

基于PDH技术的光学传递腔的锁定

郑公爵 戴大鹏 方银飞 李兴佳 杜向丽 尹燕宁 张 慧 杨秀秀 夏 勇 印建平

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 要实现分子激光冷却, 一般需要多束频率稳定的窄线宽激光。提出采用 Pound-Drever-Hall (PDH) 技术将冷却激光通过光学传递腔的方法锁定到铷原子饱和吸收稳频的半导体激光上, 从而实现冷却激光线宽压窄和频率长时稳定的实验方案。设计并制作了法布里-珀罗 (F-P) 光学腔, 建立了光学稳频系统, 实现了光学腔到参考光源的锁定。

关键词 分子激光冷却; 激光稳频; PDH 技术; 光学传递腔

中图分类号 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.121401

Locking of Optical Transfer Cavity Based on PDH Technique

Zheng Gongjue Dai Dapeng Fang Yinfei Li Xingjia Du Xiangli Yin Yanning

Zhang Hui Yang Xiuxiu Xia Yong Yin Jianping

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract The experiment of laser cooling of molecules generally needs multiple lasers with narrow linewidth and passive-stabilized frequency. We propose to use Pound-Drever-Hall (PDH) technique to lock the cooling laser onto the diode laser stabilized by the saturated absorption spectroscopy of Rb atom through the transfer optical cavity. The linewidth and long term drift of the cooling laser frequency could be controlled. The Fabry-Parot (F-P) optical cavity is designed and made, and the optical stabilization system is set up, and the optical transfer cavity is locked onto the reference laser through PDH technique.

Key words laser cooling of molecule; laser frequency stabilization; PDH technique; optical transfer cavity

OCIS codes 140.3425; 020.3320; 050.2230; 250.5960

1 引言

冷分子和超冷分子的实验制备与研究是原子、分子和光物理研究领域中的前沿热点之一, 同时也是一个包含物理、化学、量子信息、凝聚态物理和天文物理的跨学科交叉研究课题。冷分子在精密测量、冷分子光谱学、超冷碰撞和冷化学、多体量子系统、量子信息处理和分子干涉仪等领域有广阔的研究前景^[1-4]。激光冷却分子是获得冷分子乃至超冷分子的重要途径之一, 但是, 由于分子中存在振动与转动自由度, 因而分子的激光冷却实现起来要比原子困难得多。尽管如此, 分子的激光冷却已经被证实是可行的^[5], 也是近5年来国际上在实验中产生冷分子方面取得的重要进展之一。

分子激光冷却的主要原理是, 在一些特殊的双原子自由基分子的电子基态的振转能级和第一激发态的振转能级之间存在一个接近闭合的能级系统, 类似于冷原子的闭合能级结构, 因此就有希望利用这样一个特殊的结构来实现分子的激光冷却。由于目前适合做激光冷却实验的分子种类主要集中在自由基分子方面, 比如 SrF^[6]、YO^[6]、CaF^[7] 分子等, 这些分子近似闭合的能级结构所处的光波段不能通过饱和吸收光谱来实现激光稳频。目前实验上采用的稳频方式主要有2种, 一种是采用光学传递腔的方法^[6-7], 另一种是采用光学频率梳的方法^[8], 通过传递介质把冷却激光锁定到稳定的参考频率源上。2010年, DeMille小组在实验上实

收稿日期: 2014-07-02; 收到修改稿日期: 2014-07-10; 网络出版日期: 2014-11-12

基金项目: 国家973计划(2011CB921602, 2006CB921604)、国家自然科学基金(11374100, 10804031, 10674047, 10904037, 10904060, 10974055, 11034002, 61205198)、上海市自然科学基金(13ZR1412800)

作者简介: 郑公爵(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事分子激光冷却方面的研究。E-mail: gongjue.zheng@gmail.com

导师简介: 夏 勇(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事分子激光冷却方面的研究。

E-mail: yxia@phy.ecnu.edu.cn(通信联系人)

现了氟化铯(SrF)的一维横向速度的多普勒冷却与Sisyphus冷却。实验上观测到了分子束横向方向上的多普勒冷却(5 mK)和Sisyphus冷却(300 μ K)效应^[6],并实现了自发辐射力对分子束纵向速度的减速(从140 m/s减至50 m/s)^[6]。该实验中,冷却激光的波长分别为663.3、686.0、685.4 nm。系统主要由外延腔可调谐半导体激光器(ECDL)、注入锁定和光学锥形放大器(TA)组成,包括11台主激光、7台从激光和3台TA。该实验采用了扫描光学传递腔的方式以实现激光频率的稳定^[9-11]。稳频的He-Ne激光器作为系统的绝对频率参考,带压电陶瓷(PZT)的法布里-珀罗腔(F-P腔)作为传递腔,将频率稳定的He-Ne激光器的频率稳定性传递给ECDLs。2013年,美国Jun Ye小组在实验上验证了氧化钇(YO)分子束的1D和2D横向激光冷却和磁光囚禁,初始分子束的横向温度为25 mK,经多普勒冷却之后,分子束横向温度为5 mK,经2D MOT冷却的最低温度约2 mK。实验中冷却激光为染料激光器,冷却激光波长为614 nm。再抽运激光为648 nm和649 nm,都为半导体激光器。实验中将这些激光锁定到拍频的掺铒光纤光梳上^[6]。华东师范大学印建平小组也在开展MgF分子的激光冷却的实验研究。所需激光波长分别为359.3、368.6、368.1 nm。目前,本小组有一台德国Sirah公司Matisse连续染料激光器,能够输出718.6 nm的激光,倍频之后可以作为冷却激光。

为确保该染料激光频率长时稳定性,本文提出利用基于PDH技术的光学传递腔来实现激光频率的稳定并控制其长时漂移。该方法的原理是:1)将光学腔锁定在一个稳定的频率参考源上,实现腔的稳定;2)将所需稳频的激光锁定在该光学腔上,从而实现参考频率源的稳定度向冷却激光频率稳定度的传递。由于采用PDH技术,故系统响应比采用扫描传递腔方式的稳频系统更快。实验中所用的参考频率源为一束780 nm的外延腔半导体激光,该激光通过饱和吸收稳频技术锁定在铷原子D2线上。MgF分子的冷却激光的稳频工作主要包括两部分:1)把光学传递腔锁定到稳定的频率源上;2)把商用染料激光锁定到该光学传递腔上。本实验已经完成了第1)部分。

2 光学传递腔的结构与设计

一般来说,PDH稳频技术中常用的腔为F-P腔。本文设计的腔体结构由平面镜与凹面镜(曲率半径 $r=500$ mm)组成平凹腔,两片镜子的直径均为20 mm,且镜子两面一面镀增透膜,另一面镀高反膜,增透膜反射率小于3%,高反膜反射率 R 为99.25%。由于该腔作为传递腔,与多波长共振,因此所镀的膜需要在718.6 nm与780 nm处均保持高反。实验中,采用PDH方法将F-P腔锁定在参考光源上,故要求F-P腔的腔长可以调节,且精度在纳米量级。因此,设计中加入一个PZT套管来实现腔长的调节。腔体材料上,由于殷钢的热膨胀系数很小(1.4×10^{-6} / $^{\circ}$ C),因此采用殷钢作为支撑腔体。结构上,PZT套管的一端黏贴在殷钢腔体上,另一端通过真空胶与凹面镜相连,通过在PZT上加电压可以实现腔长的调节。平面镜则首先黏贴在一个殷钢制成的转接套管内,再通过转接套管黏贴在腔体上。黏贴时,在镜边涂低膨胀真空胶与转接套嵌合,以避免真空胶膨胀的影响。此外,为了避免光学平台震动对F-P腔产生的影响,通过六个螺丝以点接触的方式将光学腔内腔安装在外腔中,外腔与底座之间则垫上2 mm厚的铁氟龙橡胶进行隔振。

3 稳频光路的搭建与光学腔参数的测定

依据PDH稳频的基本原理以及模式匹配的计算结果,就可确定各元件的位置,并进行光路的搭建。搭建的实验装置原理图如图1所示。

图1中,光路可以分为两部分,虚线框中的部分主要将F-P腔锁定在780 nm外延腔稳频激光上,实现F-P腔的稳定;虚线框外的部分则是将染料激光(718.6 nm)锁定在F-P腔上,实现染料激光频率的锁定。图中LENS为透镜;M为反射镜;1/4 λ plate为1/4波片;PBS为偏振分束器;EOM为电光调制器;phase shifter为移相器;mixer为混频器;amp为电压放大器;BPF为带通滤波器;isolator为光隔离器;HWP为半波片;PD为光探测器;LPF为环路滤波器;PI为比例积分控制器;dichroic mirror为二向色镜;OSC为示波器;AOM为声光调制器。本实验完成了虚线框中的内容。其中,AOM0的主要作用是对染料激光的频率进行调谐,以便使激光频率能够与锁定的F-P腔共振;M1、M2、M3、M4为耦合反射镜,以调整入射光与F-P腔中的耦合效率;此外,当光与二向色镜成45 $^{\circ}$ 入射时,660~731 nm的光透射,750~810 nm的光反射,从而将两束光均耦合到F-P腔内。

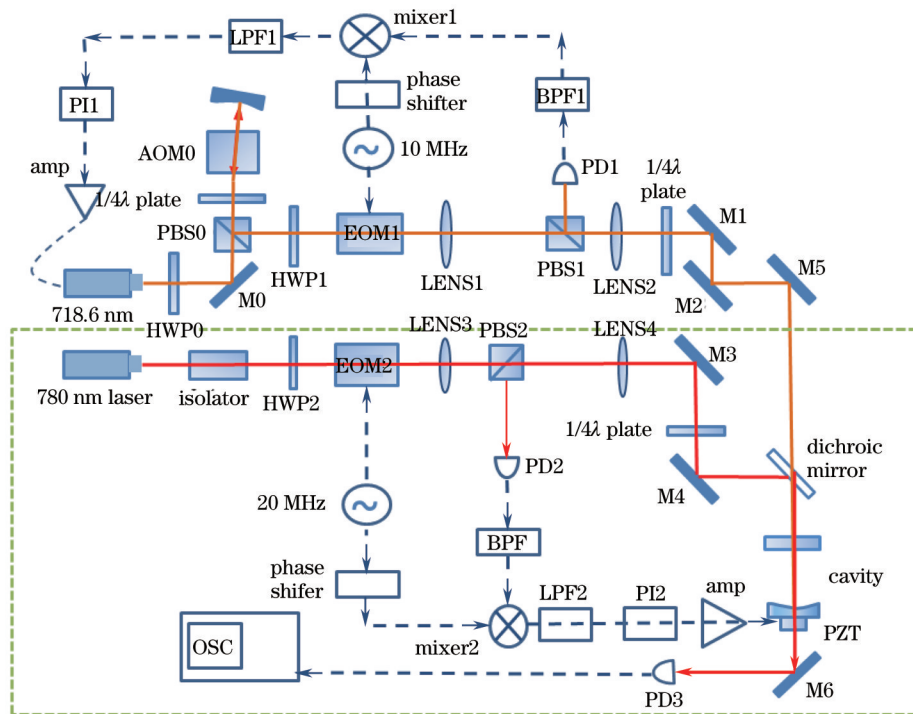


图1 传递腔稳频实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of passing frequency stabilization cavity

在放置光学元件时,应严格按照理论计算出的模式匹配透镜与F-P腔间的距离放置模式匹配透镜,并使匹配透镜同轴、平行。选用焦距分别为150 mm和100 mm的双凸透镜作为模式匹配透镜。在F-P腔加上三角波扫描电压,对F-P腔进行扫描,并利用示波器观察F-P腔的透射谱线。在调整好模式匹配透镜与耦合反射镜使透射峰达到最大后,将只有基模在F-P腔内共振,透射峰值比较稳定,而高阶模将被有效地抑制。给压电陶瓷加上合适的扫描电压,可以测量出腔的一个自由光谱程。利用780 nm激光测量的腔的自由光谱程结果如图2所示。对于该腔而言,一个自由光谱程对应电压为175 V。而一个自由光谱程对应于半个波长,因此对780 nm光而言,对应于390 nm。故压电陶瓷的压电系数为2.23 nm/V。同时,由于175 V对应于一个自由光谱程1144 MHz,故1 V的驱动电压对应的频率行程应为6.53 MHz/V。故若需将腔的频率抖动控制小于1 MHz,则PZT的反馈电压精度应该小于0.15 V。

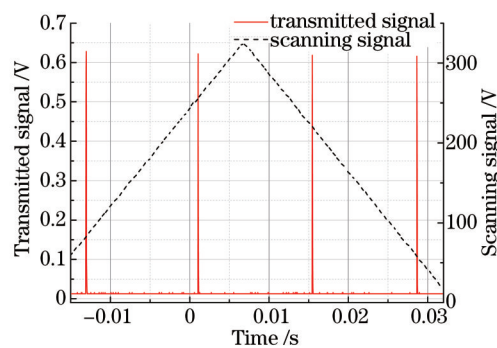


图2 F-P腔自由光谱程的测量结果

Fig.2 Measurement results of free spectral range of F-P cavity

实验上,采用激光相位调制法来测定F-P腔的精细度^[12]。采用了一个谐振频率为20 MHz的电光相位调制器对入射光进行相位调制,并以三角波驱动PZT进行线性扫描,并利用光电探测器探测透射光,获得了F-P腔的共振透射谱线。F-P腔的基本参数如表1所示。

表1 自制F-P光学腔的基本参数

Table 1 Basic parameters of F-P optical cavity

Parameter	Value
Cavity length L /mm	131
Free spectral range f_{FSR} /MHz	1144
Reflectivity R /%	99.25 ± 0.25
Finesse F	450
Cavity linewidth $\Delta\nu_c$ /MHz	2.35

4 光学腔的锁定

在调整好光学模式匹配以及将激光与腔的耦合效率调到最佳之后,可以通过图1中的PD2获取780 nm激光与F-P腔相互作用的色散谱线,再经过混频、低通滤波后,可以得到鉴频曲线(误差信号),如图3所示。C1为光电探测器PD2直流路的输出信号,对反射光的功率进行检测,C2为PD2的交流路输出信号^[13];C3为经混频、低通滤波后,得出的鉴频曲线。由于色散信号在中心共振频率处幅值为0且为奇对称,斜率也很大,因此适于做鉴频信号。



图3 实验测得的780 nm光与F-P腔作用的色散型误差谱线

Fig.3 Measured dispersion error of interaction of laser with 780 nm wavelength and F-P optical cavity

在获得色散型误差信号后,就可以进行F-P腔的锁定。首先,逐渐减小F-P腔的扫描电压,并调整PZT的直流偏置电压,使误差信号始终处于扫描电压的中心处。在扫描电压减少到误差信号只有中心斜边时,可观察到激光与腔的共振。此时,将获得的误差信号送入PI积分控制器进行处理后送入压电陶瓷驱动源中进行反馈,最后仔细调节伺服系统的各项参数,实现F-P腔的锁定。锁定后的误差信号与透射光谱信号分别如图4与图5所示。

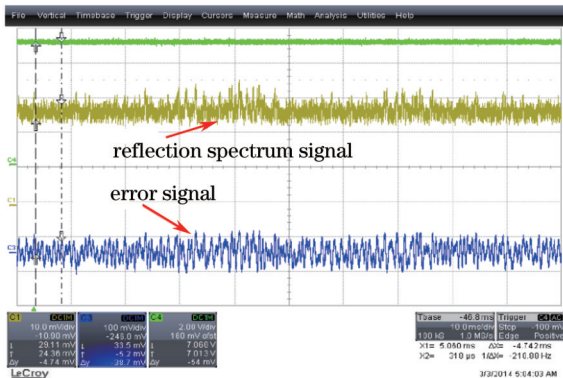


图4 F-P腔锁定后的误差信号,监测带宽30 kHz
Fig.4 Error signal of locked F-P optical cavity with 30 kHz bandwidth

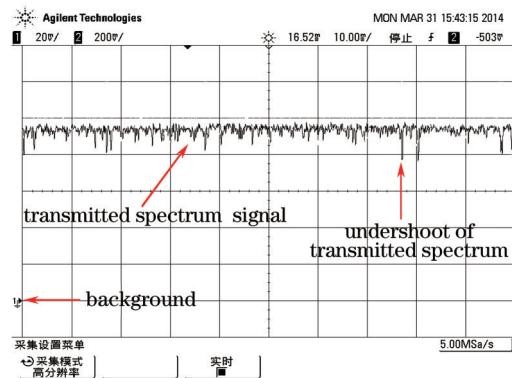


图5 F-P腔锁定后的透射光谱信号
Fig.5 Transmitted spectra signal of locked F-P optical cavity

由图4与图5可知,腔锁定后,反射光谱信号、透射光谱信号均近似为一条直线,误差信号则在零点附近振荡。图5中,透射光谱信号上存在一定的下冲,这是由于当激光的线宽与腔的线宽可比拟时,腔的透射光谱信号将反映激光线宽内的功率抖动与频率波动。由于PZT压电陶瓷的机械频率响应在千赫兹量级甚至

更低,若激光的频率短时漂移速率很快,则压电陶瓷有可能会跟不上激光的频漂,从而导致信号的下冲。实验中,该系统锁定时长约4 h,锁定时间与PI参数调节以及误差信号线型有关。

5 结 论

提出了基于PDH技术的光学传递腔的激光稳频的方案,并开展实验研究,实现了把光学传递腔锁定到稳定的频率源上。使用激光相位调制法估算并测量了F-P光学腔的各项参数。其中,自由光谱程为1144 MHz,精细度约为450,腔的线宽约为2.35 MHz。利用PDH技术,测得了色散型光谱误差信号,并将设计的F-P光学腔锁定在了稳频的780 nm激光上,实现了光学腔的锁定。下一步可以对光学腔进行精密恒温控制,同时进行真空隔离,以便排除温度波动与空气振动对光学腔的影响,从而增强腔的稳定性,进而增强系统的稳定性。采取一定的措施,减小电光相位调制器的剩余幅度调制,从而增强系统的稳定性并提高锁定精度。

参 考 文 献

- 1 J Doyle, B Friedrich, R V Krems, *et al.*. Special issue, "ultracold polar molecules: formation and collisions"[J]. *Eur Phys J D*, 2004, 31: 149.
- 2 L D Carr, D DeMille, R V Krems, *et al.*. Cold and ultracold molecules: science, technology and applications[J]. *New J Phys*, 2009, 11(5): 055049.
- 3 R V Krems, W C Stwalley, B Friedrich, *et al.*. Cold molecules: theory, experiment, applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- 4 D S Jin, J Ye. Introduction to ultracold molecules: New frontiers in quantum and chemical physics[J]. *Chem Rev*, 2012, 112(9): 4801-4802.
- 5 E S Shuman, J F Barry, D DeMille. Laser cooling of a diatomic molecule[J]. *Nature*, 2010, 467(7317): 820-823.
- 6 M T Hummon, M Yeo, B K Stuhl, *et al.*. 2D magneto-optical trapping of diatomic molecules[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110(14): 143001.
- 7 V Zhelyazkova, A Cournol, T E Wall, *et al.*. Laser cooling and slowing of CaF molecules[J]. *Phys Rev A*, 2014, 89(5): 053416.
- 8 J F Barry, E S Shuman, E B Norrgard, *et al.*. Laser radiation pressure slowing of a molecular beam[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108(10): 103002.
- 9 Eberhard Riedle, S H Ashworth, J T Farrell Jr, *et al.*. Stabilization and precise calibration of a continuous-wave difference frequency spectrometer by use of a simple transfer cavity[J]. *Rev Sci Instrum*, 1994, 65(1): 42-48.
- 10 W Z Zhao, J E Simsarian, LA Orozco, *et al.*. A computer-based digital feedback control of frequency drift of multiple lasers[J]. *Rev Sci Instrum*, 1998, 69(11): 3737-3740.
- 11 Qu Wancheng, Huang Yao, Guan Hua, *et al.*. 397 nm semiconductor laser stabilized with scanning transfer cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0802008.
屈万成, 黄 焱, 管 桦, 等. 传输腔稳频的397 nm半导体激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0802008.
- 12 Lu Honggang, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi. Measurement of reflectivity of optical mirrors using laser phase modulation and fineness of Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(12): 1675-1679.
鲁红刚, 蒋燕义, 毕志毅. 激光相位调制法布里-珀罗腔精细度法测定反射率[J]. *中国激光*, 2006, 33(12): 1675-1679.
- 13 Zheng Gongjue, Dai Dapeng, Fang Yinfei, *et al.*. Balanced homodyne detector based on two-stage amplification[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 040401.
郑公爵, 戴大鹏, 方银飞, 等. 具有两级放大的平衡零拍光电探测器[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 040401.