

文章编号:1005-4642(2023)01-0001-09



# 激光锁频实验研究

颜波

(浙江大学物理学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**随着激光技术的发展,激光的频率稳定性越来越好,实际应用对激光频率稳定性的要求也逐渐提高.目前简单的被动稳频技术已不能满足实际应用需求,而主动锁频技术备受关注并得到高速发展.更高的频率稳定度意味着需要更精确的调控,激光锁频技术也成为现代量子技术的重要组成部分.本文介绍了几种常用的激光稳频技术,展现了激光锁频技术的重要发展,例如小型化和自动化、超稳腔锁频和传输腔锁频.

**关键词:**激光锁频;精密调控;激光光谱;超稳腔

**中图分类号:** TN24

**文献标识码:** A

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.01.001

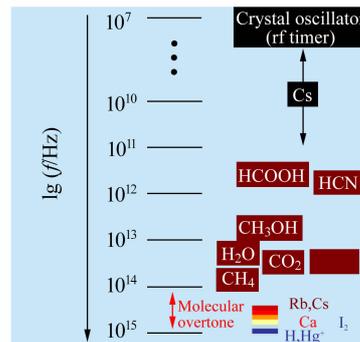
## 1 光的频率测量

光是一种电磁波,其波长  $\lambda$ 、频率  $\nu$  和光速  $c$  满足

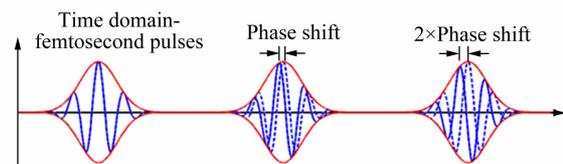
$$c = \lambda\nu, \quad (1)$$

波长和频率是光的 2 个基本参量,其绝对值测量具有重要的科学意义.对于光波长的精确测量,迈克耳孙作出了巨大贡献,其发明的迈克耳孙干涉仪可以精确测量波长.与波长测量相比,直接测量光的频率极其困难,因为光的频率非常高(一般在  $10^2$  THz 量级).采用电子学器件可以测量 GHz 量级的信号,而无法测量  $10^2$  THz 量级的光频率信号.

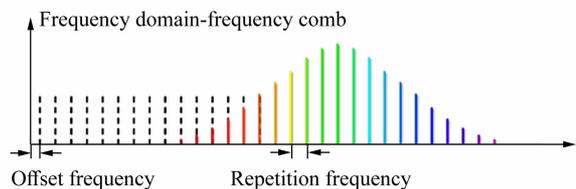
为了实现光速的高精度测定,光的频率高精度测定成为重要需求<sup>[1]</sup>.从 20 世纪 60 年代开始,科学家们实施了“倍频频率链”计划精确测定激光的频率,具体为:通过倍频、拍频将已知的低频信号往上推,不断确定更高频信号的频率值.通过近 20 个振荡器(用原子或分子的跃迁频率来锁定)一级一级推高频率,一直到所需要的光频段,示意图如图 1(a)所示,过程为:找到合适的振荡频率源,锁定到相应的分子跃迁频率上;对这些信号和低频段信号的倍频信号进行拍频来确定准确频率;通过近 20 个中介频率源,最终推高到光频段,标定了几个光频跃迁绝对频率.



(a)“倍频频率链”示意图



(b)时域信号<sup>[2]</sup>



(c)频域信号<sup>[2]</sup>

图 1 激光频率测量技术

收稿日期:2022-11-08;修改日期:2022-11-25

作者简介:颜波(1983—),男,江西南昌人,浙江大学物理学院研究员,博士,研究方向为冷原子物理实验. E-mail: yanbohang@zju.edu.cn

由于每个节点都需要找到合适的光源和原子(或分子)的跃迁谱线来锁定,“倍频频率链”计划非常庞大和复杂,被称为“史诗级”项目。经过 20 多年的努力,美国计量局(NIST)、巴黎天文台和德国联邦物理技术研究院(PTB)完成了测量,将光速的测量精度提高到前所未有的精度,其测量精度已经受限于当时国际单位制中“m”定义的精度。将光速作为常量,1983 年采用光速来定义“m”,并成为新的国际计量标准。

2000 年左右,随着飞秒激光技术的发展和成熟,出现了“光频梳”技术。如图 1(b)和(c)所示,图 1(b)是时域信号,表现出来的是等间隔的飞秒脉冲;图 1(c)是频域信号,是时域信号的傅里叶变换,表现出来的是等间隔的频率梳齿。稳定锁定的飞秒激光在时间域上看是重复的飞秒脉冲,在频率域上看则是等间隔的频率梳齿。由于激光脉宽在 fs 量级,其频率间隔将在 GHz 量级,该频率间隔可采用电子学仪器进行测量。对于任意激光,只需要和频率梳进行拍频,通过拍频信号就可以计算得到光的频率,从而完成绝对频率值的测量<sup>[2]</sup>。光频梳不仅替代了“倍频频率链”,而且简单方便,大大拓展了频率测量范围<sup>[3-4]</sup>,频率梳技术也因此获得了 2005 年诺贝尔物理学奖<sup>[5]</sup>。在上述研究中,为了实现频率的高精度测量,必须要有稳定的激光频率,因此激光锁频极其重要。

## 2 激光锁频

激光频率测量要求激光频率稳定,因此需要对激光进行频率锁定。冷原子物理研究是激光频率测量的重要应用方向,研究人员使用激光对原子进行冷却,由于原子的上能级线宽为 10 MHz 量级,因此需要将激光锁定到 MHz 量级的频率稳定度。另外,原子的光频段跃迁可以用来作为计时标准,特别是光钟的研究对激光频率稳定性提出了极高的要求。这些研究都极大地推进了激光锁频技术的发展。

### 2.1 激光锁频系统

激光锁频系统如图 2 所示。鉴频系统是对激光的频率进行鉴定,一般将激光频率和某个基准频率进行比较。可以和已知频率的激光进行拍频,也可以用原子或者分子的跃迁谱线来标定,还可采用光学腔的共振频率来鉴频,等等。鉴频系统给出激光频率的信息,输出激光频率和目标基

准频率的误差信号;然后通过反馈系统控制激光,将激光频率稳定在目标基准频率上,从而实现激光锁频。反馈系统一般采用通用电路,将获得的误差信号反馈到激光的电流或者压电陶瓷(PZT)等部分来调节激光频率。

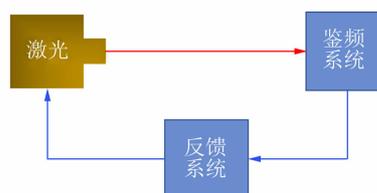


图 2 激光锁频系统示意图

### 2.2 原子光谱法

光频段频率基准中,最常采用原子或者分子的吸收峰。图 3 所示为常用的吸收光谱测量方案。原子气室中物质处于气态,密度很低,可以忽略原子之间碰撞,因此共振谱线非常稳定,可作为频率参考源。对于很多应用,例如激光冷却原子,关注的核心是激光频率相对于原子共振频率的差值,用原子共振频率作为鉴频信号是最佳选择。另一方面,由于气室中的原子存在热运动,会导致多普勒展宽,室温下会有几百 MHz 到 GHz 量级的展宽。这个展宽对于一些锁频应用来说过宽,因此发展亚多普勒光谱技术非常必要。其中著名的解决方案是 T. Hänsch 教授等人于 1971 年提出的饱和吸收法<sup>[6-7]</sup>。

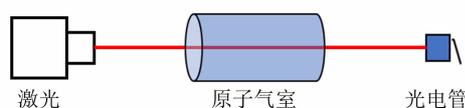


图 3 吸收光谱法示意图

饱和吸收光谱的基本光路如图 4(a)所示,该系统在传统吸收光谱基础上,加上了 1 束对射的强泵浦光。对于最简单的二能级系统,原子跃迁的本征频率为  $\omega_0$ , 2 束激光的频率均为  $\omega_L$ 。没有泵浦光时,得到的是多普勒吸收光谱。加入强泵浦光后,会引入非线性效应,发生烧孔效应。考虑一维情况,取探测光行进方向为正,对于速度为  $v_1$  的原子,当激光频率满足  $\omega_L = \omega_0 - kv_1$  时,原子和泵浦光共振。由于泵浦光很强,使得基态和激发态的布居变得接近(饱和吸收现象),基态原子的布居在速度空间上出现烧孔现象,如图 4(b)

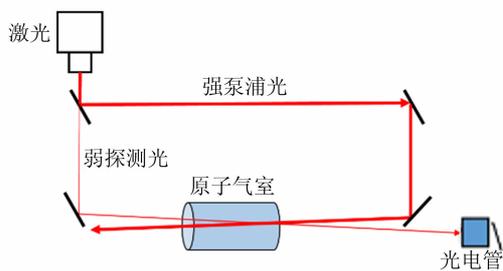
所示,当  $\omega_L \neq \omega_0$  时,这 2 个烧孔的位置不同,相互影响很小. 烧孔的速度为

$$v_1 = (\omega_0 - \omega_L) / k. \quad (2)$$

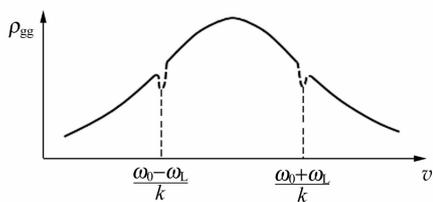
对于弱探测光来说,其具有同样的频率  $\omega_L$ . 与之共振的原子速度  $v_2$  满足

$$v_2 = (\omega_L - \omega_0) / k. \quad (3)$$

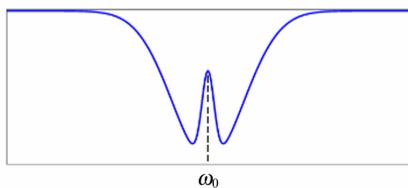
当  $\omega_L \neq \omega_0$  时,  $v_1 \neq v_2$ , 探测光共振的原子和泵浦光烧孔的原子速度区域不同,泵浦光对探测光的作用不大,如图 4(b) 所示,这时探测光的吸收信号和传统吸收光谱一致. 但是当  $\omega_L = \omega_0$  时,探测光共振的原子 ( $v_1 = 0$ ) 刚好是被饱和和泵浦的原子 ( $v_2 = 0$ ). 此时探测光的吸收被抑制,从而在吸收谱线上出现烧孔现象,如图 4(c) 所示,图中大的包络是多普勒展宽的线型,中间凹陷是由于饱和和吸收导致的吸收抑制,称为饱和和吸收效应,其线宽由原子自然线宽和激光功率展宽共同决定,一般远小于多普勒展宽. 饱和吸收光谱法是激光锁频中应用最广泛的鉴频方案.



(a) 饱和吸收光谱测量基本光路图



(b) 探测光和泵浦光的烧孔效应



(c) 饱和和吸收的线型

图 4 饱和吸收光谱法

### 2.3 调制解调法

原子共振频率可以作为很好的参考频率源. 但是对于激光锁频,还需要将其转换成过 0 的误差信号,才可以反馈到激光器控制系统中,以此来稳定频率. 在信号处理领域,采用调制解调法<sup>[8]</sup>可以得到微分信号,使得共振峰刚好过 0,从而给出误差信号. 典型调制解调法的工作原理如图 5 所示.

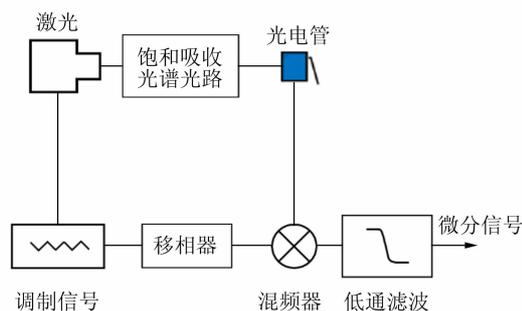


图 5 调制解调方法示意图

假设吸收光谱的线型是  $G(\omega)$ . 通过频率为  $\Omega$  的调制信号(例如加在激光电流上)调制激光,激光频率为

$$\omega' = \omega_0 + A \sin(\Omega t), \quad (4)$$

假设调制信号是微扰,在  $\omega_0$  附近将  $G(\omega)$  做泰勒展开,得到

$$G(\omega') = G(\omega_0) + G'(\omega_0) A \sin(\Omega t) + \frac{1}{2} G''(\omega_0) A^2 \sin^2(\Omega t) + \dots \quad (5)$$

目标是获得微分信号  $G'(\omega_0)$ . 为此,将调制后的信号  $G(\omega')$  与  $\sin(\Omega t)$  相乘,然后采用低通滤波取出直流项,得到

$$\frac{1}{T} \int_0^T G(\omega') \sin(\Omega t) dt = \frac{1}{2} A G'(\omega_0). \quad (6)$$

刚好为微分信号,共振峰处为 0,可作为误差信号来进行稳频.

调制解调方案是经典通讯中常用的手段,但是该方法需要对激光进行调制,而调制往往会带来激光线宽的扩展,难以满足某些对激光线宽要求严格的应用需求. 为了解决该问题,可以采用调制转移方案.

### 2.4 调制转移法

调制转移方案采取在激光器外部进行调制的方法来产生调制信号,然后进行解调获得微分信号<sup>[9-10]</sup>,典型光路图如图 6 所示,与饱和吸收光路

最大的差别在于泵浦光路上增加了电光调制器 (EOM)。由于调制加在泵浦光路上,通过非线性过程转移到吸收光路,因此该方法被称为调制转移法。此时获得的吸收信号是经过调制的,需要进行解调。解调方案和图 5 所示一致,只需要将 EOM 的调制信号作为解调信号,从而获得差分信号。

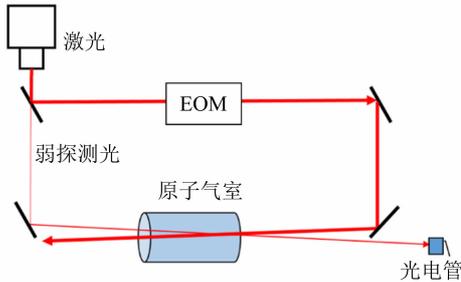


图 6 调制转移的光路图

假设 EOM 的调制频率为  $\omega_m$ , 泵浦光经过调制后, 表示为

$$y(t) = A \cos [\omega_c t + \beta \cos (\omega_m t)] = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \cos [(\omega_c + n\omega_m)t], \quad (7)$$

其中,  $A$  为调制幅度,  $\beta$  为调相指数。利用贝塞尔函数展开后, 看到调制后的载波信号由原先的单一频率  $\omega_c$  转变为以  $\omega_c$  为中心频率、以调制频率  $\omega_m$  为间隔的一系列频率的集合。当  $\beta \ll 1$  时, 保留到一阶项, 得到

$$y(t) = AJ_0(\beta) \cos (\omega_c t) + AJ_{+1}(\beta) \cos [(\omega_c + \omega_m)t] + AJ_{-1}(\beta) \cos [(\omega_c - \omega_m)t]. \quad (8)$$

通过四波混频将泵浦光上的调制转移到探测光上, 通过相位共轭产生探测光的侧边带, 最终对探测信号产生调制。经过解调后, 得到信号<sup>[7]</sup>

$$S(\Omega) = A_0 \cos (\Omega t + \phi) + B_0 \sin (\Omega t + \phi), \quad (9)$$

其中,  $A_0$  为吸收部分信号,  $B_0$  为色散部分信号。选择合适参量, 可以获得过 0 的误差信号, 从而用来反馈获得的激光稳频效果。

调制转移方案使用外置 EOM, 对激光本身不进行调制, 因此不额外引入激光频率展宽。另外, EOM 的调制频率为 10~20 MHz, 高于一般调制解调法所使用的频率 (10 kHz 量级)。该调制频率可以极大地减少低频噪声的影响, 获得信噪比较高的误差信号, 从而获得更好的稳频效果。

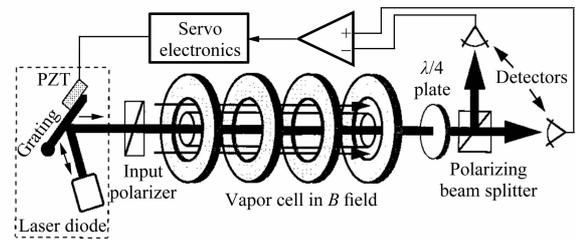
## 2.5 二向色性原子蒸气激光锁频法

美国 JILA 小组在 1998 年提出了二向色性

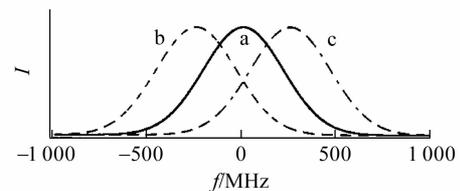
原子蒸气激光锁频方案 (Dichroic-atomic-vapor laser lock, DAVLL)<sup>[11-13]</sup>。该方法使用 2 束光作差来产生差分信号, 非常简单方便, 是锁频实验中常用的方法。

DAVLL 方案利用原子在磁场下塞曼分裂和原子跃迁的偏振选择性, 如图 7(a) 所示, 原子气室处于磁场中。线偏振光经过原子气室, 在纵向磁场下分解为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。由于塞曼效应, 原子能级发生分裂, 由于不同方向的偏振光 ( $\sigma+$ ,  $\sigma-$ ) 对应的磁量子数变化不同, 从而导致磁场下吸收峰将错开。通过 1/4 波片和偏振分束棱镜 (PBS) 将 2 个偏振分量分离并分别探测 [图 7(b) 中信号 b 和 c], 将二者作差可获得误差信号 [图 7(c)], 最终反馈给激光实现闭环锁定。

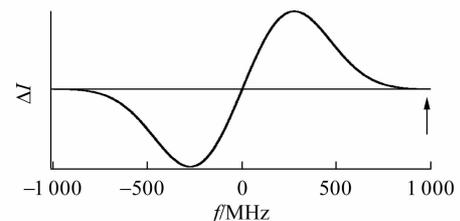
DAVLL 锁频方案结构简单, 可以在较大频率范围内实现频率锁定, 增加了该方案的稳定性。但此方案也存在不足, 其 0 点位置对于光路比较敏感, 锁定点容易发生漂移。



(a) DAVLL 锁频方案示意图



(b) DAVLL 误差信号产生原理图



(c) DAVLL 误差信号作差示意图

图 7 二向色性原子蒸气激光锁频法<sup>[11]</sup>

## 2.6 光学腔 PDH 方法

光学法布里-珀罗微腔 (F-P 腔) 也是常用的鉴频器件. 激光在 F-P 腔内往复反射, 只有满足条件 (腔长  $L$  是半波长的整数倍) 的光才能在 F-P 腔中形成振荡, 存在共振峰, 其共振条件为

$$2L = m\lambda, \quad (10)$$

其中,  $m$  为正整数. 满足该条件的激光频率称为

共振频率. 如果腔比较稳定, 这些共振峰也将非常稳定, 可以作为频率参考源. Pound-Drever-Hall (PDH) 锁频技术是将激光频率锁定到 F-P 腔的共振峰上, 该方法最初由 R. V. Pound 提出, 后经 J. L. Hall 与 R. W. P. Drever 等人发展起来<sup>[14-16]</sup>, 并以 3 位科学家名称缩写命名. 图 8 所示为 PDH 锁频方案示意图.

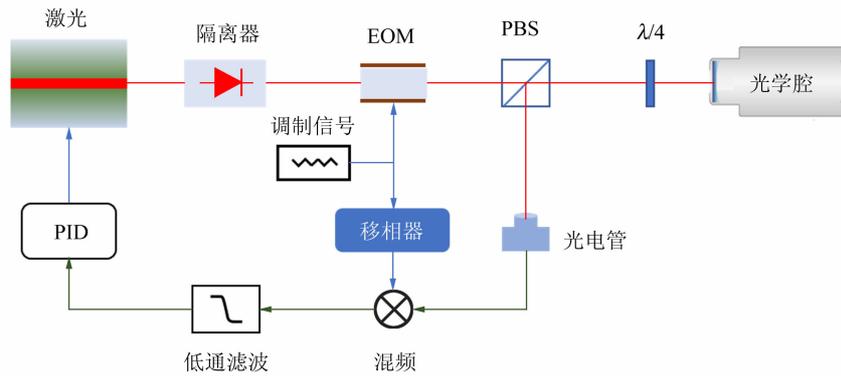


图 8 PDH 锁频方案示意图

当激光频率满足光学腔的共振条件时, 腔的反射输出强度最小, 通过扫描激光频率可以得到共振峰. 为了得到共振时过 0 的误差信号, 同样需要在光路上加 EOM, 通过调制解调获得误差信号.

设入射光的电场为  $E_{\text{inc}} = E_0 \exp(i\omega t)$ , 腔反射光的电场为  $E_{\text{ref}} = E_1 \exp(i\omega t)$ , 则反射系数为

$$F(\omega) = \frac{E_{\text{ref}}}{E_{\text{inc}}} = \frac{r \left[ \exp\left(i \frac{\omega}{\Delta\nu_{\text{fsr}}}\right) - 1 \right]}{1 - r^2 \exp\left(i \frac{\omega}{\Delta\nu_{\text{fsr}}}\right)}, \quad (11)$$

其中,  $r$  为腔内镜子的振幅反射率,  $\Delta\nu_{\text{fsr}} = c/(2L)$

为腔 (长度为  $L$ ) 的自由光谱范围. EOM 用频率为  $\Omega$ 、调相指数为  $\beta$  的信号进行相位调制. 调制后入射光的电场变为

$$E_{\text{inc}} = E_0 \exp\{i[\omega t + \beta \sin(\Omega t)]\}, \quad (12)$$

用贝塞尔函数展开式 (12), 取到一阶项

$$E_{\text{inc}} = E_0 [J_0(\beta) e^{i\omega t} + J_1(\beta) e^{i(\omega+\Omega)t} - J_1(\beta) e^{i(\omega-\Omega)t}], \quad (13)$$

除了载波频率  $\omega$  外, 还有 2 个一阶边带  $\omega \pm \Omega$ . 定义  $P_0 = |E_0|^2$  为入射光总功率, 则载波功率为  $P_c = J_0(\beta)^2 P_0$ , 每个一阶边带功率为  $P_s = J_1(\beta)^2 P_0$ . 则经过腔的反射光电场为

$$E_{\text{ref}} = E_0 [F(\omega) J_0(\beta) e^{i\omega t} + F(\omega + \Omega) J_1(\beta) e^{i(\omega + \Omega)t} - F(\omega - \Omega) J_1(\beta) e^{i(\omega - \Omega)t}], \quad (14)$$

探测器探测到的反射光功率为

$$P_{\text{ref}} = |E_{\text{ref}}|^2 = P_c |F(\omega)|^2 + P_s [ |F(\omega + \Omega)|^2 + |F(\omega - \Omega)|^2 ] + 2 \sqrt{P_c P_s} \{ \text{Re} [ F(\omega) F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega) F(\omega - \Omega) ] \cos(\Omega t) + \text{Im} [ F(\omega) F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega) F(\omega - \Omega) ] \sin(\Omega t) \} + \dots \quad (15)$$

其中,  $\Omega$  为含有载波和边带的拍频,  $2\Omega$  为含有边带间的拍频. 使用前面介绍的混频、低通滤波方法进行解调, 可以检出  $\cos(\Omega t)$  或  $\sin(\Omega t)$  成分的大小, 给出误差信号  $\epsilon$ , 如图 9 所示.

该锁频方案使用电光调制器 (EOM) 对激光

器进行外调制, 不会增加激光线宽. 调制频率较高 (20 MHz 量级), 因此可以较大程度抑制低频噪声的影响. 除此之外, 通过使用 F-P 腔产生高精度的共振频率基准代替前者的饱和吸收峰, 能够更大程度上压窄线宽, 从而实现更高精度的

锁频. 近年来,随着超稳腔的发展,激光被锁定的频率精度达到 mHz 量级<sup>[17]</sup>,也是目前世界上最稳定的激光,适合用来做光钟实验.

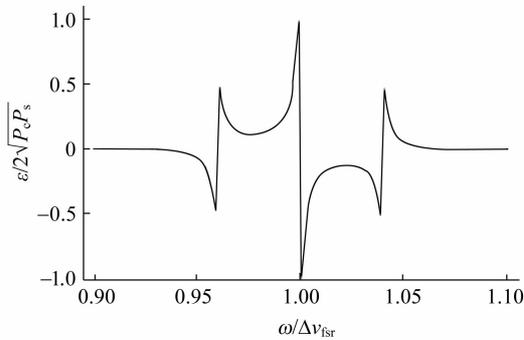


图 9 PDH 方案产生的典型误差信号示意图

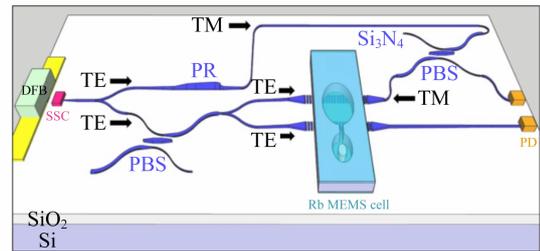
### 3 激光锁频应用及新进展

激光锁频技术在学科发展的带动下,取得了重要进展,也应用到越来越广泛的场景. 这些新场景的应用也为其带来了新的挑战和发展机遇以及新的激光锁频技术出现. 下面简述重要应用和技术发展.

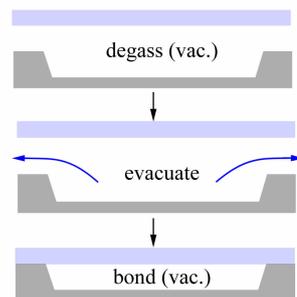
#### 3.1 小型化及自动化

冷原子物理经过 20 多年的发展,已经从基础研究慢慢向应用转变. 冷原子干涉仪、冷原子钟、重力计等都被制成仪器,并进入实用化阶段. 应用阶段对系统的要求各不相同,需要考虑小型化、自动化、稳定性以及性价比等. 对激光锁频模块,研究人员发展出各种小型化方案. 为了使光路紧凑,可以使用集成光子学技术来优化光路<sup>[18]</sup>,降低成本,如图 10(a)所示;为了使系统更加可靠,使用全光纤系统降低振动等影响;为了使鉴频用的原子气室变小,使用刻蚀技术构造小型气室<sup>[19]</sup>,如图 10(b)所示. 激光锁频技术工程化的另一重大牵引来自于空间技术的发展<sup>[20-22]</sup>,图 10(c)所示为上海光机所研制的国际上第 1 台空间冷原子钟样机示意图. 由于空间科学的特殊性,无法像地面实验一样进行各种人工操作和系统调试,因此系统的稳定性极为重要.

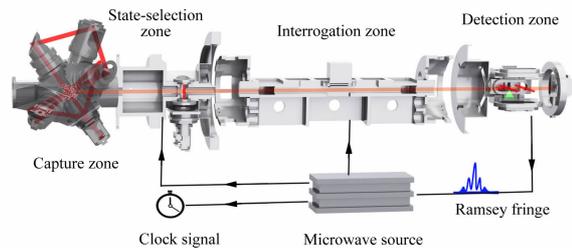
对于激光来说,也必须能够自动锁频. 图 10(d)为冷原子钟的锁频光路图<sup>[23]</sup>,采用了自动锁频技术,可以在极短时间内判断激光的频率锁定情况,并进行自动锁频.



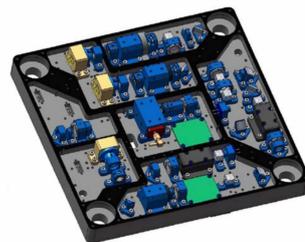
(a) 利用集成光子学技术来小型化<sup>[18]</sup>



(b) 利用刻蚀技术来制作小型化气室<sup>[19]</sup>



(c) 第 1 台空间原子钟样机图<sup>[20]</sup>



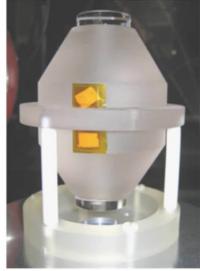
(d) 空间原子钟中的锁频光路示意图<sup>[23]</sup>

图 10 激光锁频技术小型化应用

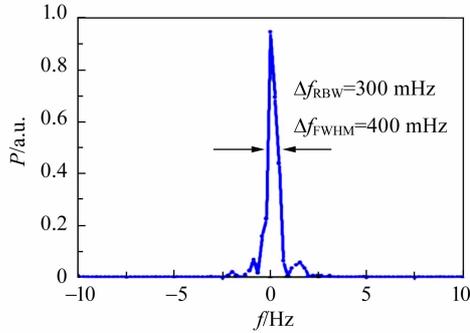
#### 3.2 超稳腔锁频

对激光锁频精度要求最高的领域是光钟的研究<sup>[24-25]</sup>. 光钟使用光频作为时间基准,需要频率稳定性较高的激光,并且激光的线宽越窄,光钟的性能越好. 因此需要将激光锁定到稳定性极高、线宽极窄的频率基准上. 实际上,科学家使用 F-P 腔的共振峰来作为频率基准,如果腔的长度足够稳定,那么其共振峰就是非常稳定的频率基准. 影响腔长最重要的是热效应,热噪声会导致腔长

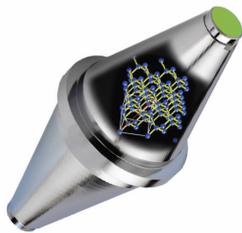
的起伏,进而影响共振峰的稳定性.为此科学家使用超低膨胀系数(ULE)的材料来制作超稳腔,如图 11(a)所示.将激光锁定到 ULE 超稳腔上,可以获得亚赫兹的线宽<sup>[26]</sup>.



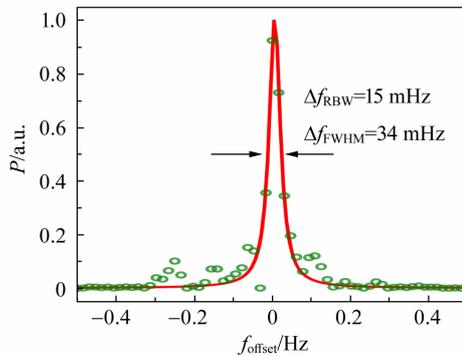
(a) ULE 超稳腔<sup>[26]</sup>



(b) 锁定在 ULE 腔上的激光线宽可以到 300 mHz



(c) 硅单晶超稳腔<sup>[27]</sup>



(d) 低温下锁定在单晶硅腔上的激光线宽达 15 mHz<sup>[17]</sup>

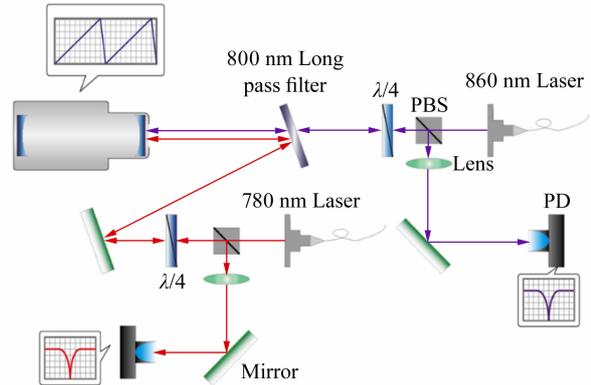
图 11 超稳腔锁频技术

近年来,为了进一步提高腔的稳定性,科学家发展了硅单晶超稳腔<sup>[27]</sup>.单晶硅超强的刚性使其对振动不敏感.在一定温度下,热膨胀系数几乎为 0,大大降低了热噪声的影响.相比于 ULE 超稳腔,单晶硅超稳腔性能提高了 1 个量级,最终将激光锁定到 mHz 量级的稳定度,如图 11(c)和 (d)所示,低温情况下,锁定在单晶硅腔上的激光线宽达到 15 mHz.

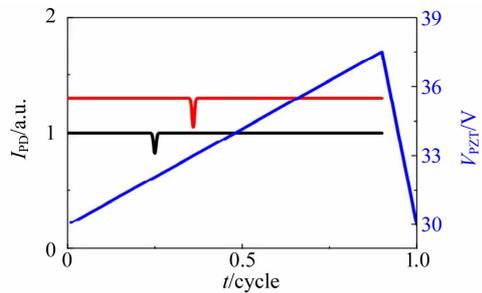
### 3.3 传输腔锁频

在激光冷却原子研究中,激光锁定在原子的吸收谱线上.原子的吸收光谱容易获得,这使得激光锁频非常方便.但是对于其他情况,例如激光冷却分子研究,由于分子的吸收谱线很难获得,因此无法将激光锁定在分子的跃迁谱线上.

图 12 为浙江大学课题组设计的传输腔锁频方案示意图,用于激光冷却分子实验<sup>[28-29]</sup>.



(a) 传输腔锁频方案示意



(b) 反射-频率曲线

图 12 传输腔锁频实验<sup>[28]</sup>

实验中,通过 PZT 对 F-P 腔进行扫描,从而实现扫描共振频率.当腔共振频率和激光频率匹配时,得到凹陷的反射峰.当多束激光射入时,实现对多束激光频率的鉴频.可以选定稳定的激光

频率作为参考频率(本研究中为 780 nm 的激光),其他待锁定的激光也同时射入 F-P 腔,在 F-P 腔对激光频率的筛选作用下,可以得到 F-P 腔对所有入射激光的反射-频率曲线,激光频率稳定的要求就是反射-频率曲线的凹陷,即激光的实际中心频率处与参考频率的“间距”不变。通过编写软件来实时监测该“间距”的变化,将变化量作为误差量反馈至激光器控制端,从而实现多束激光的稳频。由于是通过扫描 PZT 来改变腔长,因此反馈带宽很低,一般很难做到超稳腔的锁频精度。然而,传输腔锁频方案可以实现 1 MHz 量级的锁频精度,满足激光冷却分子的实验要求。

#### 4 结束语

随着量子技术的发展,研究人员可以越来越精确地控制粒子的量子状态,因此对激光频率的稳定性要求也越来越高。特别是在冷原子和频率标准为代表的应用领域,对激光频率要求非常高。随着新技术的应用,例如用单晶硅来构建超稳腔,激光频率锁定能够达到 mHz 量级。另外,这些锁频技术已经走出了实验室,并在多个领域中得到应用,例如激光锁频技术已经应用于航空航天领域,用来实现空间冷原子钟。随着微纳光子学的发展,设计更可靠、更经济的锁频方案将具有广阔的应用前景,并有助于激光锁频技术在更多领域中得到应用。

#### 参考文献:

- [1] Hänsch T W. Nobel lecture: Passion for precision [J]. *Review of Modern Physics*, 2006,78(4):1297-1309.
- [2] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000,288(5466):635-639.
- [3] Fortier T, Baumann E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications [J]. *Communications Physics*, 2019,2:153.
- [4] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy [J]. *Nature Photonics*, 2019,13(3):146-157.
- [5] The Nobel Committee for Physics. The Nobel Prize in Physics 2005. [2022-10-10]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2005/summary/>.
- [6] Hänsch T W, Shahin I S, Schawlow A L. High-resolution saturation spectroscopy of the sodium D lines with a pulsed tunable dye laser [J]. *Physical Review Letters*, 1971,27(11):707.
- [7] Martin E H, Zafar A, Caughman J B O, et al. Applications of Doppler-free saturation spectroscopy for edge physics studies [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016,87(11):11E402.
- [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] Shirley J H. Modulation transfer processes in optical heterodyne saturation spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 1982,7(11):537-539.
- [10] McCarron D J, King S A, Cornish S L. Modulation transfer spectroscopy in atomic rubidium [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008,19(10):105601.
- [11] Corwin K L, Lu Z T, Hand C F, et al. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor [J]. *Applied Optics*, 1998,37(15):3295-3298.
- [12] Xiao T, Wang T, Yan B. Note: A simple magnetic field design for dichroic atomic vapor laser lock [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018,89(4):046106.
- [13] Shen D N, Ding L Y, Zhang Q X, et al. High-performance frequency stabilization of ultraviolet diode lasers by using dichroic atomic vapor spectroscopy and transfer cavity [J]. *Chinese Physics B*, 2020,29(7):074210.
- [14] Pound R V. Electronic frequency stabilization of microwave oscillators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1946,17(11):490-505.
- [15] 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*, 1983,31:97-105.
- [16] Shi X H, Zhang J, Zeng X Y, et al. Suppression of residual amplitude modulation effects in Pound-Drever-Hall locking [J]. *Applied Physics B*, 2018,124(8):153.
- [17] Zhang W, Robinson J M, Sonderhouse L, et al. Ultrastable silicon cavity in a continuously operating closed-cycle cryostat at 4 K [J]. *Physics Review Letters*, 2017,119(24):243601.
- [18] McGilligan J P, Gallacher K, Griffin P F, et al.

- Micro-fabricated components for cold atom sensors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(9):091101.
- [19] Rushton J A, Aldous M, Himsforth M D. The feasibility of a fully miniaturized magneto-optical trap for portable ultracold quantum technology [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(12):121501.
- [20] Liu L, Lü D S, Chen W B, et al. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled  $^{87}\text{Rb}$  atoms [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2760.
- [21] Elliott E R, Krutzik M C, Williams J R, et al. NASA's cold atom lab (CAL): System development and ground test status [J]. *NPJ Microgravity*, 2018, 4:16.
- [22] Aveline D C, Williams J R, Elliott E R, et al. Observation of Bose-Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab [J]. *Nature*, 2020, 582(7811):193-197.
- [23] Ren W, Sun Y G, Wang B, et al. Highly reliable optical system for a rubidium space cold atom clock [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13):3607-3614.
- [24] Bothwell T, Kennedy C J, Aeppli A, et al. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample [J]. *Nature*, 2022, 602(7897):420-424.
- [25] McGrew W F, Zhang X, Fasano R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level [J]. *Nature*, 2018, 564(7734):87-90.
- [26] Ludlow A D, Huang X, Notcutt M, et al. Compact, thermal-noise-limited optical cavity for diode laser stabilization at  $1 \times 10^{-15}$  [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6):641-643.
- [27] Kessler T, Hagemann C, Grebing C, et al. A sub-40 mHz linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10):687-692.
- [28] Wang D Y, Bu W H, Xie D Z, et al. Compact frequency-stabilization scheme for laser cooling of polar molecules [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 35(7):1658.
- [29] 陈涛, 颜波. 极性分子的激光冷却及囚禁技术 [J]. *物理学报*, 2019, 68(4):043701.

## Experimental study on laser frequency locking

YAN Bo

(School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** With the development of laser technology, the laser frequency stability is getting better and better, and meanwhile the requirement for laser frequency stability in practical application is also increasing gradually. Simple passive frequency stabilization technology cannot meet the needs of practical applications sufficiently, active frequency locking technology has been concerned and developed rapidly. Higher frequency stability needs more precise regulation, and laser frequency locking technology has become an important part of modern quantum technology. This paper introduced several common laser frequency stabilization techniques, and showed the important development of laser frequency locking technology, such as miniaturization and automation, ultra-stable cavity locking and transmission cavity locking.

**Key words:** laser frequency locking; precise regulation; laser spectrum; ultra-stable cavity

[责任编辑:任德香]