

激光与光电子学进展

基于碘分子调制转移谱与光学腔的 583 nm 激光稳频实验

徐萍, 张思慧, 宋瑞, 王杰*, 武海斌

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241

摘要 用 583 nm 半导体倍频激光器获得了碘分子 R67(15-1) 跃迁的超精细分量调制转移谱(MTS)。针对超冷铷原子实验中冷却光的频率稳定, 利用 Pound-Drever-Hall(PDH) 稳频技术作为前级反馈将激光器稳定在法布里-珀罗腔, 用碘分子 MTS 稳频作为后级反馈, 以克服光学参考腔不可避免的长期漂移。稳频后 4 h 的监测结果表明, 相比仅用 PDH 稳频的漂移量(205 kHz), 双系统稳频时的最大频率起伏为 ± 12 kHz, 满足超冷铷原子实验系统长时间稳定运转的需求。本方案拓展了碘分子光谱在 583 nm 激光稳频的应用, 也为激光冷却铯、铥等元素中冷却光的频率锁定提供了参考。

关键词 激光器; 调制转移谱; 激光稳频; 碘分子; 超冷原子

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2314001

583 nm Laser Frequency Stabilization Experiment

Based on Iodine Molecule Modulation Transfer Spectroscopy and Optical Cavity

Xu Ping, Zhang Sihui, Song Rui, Wang Jie*, Wu Haibin

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract In this paper, a modulation transfer spectroscopy (MTS) of the hyperfine components at R67(15-1) transition of the iodine molecule is obtained with a 583 nm semiconductor frequency-doubling laser. For frequency stabilization of cooling laser in ultracold erbium experiment, the Pound-Drever-Hall (PDH) technique is used as the prefeedback to stabilize the laser to a Fabry-Perot cavity, and the MTS of iodine molecular is used as the secondary feedback to overcome the inevitable long-term drift of the optical reference cavity. The long-term drift data during 4 h show that, compared with the drift in frequency stabilization using only PDH technique (205 kHz), the maximum frequency fluctuation is within ± 12 kHz for the two-stage laser stabilization. This meets the long-term stable operation requirements of the ultracold erbium atomic experimental system. The scheme expands the application of iodine molecular spectroscopy in 583 nm laser frequency stabilization, and provides a strategy for laser stabilization of cooling light in cold atom experiment with elements such as europium and thulium.

Key words lasers; modulation transfer spectroscopy; laser frequency stabilization; iodine molecule; ultracold atom

1 引言

超冷原子体系是目前实验科学领域非常活跃的前沿学科, 对于研究量子信息、量子模拟、精密测量、量子多体物理以及探索新奇量子物态具有重要的科学意义。相比传统的碱金属元素超冷原子, 镧系元素如镝(Dy)、铒(Er)、铕(Eu)、铥(Tm)原子在基态具有很大的磁矩, 除了具有各向同性的接触相互作用外, 还具有长程各向异性的偶极-偶极相互作用^[1], 成为研究偶极量子多体现象的合适对象。在磁偶极量子气体中人们

观测到量子液滴^[2-3]、超固态^[4]等新奇量子物态。激光冷却铷原子采用的能级跃迁方案最先由美国国家标准与技术研究院(NIST)研究人员提出^[5-6], 近年来被奥地利科学院量子光学与量子信息研究所(IQOQI)^[7]、德国波恩大学^[8]、美国哈佛大学^[9]、香港科学技术大学(HKUST)^[10]的研究人员沿用和采纳。具体而言, 401 nm(自然线宽为 30 MHz)跃迁用于塞曼减速或初级磁光阱(MOT), 窄线宽的 583 nm 跃迁(自然线宽为 190 kHz)具有更低的多普勒冷却温度极限, 作为主要 MOT 光俘获铷原子, 然后装载到偶极阱中进行蒸发

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-04-05; 录用日期: 2022-04-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0304201)、国家自然科学基金(11734008)、国家自然科学基金青年科学基金(12104158)

通信作者: *jwang@lps.ecnu.edu.com

冷却获得玻色-爱因斯坦凝聚。为了维持实验系统长时间稳定运转,窄线宽、高稳定性的 583 nm 光源是激光冷却与囚禁原子系统中的关键技术之一^[11]。对于熔沸点较低的原子激光冷却实验,激光稳频大多基于原子蒸气室为参考的亚多普勒光谱稳频,如饱和吸收谱^[12]、偏振光谱^[13]、调制转移谱(MTS)^[14-16],谱线宽度在 10 MHz 左右。铷原子的熔点为 1529 °C,对于这类熔沸点高的原子:可用高温炉加热原子获得原子束,在垂直于喷射方向上射入激光,探测吸收信号或荧光信号就能得到用于激光稳频的光谱信号,其线宽一般为数十至数百 MHz^[17-18];也可用空心阴极灯作为参考,但其谱线信号极弱且线宽达到数百 MHz^[19-20]。这两种方法的线宽较宽且受温度、电磁环境的影响,一般仅用于粗略的测量和频率参考。高精度度的法布里-珀罗干涉仪(FPI)用作光学参考腔时,其线宽可达数百 kHz 乃至数十 kHz,采用零膨胀材料、真空、控温、隔振等一系列措施可提高其稳定性。基于参考腔的 Pound-Drever-Hall(PDH)稳频技术^[21-22]在窄线宽激光稳频中的应用非常广泛,但由于腔体材料内部应力、温度起伏等因素的影响,参考腔存在长期漂移。

丰富的碘分子吸收谱和无多普勒光谱常用于光频标、激光稳频、气体检测等领域,其典型光谱处于可见光和近红外光范围。1996 年,NIST 报道了碘分子处于 560~656 nm 区域(共 102 个精细结构分量)的无多普勒频率调制谱^[23],并对其绝对波数进行测量,典型不确定度约为 1 MHz。基于非线性近简并四波混频效应的 MTS 可以从根本上消除谱线的多普勒背景且具有高灵敏度、高分辨率等优点,是目前实现激光稳频最先进的光谱方法之一。近年来,国内外对锂(Li)^[24]、铷(Rb)^[25-27]、铯(Cs)^[28]、镱(Yb)^[19]等原子和 I₂^[29]、C₂H₂等

分子^[14]的 MTS 研究较多。其中,对碘分子的研究主要集中在光频标^[30-31]以及 532 nm^[32]、612 nm^[29]、633 nm^[33]、647 nm^[34]激光稳频中,但鲜有将碘分子 MTS 应用在 583 nm 激光稳频中。本文利用 MTS 技术获得了 21 条 583 nm 附近碘分子 R67(15-1)跃迁的超精细分裂谱线。为了提高谱线信噪比,一般需要相敏检波技术,但长达数十至数百毫秒的积分时间限制了整个伺服系统的反馈带宽,进而降低了激光稳频的短期稳定性。考虑到参考腔的 PDH 稳频和碘分子调制转移光谱稳频方法的优缺点,采用光学参考腔对激光器的压电陶瓷(PZT)和电流调制端进行前级反馈,将碘分子 MTS 系统进行二级反馈,纠正参考腔存在的长期漂移,使稳频系统兼备窄线宽、短期和长期稳定的特点。

2 基本原理

一束弱探测光和另一束受到调制的强泵浦光在原子(分子)气室中相向传播。其中,泵浦光的频率成分包含中心频率 ν_0 和调制产生的边带 $\nu_0 \pm n\nu_m$, ν_m 为调制频率。当调制程度较浅时,可忽略高阶边带,仅需考虑 ± 1 阶边带。当光与原子(分子)的相互作用满足亚多普勒共振条件时,原子(分子)样品的三阶非线性效应产生近简并的四波混频,此时强泵浦光所加的调制可以转移到原本未调制的弱探测光上。当激光频率扫过原子(分子)样品的吸收线时,弱探测光的一阶边带和中心频率的拍频信号由光电探测器接收,经相敏检波解调即可得到 MTS^[35-36]。

强泵浦光的电场 $E_0 \sin(\omega_0 t)$ 经过相位调制后可表示为

$$E = E_0 \sin(\omega_0 t + \delta \sin \omega_m t) = \frac{E_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [J_0(\delta) \sin \omega_0 t + J_n(\delta) \sin(\omega_0 + n\omega_m)t + (-1)^n J_n(\delta) \sin(\omega_0 - n\omega_m)t], \quad (1)$$

式中: E_0 为电场强度振幅; t 为时间; $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ 为泵浦激光角频率; $\omega_m = 2\pi\nu_m$ 为调制角频率; δ 为调制深度; J_n 为 n 阶贝塞尔函数。由动量守恒和能量守恒定律可

知,四波混频过程产生新的光子运动方向与探测光传播方向相同。因此,光电探测器接收到的信号可表示为

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

式中: φ 为转移到探测光的调制信号和原泵浦光调制信号的相位差; Γ 为自然线宽; c 为常数; L_n 和 D_n 分别为描述吸收和色散的项,可表示为

$$L_n = \Gamma^2 / [\Gamma^2 + (\Delta - n\omega_m)^2], \quad (3)$$

$$D_n = \Gamma(\Delta - n\omega_m) / [\Gamma^2 + (\Delta - n\omega_m)^2], \quad (4)$$

式中, Δ 为频率失谐。当 $\omega_m \ll \Gamma$ 时,吸收型和色散型

谱线都属于“类色散”形,在零失谐点附近的斜率较大,为线性变化的鉴频信号,适用于激光稳频^[37]。

3 实验结果与分析

3.1 铷原子荧光谱与碘分子多普勒吸收谱

目前,尚未有将碘分子光谱稳频用于超冷铷原子实验的报道。为验证将碘分子光谱用于铷原子冷却光

稳频的可行性,首先对比了铒原子荧光谱和碘分子多普勒吸收谱的位置差异。实验中使用 TOPTICA 公司的 TA-SHG-PRO 半导体倍频激光器,输出波长为 583 nm。激光分别进入铒原子高温炉和碘分子气室用于光谱分析。其中:进入铒原子高温炉的激光与原子喷射方向垂直,辐射的荧光被透镜会聚到光电倍增管;进入碘分子气室的激光经碘分子吸收后进入光电探测器。扫描激光器的 PZT 就能同时得到铒原子荧光谱和碘分子吸收谱,如图 1 所示。可以发现:三个明显的峰分别为 ^{170}Er 、 ^{168}Er 、 ^{166}Er 的荧光信号,其谱线宽度约为 80 MHz,信号吸收峰的高度由对应的自然丰度决定;碘分子的多普勒吸收谱宽度约为 1.0 GHz,距离 ^{166}Er 最近的吸收线位于相对失谐 2.0 GHz 处,对应碘分子的 R67(15-1)跃迁^[23]。

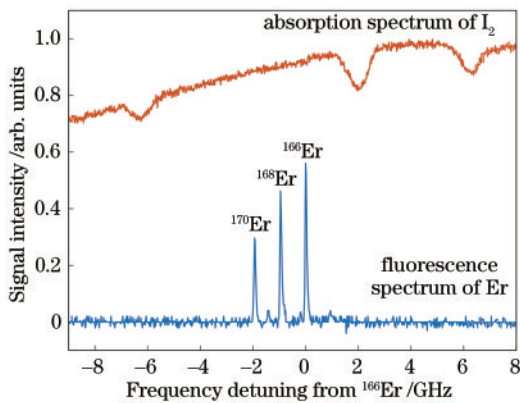


图 1 铒原子的荧光谱与碘分子的吸收谱

Fig. 1 Fluorescence spectrum of erbium atom and absorption spectrum of iodine molecule

3.2 PDH 稳频

前置稳频是以光学谐振腔为参考的 PDH 稳频,实验装置如图 2 所示。其中:AOM 为声光调制器;EOM 为电光调制器;PD 为探测器;FM 为频率调制;BPD 为平衡探测器;lock-in 为锁相放大器;PID 为比例积分微分控制器;PBS 为偏振分束器;M 为反射镜;RAPM 为反射型棱镜;DSM 为 D 形反射镜;BD 为光阑;TA 为锥形放大器;ULE cavity 为超低膨胀腔;RF 为射频信号;TTL 为信号源输出的晶体管-晶体管逻辑电平。半导体倍频激光器的输出波长为 583 nm,由 1166 nm 基频光经 TA 放大后注入环形倍频腔产生。由于倍频腔锁定过程中基频光带有 18.8 MHz 的频率调制,可用于光学参考腔 PDH 稳频,无需接入新的位相调制信号。1166 nm 基频光(ν)经光纤型 EOM 1 后产生 508 MHz 的大失谐边带($\nu+f$),通过二分之一波片($\lambda/2$)与 PBS 调节进入谐振腔的光功率,再由四分之一波片($\lambda/4$)调节激光的偏振态,最后将一定功率的圆偏振光垂直入射至 FPI 中,由 FPI 反射后再次经过 $\lambda/4$ 波片和 PBS 的线偏振光进入 PD。解调后得到鉴频信号,再经伺服控制系统处理并反馈调控激光器的电流和 PZT 电压,从而将 EOM 1 产生的边带稳频至 FPI 的谐振峰处。这种锁频方法是标准 PDH 稳频的改进方法^[38-39],控制 EOM 1 的驱动频率 f 可以改变锁定后的激光器频率,实验中激光频率的连续调节范围为 100~700 MHz。参考腔的自由光谱区为 1.5 GHz,精细度为 6800,线宽为 220 kHz。为尽可能减小光学参考腔谐振峰的漂移和抖动,采用超低膨胀玻璃作为腔体并将其放置于不锈钢材质的真空腔内,真空腔外用铝壳

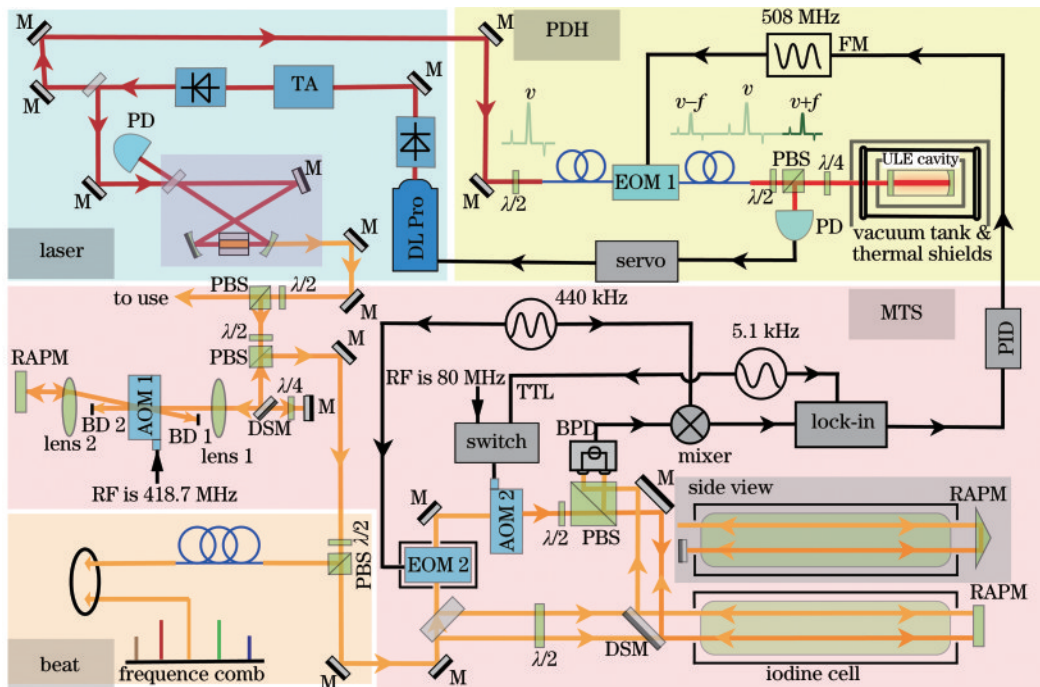


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup diagram

和保温材料覆盖,再将整个系统置于减震平台上,配合主动控温系统(温控精度优于 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)减小外界环境的温度、振动等对超稳腔的影响,但 PDH 锁定后 583 nm 激光的频率漂移仍然约为 51 kHz/h 。

3.3 结合碘分子 MTS 与 PDH 技术的反馈稳频

后级稳频是以碘分子超精细分量为参考的调制转移光谱稳频。倍频后 583 nm 激光输出总功率约为 600 mW 。其中, 80 mW 用于获得碘分子超精细分量的 MTS 以及光梳拍频测量,其余主要用于超冷铷原子实验系统。经 78 MHz 声光频移器双次 $+1$ 级移频后作为磁光阱冷却光,冷却光相对于铷原子的跃迁频率负失谐 7 MHz (37 倍自然线宽)。

碘分子超精细分裂谱线 a_1 与 ^{166}Er 的 $4f^{12}6s^2(^3H_6) \rightarrow 4f^{12}(^3H_6)6s6p(^3P_1)$ 共振跃迁谱线频率相差约 1.55 GHz ,因此,用 AOM 1 对 583 nm 激光进行四次移频。 583 nm 激光透过 PBS 后由 D 形反射镜导入 AOM 1 产生的 $+1$ 级衍射光 ($+f$) 透过光阑 2 后经透镜 2 会聚为平行光,再由反射型棱镜反射得到与 $+f$ 在空间中上下平行的反射光,经透镜 2 会聚到 AOM 晶体中心再次发生衍射,第二次产生的 $+1$ 级衍射光 ($+2f$) 透过光阑 1 后再经透镜 1 会聚为平行光束,从 D 形反射镜上方通过。经反射镜反射后原路返回,实现第三次、第四次通过 AOM。由于 $+2f$ 激光穿过四分之一波片两次,完成了 P 偏振向 S 偏振的转变,最终经 PBS 反射,实现四次 $+1$ 级频移,该过程可参照文献[40]完成。AOM 的驱动频率为 418.7 MHz ,经四次 $+1$ 移频后,大部分功率用于碘分子 MTS 装置中, 2 mW 用于和光梳拍频监测激光频率。进入碘分子 MTS 装置的激光由一个厚玻璃片前后表面反射分别作为平衡零拍探测器的探测光和参考光,透射光依次进入 AOM 2 及 EOM 2 作为泵浦光(气室前功率约 4.6 mW),探测光(气室前功率约 0.2 mW)与泵浦光反向共轴通过 300 mm 的碘分子气室。

实验中采用折叠光路,构成了相当于 2 倍碘分子气室长度的碘分子吸收长度,因此在 300 mm 长的碘分子气室中得到了 600 mm 的实际吸收长度,以提高吸收信号强度。原则上可通过折叠光路实现 4 倍吸收长度[32],但光多次穿过碘分子气室两端无增透膜的窗片时会产生非常严重的杂散射光,对探测结果产生很大的影响。综合考虑后,只采用了上下折叠光路,并在光路中增加一个 PBS 以增加消光比。温度的起伏会影响碘分子气室饱和蒸汽压,导致谱线偏移。为消除该影响,将碘分子气室的温度设定为 $18.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ (控温精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)。为获得调制转移光谱,泵浦光被 EOM 2 调制,调制频率为 440 kHz 。同时,为了抑制剩余幅度调制[41],将 EOM 2 的温度控制在 $22.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ (控温精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)。泵浦光在碘分子气室中与探测光反向重合,产生四波混频效应,参考光与探测光平行进入碘分

子气室,但不与泵浦光作用,采用平衡零拍探测器进行差拍探测[42],得到中心频率与一阶边带的拍频信号,其交流成分送至混频器(Mixer)进行相敏检波。经 Mixer 解调后的鉴频信号幅度较低,淹没在噪声中,因此用 5.1 kHz 的 TTL 信号控制 AOM 2 的 80 MHz 射频信号作为斩波器进行二次调制,再由锁相放大器(SR 830)提取鉴频信号。通过优化锁相放大器的积分时间和灵敏度可得到高信噪比的鉴频信号。EOM 2 引入的调制频率远低于 AOM 2 的工作频率,因此强泵浦光被频移 80 MHz 可起到光隔离作用[36]。经上述移频操作后,碘分子超精细分裂谱线 a_1 与 ^{166}Er 的共振跃迁谱线间的频率差为 $(418.7\text{ MHz} \times 4 + 40\text{ MHz}) - (78\text{ MHz} \times 2 + 7\text{ MHz}) \approx 1.55\text{ GHz}$ 。其中, 7 MHz 为 MOT 俘获光相对于共振光的负失谐。

利用 MTS 光谱技术获得了 21 条碘分子 R67(15-1) 跃迁的超精细分裂谱线,如图 3 所示。选取第一个超精细分量 a_1 作为碘分子 MTS 系统中 583 nm 激光的频率参考。室温下碘分子 a_1 谱线的线宽为 1.6 MHz 。在前级反馈 PDH 稳频基础上,通过扫描 AOM 1 射频信号的频率,可直接在示波器上观测 R67(15-1) 超精细分量的 MTS。逐渐减小 AOM 1 引入的射频信号扫描范围并适当调节中心频率,使激光频率在所选频率标准附近。当 AOM 1 引入射频信号的扫描范围减小到 0 时,将锁相放大器输出激光频率的误差信号经 PID 电路反馈给 EOM1 射频源的 FM 端口,实现双系统的闭环锁定。

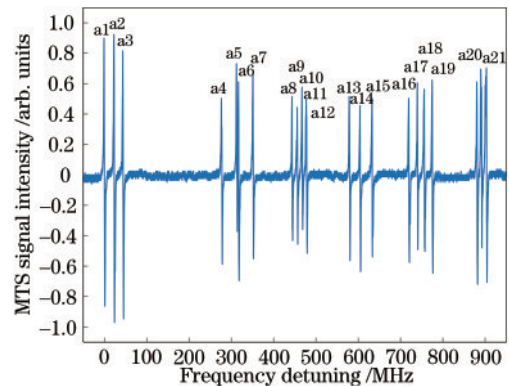


图 3 碘分子 R67(15-1) 跃迁的超精细分量的 MTS
Fig. 3 MTS of the hyperfine components at R67(15-1) transition of the iodine molecule

双系统闭环锁定后将激光与光梳超稳激光进行拍频,拍频信号由频率计数器进行长期监测,结果如图 4 所示。可以发现:采用单一 PDH 稳频时, 583 nm 激光长期漂移的速度约为 51 kHz/h ; 经二次反馈后, 583 nm 激光经 4 h 的长期漂移量几乎为 0, 频率起伏峰值为 $\pm 12\text{ kHz}$, 大大改善了系统的长期稳定性, 可实现超冷铷原子实验系统的长时间连续运转。

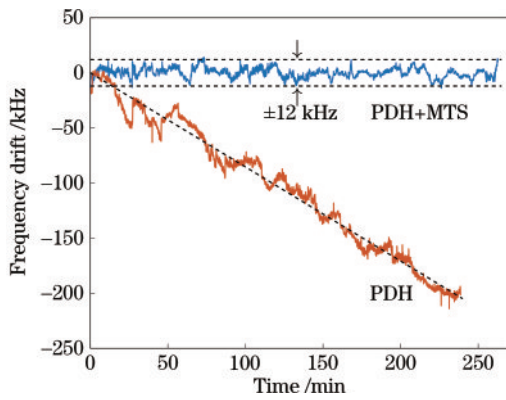


图4 采用PDH与双系统(PDH+MTS)稳频的频率漂移对比
Fig. 4 Comparison of frequency drift using PDH frequency stabilization and two-stage feedback (PDH+MTS)

4 结 论

超冷铷原子实验的冷却光为窄线宽跃迁,自然线宽为 190 kHz,对激光稳频要求高。激光器频率的抖动和漂移直接影响 MOT 俘获的原子数以及后续转移至偶极阱的转移效率,导致蒸发冷却后玻色-爱因斯坦凝聚数目起伏。结合光学参考腔 PDH 稳频技术和碘分子 MTS 稳频技术进行双系统锁定。隔振控温并置于真空中的光学参考腔(线宽为 220 kHz)可以保证 PDH 稳频所具有的短期稳定性,碘分子 R67(15-1)跃迁的超精细分量的 MTS 的线宽为 1.6 MHz,利用其为二级反馈纠正长期漂移。4 h 的监测结果表明:采用单一 PDH 稳频后,激光器的长期漂移为 205 kHz,平均漂移为 51 kHz/h;而采用双系统反馈后,激光器的长期漂移几乎为 0,频率起伏小于 ± 12 kHz,满足超冷原子实验长时间运作需求。本方案除了用在铷原子 583 nm 冷却光稳频,还可用于另一潜在冷却波长 631 nm 的激光稳频^[5]并将其拓展到其他元素窄线宽跃迁的冷却光稳频,如镧系元素 Eu^[43]、Tm^[44]。

参 考 文 献

[1] Norcia M A, Ferlaino F. Developments in atomic control using ultracold magnetic lanthanides[J]. *Nature Physics*, 2021, 17(12): 1349-1357.
[2] Schmitt M, Wenzel M, Böttcher F, et al. Self-bound droplets of a dilute magnetic quantum liquid[J]. *Nature*, 2016, 539(7628): 259-262.
[3] Chomaz L, Baier S, Petter D, et al. Quantum-fluctuation-driven crossover from a dilute Bose-Einstein condensate to a macrodroplet in a dipolar quantum fluid [J]. *Physical Review X*, 2016, 6(4): 041039.
[4] Norcia M A, Politi C, Klaus L, et al. Two-dimensional supersolidity in a dipolar quantum gas[J]. *Nature*, 2021, 596(7872): 357-361.
[5] Ban H Y, Jacka M, Hanssen J L, et al. Laser cooling transitions in atomic erbium[J]. *Optics Express*, 2005, 13(8): 3185-3195.

[6] Berglund A J, Lee S A, McClelland J J. Sub-Doppler laser cooling and magnetic trapping of erbium[J]. *Physical Review A*, 2007, 76(5): 053418.
[7] Aikawa K, Frisch A, Mark M, et al. Bose-Einstein condensation of erbium[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(21): 210401.
[8] Ulitzsch J, Babik D, Roell R, et al. Bose-Einstein condensation of erbium atoms in a quasielectrostatic optical dipole trap[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(4): 043614.
[9] Phelps G A, Hébert A, Krahn A, et al. Sub-second production of a quantum degenerate gas[EB/OL]. (2020-07-21)[2021-04-05]. <https://arxiv.org/abs/2007.10807>.
[10] Seo B, Chen P, Chen Z T, et al. Efficient production of a narrow-line erbium magneto-optical trap with two-stage slowing[J]. *Physical Review A*, 2020, 102(1): 013319.
[11] Frisch A. Dipolar quantum gases of erbium[D]. Innsbruck: University of Innsbruck, 2014: 11-17.
[12] 孟腾飞, 武跃龙, 姬中华, 等. 铯分子饱和吸收谱的半导体激光器稳频[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1182-1185.
Meng T F, Wu Y L, Ji Z H, et al. Frequency stabilized diode laser based on cesium molecular saturated absorption spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1182-1185.
[13] 王杰, 高静, 杨保东, 等. 铷原子饱和吸收光谱与偏振光谱对 780 nm 半导体激光器稳频的比较[J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 305-312.
Wang J, Gao J, Yang B D, et al. Comparison of frequency locking of 780 nm diode laser via rubidium saturated absorption and polarization spectroscopies[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(3): 305-312.
[14] Nakagawa K, Sato Y, Musha M, et al. Modulation-free acetylene-stabilized lasers at 1542 nm using modulation transfer spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(4/5): 479-482.
[15] 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.
[16] 洪毅, 侯霞, 陈迪俊, 等. 基于 Rb⁸⁷ 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 Rb⁸⁷[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2101003.
[17] Forest D H, Powis R A, Cochrane E C A, et al. High resolution laser spectroscopy of naturally occurring ruthenium isotopes[J]. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2014, 41(2): 025106.
[18] Dinklage A, Lokajczyk T, Kunze H J, et al. *In situ* density measurement for a thermal lithium beam employing diode lasers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69(1): 321-322.
[19] Wang W L, Ye J, Jiang H L, et al. Frequency

- stabilization of a 399-nm laser by modulation transfer spectroscopy in an ytterbium hollow cathode lamp[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(1): 013201.
- [20] Frisch A, Aikawa K, Mark M, et al. Hyperfine structure of laser-cooling transitions in Fermionic erbium-167[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(3): 032508.
- [21] 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.
- [22] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [23] Sansonetti C J. Precise measurements of hyperfine components in the spectrum of molecular iodine[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, 14(8): 1913-1920.
- [24] Sun D L, Zhou C, Zhou L, et al. Modulation transfer spectroscopy in a lithium atomic vapor cell[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10649-10662.
- [25] Zhang J, Wei D, Xie C D, et al. Characteristics of absorption and dispersion for rubidium D_2 lines with the modulation transfer spectrum[J]. *Optics Express*, 2003, 11(11): 1338-1344.
- [26] Noh H R, Park S E. Modulation transfer spectroscopy for D_2 transition line of rubidium[C]//2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEOPR), June 30 - July 4, 2013, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2013.
- [27] Wu B, Zhou Y, Weng K X, et al. Modulation transfer spectroscopy for D_1 transition line of rubidium[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(11): 2705-2710.
- [28] Bertinetto F, Cordiale P, Galzerano G, et al. Frequency stabilization of DBR diode laser against Cs absorption lines at 852 nm using the modulation transfer method[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(2): 490-492.
- [29] Galzerano G, Bertinetto F, Bava E. Characterization of the modulation transfer spectroscopy method by means of He-Ne lasers and $^{127}\text{I}_2$ absorption lines at $\lambda=612$ nm[J]. *Metrologia*, 2000, 37: 149-154.
- [30] Eickhoff M L, Hall J L. Optical frequency standard at 532 nm[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44(2): 155-158.
- [31] 臧二军, 曹建平, 李焯, 等. 532 nm 碘分子光频标[J]. *中国激光*, 2007, 34(2): 203-208.
Zang E J, Cao J P, Li Y, et al. 532 nm iodine molecular optical frequency standards[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(2): 203-208.
- [32] Zang E J, Cao J P, Li Y, et al. Realization of four-pass I_2 absorption cell in 532-nm optical frequency standard[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(2): 673-676.
- [33] 钱进, 刘忠有, 张小平, 等. 一种新型的碘稳定 633 nm He-Ne 激光系统[J]. *计量学报*, 2008, 29(1): 10-13.
Qian J, Liu Z Y, Zhang X P, et al. A new type of iodine-stabilized He-Ne laser at 633 nm[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(1): 10-13.
- [34] Huang Y C, Guan Y C, Suen T H, et al. Absolute frequency measurement of molecular iodine hyperfine transitions at 647 nm[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2102-2106.
- [35] 刘涛, 闫树斌, 李利平, 等. 铯原子调制转移光谱在激光稳频中的应用[J]. *光子学报*, 2003, 32(1): 5-8.
Liu T, Yan S B, Li L P, et al. Frequency stabilization of laser diode via modulation transfer spectrum in cesium vapor cell[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(1): 5-8.
- [36] 刘涛, 李利平, 闫树斌, 等. 铯原子 D_2 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 S B, et al. Experimental investigation of modulation transfer spectrum of cesium D_2 line[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(9): 791-794.
- [37] Xu Z Y, Peng X X, Li L H, et al. Modulation transfer spectroscopy for frequency stabilization of 852 nm DBR diode lasers[J]. *Laser Physics*, 2020, 30(2): 025701.
- [38] Gatti D, Gotti R, Sala T, et al. Wide-bandwidth Pound-Drever-Hall locking through a single-sideband modulator[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5176-5179.
- [39] Thorpe J I, Numata K, Livas J. Laser frequency stabilization and control through offset sideband locking to optical cavities[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15980-15990.
- [40] Lu B, Wang D J. Note: a four-pass acousto-optic modulator system for laser cooling of sodium atoms[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(7): 076105.
- [41] Duong Q A, Nguyen T D, Vu T T, et al. Suppression of residual amplitude modulation appeared in commercial electro-optic modulator to improve iodine-frequency-stabilized laser diode using frequency modulation spectroscopy[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2018, 14: 25.
- [42] Lu Q M, Shen Q, Cao Y, et al. Ultra-low-noise balanced detectors for optical time-domain measurements[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(7): 1048-1055.
- [43] Inoue R, Miyazawa Y, Kozuma M. Magneto-optical trapping of optically pumped metastable europium[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(6): 061607.
- [44] Sukachev D, Sokolov A, Chebakov K, et al. Magneto-optical trap for thulium atoms[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(1): 011405.