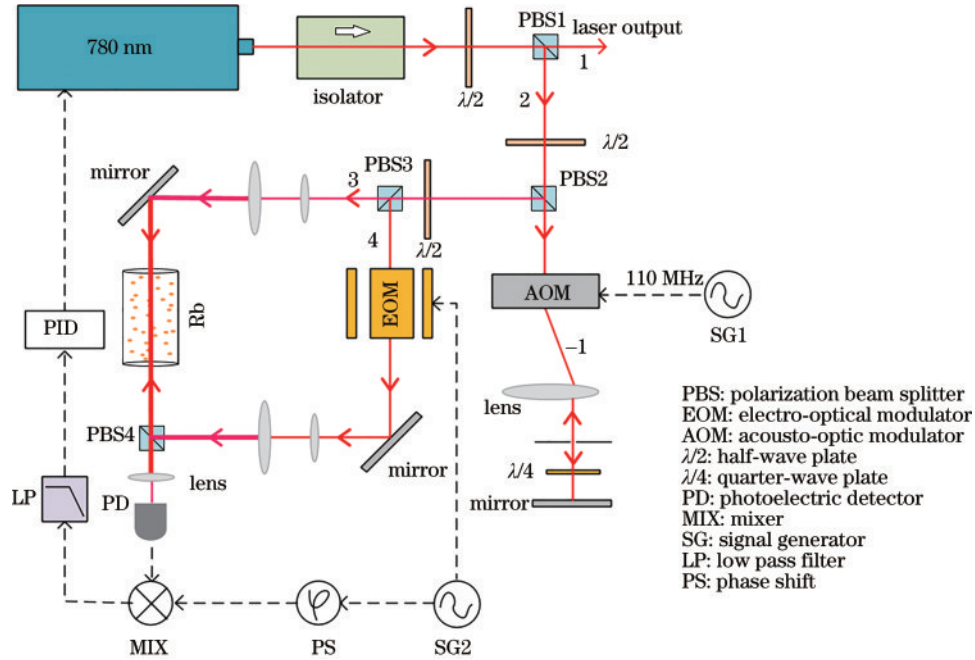


图 1 MTS 激光器稳频实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for laser frequency stabilization based on MTS

4 实验结果

4.1 饱和吸收和 MTS 信号优化

为了获得高信噪比的 MTS 信号,在仔细调节激光偏振与 EOM 光轴重合的条件下,对 probe 光和 pump 光功率进行调节,并且对 Rb 泡温度进行控制。首先,在不同 probe 光功率下,测试了 pump 光功率变化对 MTS 信号信噪比(SNR)的影响,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,随 pump 光增强,SNR 增加,但在 pump 光功率达到一定的强度后,随 pump 光功率增加,SNR 基本不变。对于不同功率的 probe 光,达到 SNR 饱和所需要的 pump 光功率不同。

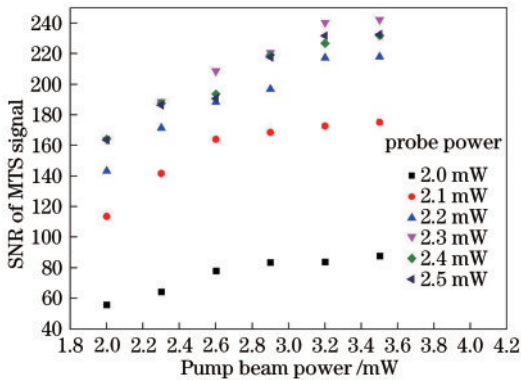


图 2 不同 probe 光功率下,pump 光功率变化对 MTS 信号 SNR 的影响

Fig. 2 Signal-to-noise ratio (SNR) of MTS signal changing with pump beam power for different probe beam powers

之后,在不同 pump 光功率下,测量了 probe 光功率变化对 MTS 信号 SNR 的影响,结果如图 3 所示。

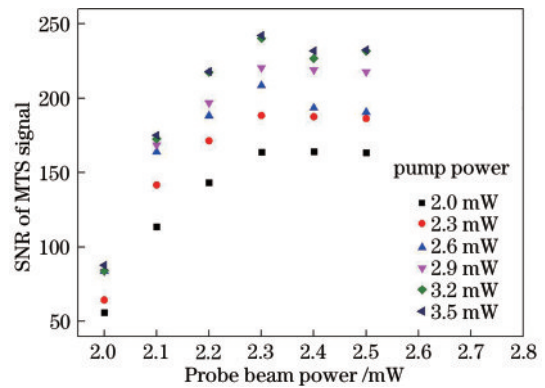


图 3 不同 pump 光功率下,probe 光功率变化对 MTS 信号 SNR 的影响

Fig. 3 SNR of MTS signal changing with probe beam power for different pump beam powers

从图 3 可以看出,在 probe 光功率小于 2.3 mW 时,随 probe 光功率增加,SNR 增加明显;达到 2.3 mW 后,随 probe 光功率增加,SNR 基本保持不变,甚至略有下降。这是因为当 probe 光功率足够大时,MTS 信号发生展宽,信号幅度基本保持不变,但 probe 光功率的增大会使得探测光噪声增大,导致 SNR 基本保持不变甚至略有减小。

此外,Rb 泡温度是影响泡内原子密度的关键因素,也是影响 MTS 信号的重要因素,因此本文研究了温度对 MTS 信号 SNR 的影响。在保持 probe 光功率和 pump 光功率不变情况下,对 Rb 泡温度进行控制,测量了温度对 SNR 的影响。改变 probe 光功率和 pump 光功率,测量了多组 SNR 随温度的变化,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着 Rb 泡温度升高,SNR

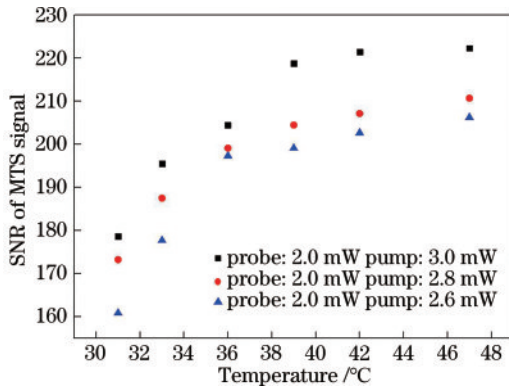


图 4 Rb 泡温度对 MTS 信号 SNR 的影响

Fig. 4 SNR of MTS signal changing with temperature of Rb cell

明显提高,在低于 39 °C 时,温度对 SNR 影响明显;当高于 39 °C 后,随着温度增加,SNR 增加趋势减缓。因为温度较低时,温度升高对气室内原子密度影响明显,使得 MTS 信号幅度明显增大,SNR 增加;在温度较高时,会发生原子碰撞展宽,导致 SNR 改善不再明显。

结合上述实验结果,选择最佳实验参数,使 SNR 达到最大后开展激光稳频实验。实验中 Rb 泡通过温控模块稳定在 47 °C,通过 Rb 泡的 pump 光和 probe 光功率分别为 2.3 mW 和 3.5 mW,此时 MTS 信号 SNR 最大,约为 240。示波器显示 PD 接收的饱和吸收(SAS)信号以及解调获得的 MTS 信号,如图 5 所示。

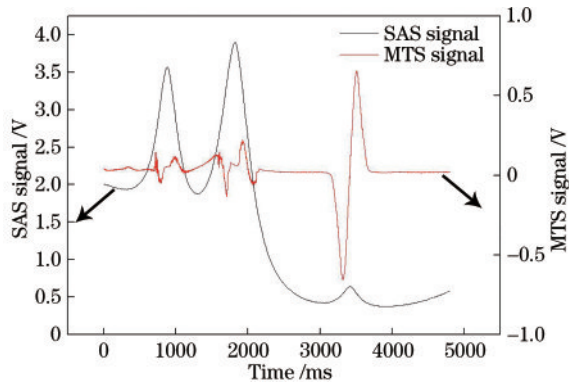


图 5 SAS 信号和 MTS 信号

Fig. 5 SAS and MTS signals

4.2 外腔半导体激光器稳频结果与讨论

实验利用频准激光公司生产的光纤激光器与外腔半导体激光器进行拍频,获得外腔半导体激光器的线宽。780 nm 光纤激光器 100 μs 积分时间线宽约为 6.61 kHz,可以作为拍频基准。实验中采用频谱分析仪(N9020A,Keysight 公司)对拍频信号进行测量,图 6 给出了在分辨率带宽为 270 kHz、显示带宽为 30 MHz (span) 时外腔半导体激光器未锁频时的拍频结果。可以看出,在自由运转时,外腔半导体激光器线宽约为 382.18 kHz。采用 MTS 稳频后,拍频信号如图 7 所示,此时谱仪的分辨率带宽为 27 kHz,显示带宽为 3 MHz。从图 7 中可以看出,稳频后激光器线宽约为

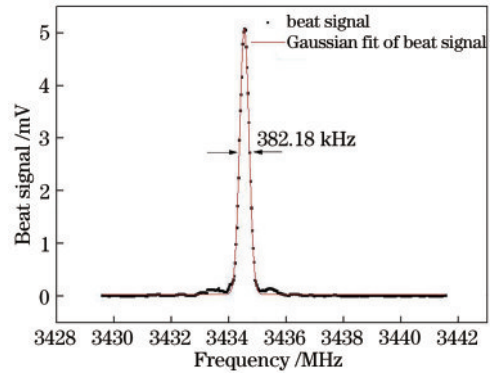


图 6 外腔半导体激光器自由运转时的拍频信号

Fig. 6 Beat signal with free running external cavity diode laser (ECDL)

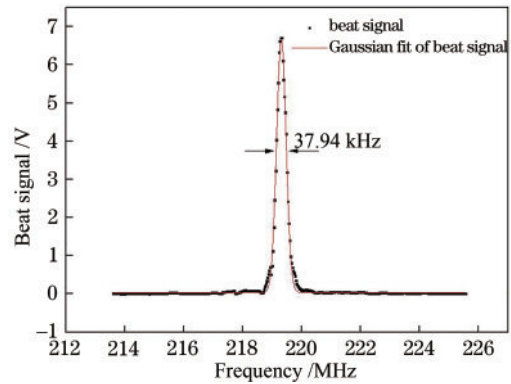


图 7 外腔半导体激光器稳频后的拍频信号

Fig. 7 Beat signal with locked ECDL

37.94 kHz,线宽压窄了一个量级。通过与光纤激光器拍频,连续测量 0.5 h,Allan 方差如图 8 所示,积分时间 1 s 频率稳定度为 1.18×10^{-11} 。根据之前的理论分析^[4],激光器频率噪声对原子钟稳定度的影响可以简化为

$$[\sigma_y(\tau)]^2 = \frac{4}{\pi^2 C^2 Q_{at}^2} \frac{T_c}{\tau_d} \frac{4\gamma^2}{\Gamma(2\gamma + \Gamma)(\gamma + \Gamma)} \tau^{-1}, \quad (6)$$

式中: $\sigma_y(\tau)$ 是积分球冷原子钟稳定度; C 是常数; Q_{at} 是

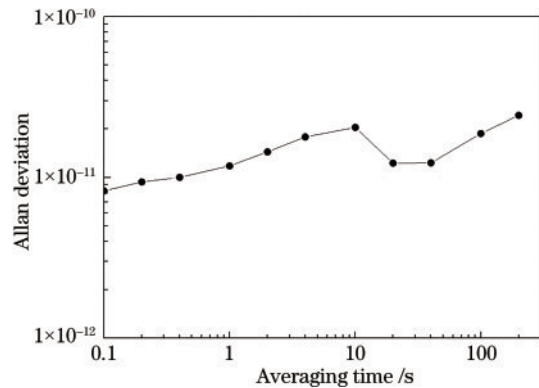


图 8 拍频信号的 Allan 方差

Fig. 8 Allan deviation of beat signal

品质因数; T_c 是原子钟周期; τ_d 是探测时长; γ 是激光器线宽; Γ 是原子自然线宽。对当前实验室积分球冷原子钟系统, 各个参数取值分别为: $C=1$, $Q_{\text{at}}=3.4 \times 10^8$, $T_c=96 \text{ ms}$, $\tau_d=3 \text{ ms}$, $\Gamma=6.06 \text{ MHz}$ 。由此可知, 稳频后外腔激光器的频率噪声对积分球冷原子钟短期稳定度的影响将降低至 $5.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 。

5 结 论

利用 MTS 实现了外腔半导体激光器的频率锁定, 通过与窄线宽光纤激光器进行拍频, 获得了稳频后的外腔半导体激光器线宽。将外腔半导体激光器线宽由自由运转时的 382.18 kHz 压窄至稳频后的 37.94 kHz, 积分时间 1 s 的 Allan 方差为 1.18×10^{-11} , 大大降低了激光器频率噪声。该稳频外腔半导体激光器将应用于积分球冷原子钟, 其对积分球冷原子钟短期稳定性的影响将会降低至 $5.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 。该激光稳频方案具有通用性, 可以应用于其他精密测量领域。

参 考 文 献

- [1] 刘鹏, 成华东, 孟艳玲, 等. 积分球冷原子钟相位调制 Ramsey 条纹研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1112001. Liu P, Cheng H D, Meng Y L, et al. Research on phase modulation of Ramsey fringes in integrating sphere cold atom clocks[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1112001.
- [2] Yu M Y, Cheng H D, Meng Y L, et al. An integrated laser system for the cold atom clock[J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, 90(5): 053203.
- [3] Ouyang X C, Yang B W, Hu Q Q, et al. Distortion of Rabi oscillations in a compact cold-atom clock[J]. Physical Review A, 2021, 103(4): 043118.
- [4] 王秀梅, 孟艳玲, 李琳, 等. 积分球冷原子钟的探测光频率和强度噪声[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0912001. Wang X M, Meng Y L, Li L, et al. Frequency and intensity noises of probe laser in integrating sphere cold atom clock[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0912001.
- [5] Hänsch T W, Levenson M D, Schawlow A L. Complete hyperfine structure of a molecular iodine line[J]. Physical Review Letters, 1971, 26(16): 946-949.
- [6] Preston D W. Doppler-free saturated absorption: laser spectroscopy[J]. American Journal of Physics, 1996, 64(11): 1432-1436.
- [7] 吉经纬, 程鹤楠, 张镇, 等. 可搬运铷喷泉原子钟全自动激光稳频系统[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2214002. Ji J W, Cheng H N, Zhang Z, et al. Automatic laser frequency stabilization system for transportable ^{87}Rb fountain clock[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2214002.
- [8] Black E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. American Journal of Physics, 2001, 69: 79-87.
- [9] Su J, Jiao M X, Jiang F, et al. Laser frequency locking system using orthogonally demodulated Pound-Drever-Hall method[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11053: 110531B.
- [10] 姚波, 陈群峰, 陈雨君, 等. 基于超稳腔 PDH 稳频的 280 mHz 线宽 DBR 光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501014. Yao B, Chen Q F, Chen Y J, et al. 280 mHz linewidth DBR fiber laser based on PDH frequency stabilization with ultrastable cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501014.
- [11] Negnevitsky V, Turner L D. Wideband laser locking to an atomic reference with modulation transfer spectroscopy[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3103-3113.
- [12] 韩亚帅, 温馨, 白建东, 等. 采用铷原子射频频率调制光谱与 MTS 对 1560 nm 激光经波导倍频至 780 nm 进行稳频的比较[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0530002. Han Y S, Wen X, Bai J D, et al. Laser frequency stabilization of 1560 nm laser after frequency doubling to 780 nm with a waveguide: radio-frequency frequency-modulation spectroscopy versus modulation transfer spectroscopy with Rb atoms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0530002.
- [13] Ru N, Wang Y, Ma H J, et al. Flexible control of semiconductor laser with frequency tunable modulation transfer spectroscopy[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(7): 074201.
- [14] 栾广建, 毛海岑, 石晓辉. 基于 Rb^{87} 的 MTS 稳定激光器频率的方法[J]. 光学与光电技术, 2020, 18(2): 83-86. Luan G J, Mao H C, Shi X H. Method for modulating transfer spectrally stabilized laser frequency based on Rb^{87} [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2020, 18(2): 83-86.
- [15] 洪毅, 侯霞, 陈迪俊, 等. 基于 Rb^{87} MTS 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.
- [16] Wu B, Zhou Y, Weng K X, et al. Modulation transfer spectroscopy for D1 transition line of rubidium[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(11): 2705-2710.
- [17] 喻晓, 吕梦洁, 张旭, 等. 基于铷原子 MTS 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, Lü 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.
- [18] Kobayashi S, Yamamoto Y, Ito M, et al. Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(4): 582-595.
- [19] Hänsch T W, Shahin I S, Schawlow A L. Lines with a pulsed tunable dye laser[J]. Physical Review Letters, 1971, 27(11): 707-710.
- [20] Shirley J H. Modulation transfer processes in optical heterodyne saturation spectroscopy[J]. Optics Letters, 1982, 7(11): 537-539.
- [21] Zhang J, Wei D, Xie C 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.