

亚赫兹线宽稳频激光技术

蒋燕义[†], 毕志毅, 马龙生

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 激光已广泛应用于精密光谱与精密测量中, 激光的频率稳定度与光谱纯度决定了测量的精度与光谱的分辨率, 因此不断提高激光频率的稳定度和减小激光线宽是精密光谱和精密测量研究领域永远追求的目标。本文介绍了亚赫兹线宽稳频激光的原理与一些关键技术, 并展望了未来发展趋势。

关键词 激光稳频; PDH技术; 光钟; 引力波探测; 光学参考腔; 热噪声

1 窄线宽稳频激光技术: 精密光谱与精密测量的基石

在光谱研究中, 频率域的高分辨率一直是科学家们不断奋斗与追求的目标。通过不断提高原子分子光谱的分辨率, 人们发现了原子分子的精细能级结构和超精细能级结构, 进而逐步认识原子分子的内部结构和它们之间的相互作用, 以及它们在外场作用下的行为。

两三百年前, 人们就用棱镜、光栅等器件分辨非相干光源的不同频谱成分。到了20世纪60年代, 激光的发明为光谱学研究开创了新的局面: 激光的单色性是此前所有手段都无法比拟的, 它使光谱分辨得更加精细。随着精密光谱研究的深入, 光谱学家开始不满足于自由运转激光的单色性。一台自由运转激光, 其线宽一般在MHz~GHz量级, 而一些高分辨光谱研究则需要优于MHz量级、甚至是kHz量级的分辨率。不仅如此, 由于激光的频率是由激光谐振腔的有效长度决定, 因此激光的频率很容易受到激光腔内部热效应、外界环境噪声的影响而发生抖动和漂移, 这极大地限制了光谱研究的分辨率。为了提高激光光谱的分辨率, 各种激光稳频技术也应运

而生。

早期的激光稳频技术包括被动式稳频, 即采用保温、隔振等方法尽可能使激光腔的有效长度保持稳定。然而由于激光腔内复杂的结构, 很难使激光频率保持高稳定。另一种方式是主动式激光稳频, 它通过将激光的频率与其他参考频率标准进行比对, 获得激光频率与参考频率标准之间的差值, 即鉴频信号, 通过反馈控制来校正激光的频率, 使之与参考频率标准保持一致。这个参考频率标准可以是原子分子的能级跃迁频率、光学参考腔的谐振频率或者是另一台激光的频率。在以原子分子的跃迁频率作为参考频率标准时, 陆续发展了偏振光谱稳频激光技术、塞曼分裂光谱稳频激光技术、饱和吸收光谱稳频激光技术和调制转移光谱稳频激光技术等等。在以光学参考腔的谐振频率作为频率标准时, 发展了偏振稳频激光技术、频率调制稳频激光技术、PDH稳频激光技术等等。

经过科学家在激光频率精密控制领域持续不断的努力, 他们已利用窄线宽稳频激光在计量学、精密测量物理和精密光谱等方面取得了多个突破性的进展。20世纪70年代初, 美国的John L. Hall (2005年诺贝尔物理学奖得主)等人采用甲

[†]通信作者, 研究方向: 光场时频域精密控制。E-mail: yyjiang@phy.ecnu.edu.cn

烷分子的饱和吸收光谱作为频率参考, 研制了 $3.39\ \mu\text{m}$ 波段的He-Ne稳频激光, 首次将激光的频率不稳定度提高至 10^{-13} 量级^[1]。然后他们通过精密测量该稳频激光的波长 λ 和频率 ν , 精确地测量了光的速度, 即 $c=\lambda\times\nu$, 从而将光速的测量精度提高了100倍^[2]。1975年, 第15届国际计量大会 (General Conference of Weights & Measures, CGPM) 将光速定义为一个基本物理常数, $c = 299\ 792\ 462\ \text{m/s}$ 。在确定光速的基础上, 1983年第17届国际计量会议又将光在 $1/299\ 792\ 458$ 秒内传播的距离作为长度单位“米”的定义, 这项工作作为现在广泛应用的全球定位系统(GPS)奠定了基础。

为了发展原子光钟和探测引力波, R. W. P. Drever和J. L. Hall等人于1983年提出了Pound-Drever-Hall(简称PDH)激光稳频技术^[3]。Drever等人利用PDH技术研制稳频激光, 并用该激光建立探测引力波的激光干涉仪(LIGO)。经过30余年的奋斗, LIGO对于探测相对长度变化有着极高的灵敏度, 达到 10^{-21} 量级, 并先后于2015与2017年两次成功地观测到引力波^[4]。引力波的探测不仅验证了广义相对论, 也为了解天体碰撞、黑洞形成等研究提供了强有力的观察手段。R. Weiss、K. S. Thorne及B. C. Barish由于对引力波探测的贡献而获得2017年的诺贝尔物理学奖。Hall则将PDH技术用于研制线宽在1 Hz及以下的稳频激光, 为观测超窄线宽的原子谱线提供有效的探测激光。同样经过30余年的努力, 在Hall的引领下, 科学家们已能为原子光钟提供亚赫兹线

宽的稳频激光, 为发展原子光钟奠定了基础。由于超窄线宽稳频激光的快速发展, 光钟的频率不稳定度和不确定度目前都已达到 10^{-18} 量级, 已超越作为目前国际单位“秒”定义的铯喷泉钟。除此之外, PDH激光稳频技术还为激光冷却原子(1997年诺贝尔奖相关工作)、实现原子玻色爱因斯坦凝聚(2001年诺贝尔奖相关工作)、量子计算(2012年诺贝尔奖相关工作)等研究奠定了扎实的基础。

2 PDH激光稳频技术及其发展

目前, 实现高稳定度、窄线宽激光的技术主要是1983年发明的PDH技术。该技术通过伺服反馈控制系统将激光的频率锁定在一个外部的光学参考腔的谐振频率处。

图1是PDH技术的基本原理图。激光经过电光相位调制器, 当电光调制器的调制度略小于1时, 从频谱上看, 在光的载波的两侧出现了一对频率为 $\omega_0 \pm \Omega$ 、位相相反且幅度相等的调制边带(ω_0 是光频, Ω 是调制频率)。调制后的激光入射到光学参考腔, 由于参考腔对不同频率的激光会有不同的相移和损耗, 因此在参考腔的反射信号中, 载波和调制边带的幅度衰减和相移会随着激光频率与腔长的关系而不同: 当激光频率远离光学参考腔的共振频率时, 载波与边带之间的反相对称平衡关系保持不变, 因而参考腔的反射光束入射到探测器上时, 载波与边带的拍频信号等值反相而相消为零; 当激光频率接近参考腔的共振频率时, 由于参考腔会对不同频率的载波与边带

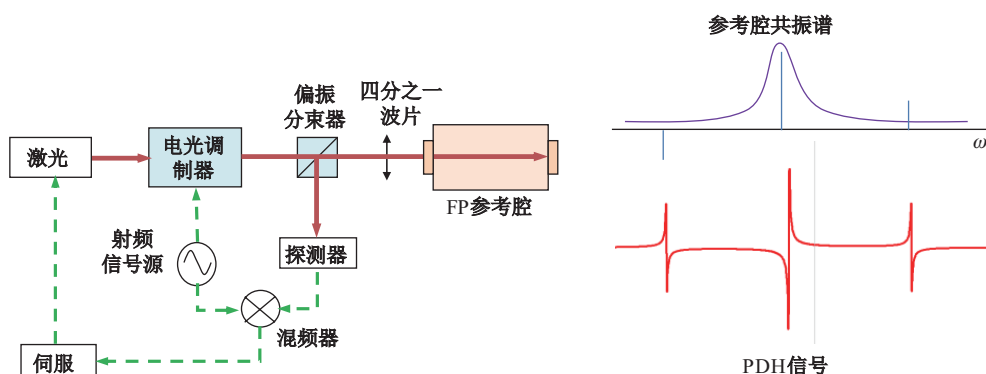


图1 PDH激光稳频技术原理图与信号

产生不同的相移和损耗,因此在参考腔的反射光束中,载波和调制边带之间对称平衡关系被破坏了,它将在探测器上产生载波与边带的拍频信号。因此可以利用该信号判断激光频率相对参考腔谐振频率之间的偏差。

如图1所示,参考腔的反射信号经四分之一波片后,由偏振分束器反射,并进入探测器获得载波与边带之间的拍频信号,探测器的输出信号由平衡混频器在调制频率 Ω 处进行解调,通过选择合适的解调位相可获得图1中的PDH信号。

PDH稳频激光技术结合了频率调制光谱技术和光外差探测技术,因此,其用于锁频的鉴频信号(也称为PDH信号)不受探测系统噪声的限制,可达到光的散粒噪声极限,因而系统噪声很低。同时,该技术还具有伺服响应快的特点。当系统其他噪声被压制后,采用PDH技术的稳频激光的频率稳定度在很大程度上取决于参考腔的长度稳定度。

2.1 减小振动噪声对光学参考腔腔长的影响

影响参考腔长度稳定的因素主要有振动噪声、温度变化等等,外界振动噪声是影响激光频率短时稳定度与频率噪声的主要因素,而温度变化则是导致激光长期频率漂移的主要因素。

为了减小振动的影响,起初人们只是采取隔振的措施来减小传递到参考腔的振动。1984年,J. L. Hall等人将两套染料激光器分别锁定在两套独立的参考腔上。为了减小振动的影响,他们用铝线把参考腔悬挂在真空室内。通过两套独立的稳频激光系统进行拍频比对,证明514 nm染料激光器的线宽被压缩到750 Hz。1994年,东京工业大学也采用悬挂方式,将46 cm长的微晶玻璃制成的光学腔悬挂在真空室内,获得了线宽小于30 Hz、频率不稳定性达 6×10^{-14} 的1064 nm激光。1999年,美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)将24 cm长的光学参考腔放置在平台上,利用4根3 m长的橡皮筋将放置参考腔的平台悬挂起来,有效地减小了传递到参考腔的振动噪声,最终获得了0.6 Hz线宽、频率不稳定性为 3×10^{-16}

的563 nm稳频激光^[5]。

上述采用悬挂方式进行减振,减振调节比较复杂,且系统庞大,不容易复制。2004年,英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)将光学参考腔放置在主动隔振平台上来减小外界振动噪声,获得了亚Hz线宽、频率不稳定性为 1.3×10^{-15} 的1 064 nm激光。之后,大多数科研小组都采用商售的、被动或者主动的隔振平台进行减振。

除了减振,科学家们还根据物体受力方式与形变的关系分析,从参考腔的结构设计与支撑方式入手,使参考腔的腔长对振动不敏感,也称为“振动免疫”参考腔设计。2005年,美国科罗拉多大学的实验天体物理联合实验室(Joint Institute of Laboratory Astrophysics, JILA)采取竖直支撑参考腔的方式,在5 cm长的圆柱型光学腔体的中间位置进行支撑^[6],如图2(a)所示。由于支撑点在腔体的中间端面上,当外加竖直方向的振动 a 时,上腔镜移动后距中心面的距离为 $L/2 - \Delta L$,下腔镜形变后距中心面的距离为 $L/2 + \Delta L$,因而使两腔镜间的相对距离仍为 L ,从而有效地减少环境振动对腔长变化的影响。在利用这样特殊设计的参考腔后,他们实现了Hz线宽的1 064 nm稳频激光。2007年,美国JILA将698 nm激光锁定在7.75 cm长、类似的竖直放置的光学参考腔上,获得了0.3 Hz线宽、频率不稳定性为 1×10^{-15} 的激光。

在国内,华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室从2005年开始利用7.75 cm长、竖直放置的光学参考腔对1 064 nm激光进行稳频。2008年初步建立了两套1 064 nm窄线宽稳频激光系统,当时激光的线宽达到2 Hz。在减小激光幅度噪声对参考腔长度的影响和光纤长度变化引起的随机光位相噪声后,于2010年将激光的最可几线宽压缩到1 Hz,激光频率不稳定性达到 1.5×10^{-15} (1秒平均时间)。之后,进一步克服了电光调制器的剩余幅度噪声等对激光频率稳定性的影响,于2013年研制成0.6 Hz线宽稳频激光,激光频率不稳定性达到 1.2×10^{-15} (1秒平均时间)^[7]。

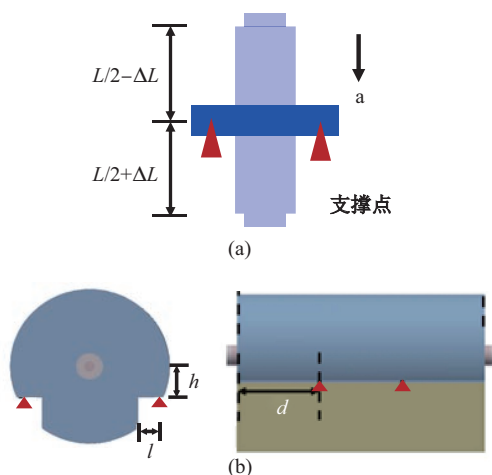


图2 振动免疫参考腔设计：(a)竖直放置结构；(b)水平放置结构

基于振动不敏感的光学参考腔的设计理念，后来人们也开始对水平腔的支撑方式进行振动免疫设计。2007年，英国国家物理实验室(NPL)设计了腔长近100 mm的水平放置光学参考腔，如图2(b)所示。他们采用数值模拟计算，当参考腔的支撑位置不同时，得到在受振动加速度后两个镜面中心点之间的距离，从而得到最佳支撑位置，此时腔长由于震动引起的变化最小。他们在实验上测量了当参考腔处于最佳支撑方式时，参考腔在垂直方向的振动敏感度为 $3.5 \times 10^{-12}/g$ 。之后，德国PTB、美国JILA和NIST等实验室纷纷建立了长度在30 cm以上的水平放置的参考腔，通过数值模拟计算和实验测量，得到振动不敏感的最佳支撑位置。

2.2 降低参考腔的热噪声影响

对于10 cm长的光学参考腔来说，当环境振动对它的影响降到一定程度后，人们发现激光的频率不稳定性不再下降，还是无法超越1999年美国NIST用24 cm长的参考腔实现的 3×10^{-16} 的激光频率不稳定性。2004年，Numata等人分析发现^[8]：参考腔的腔体、腔镜的基片和镀膜分子都在无规则地自由运动，这种热运动引起的10 cm光学参考腔的腔长起伏在 10^{-16} 米量级，而利用该参考腔进行稳频的激光的频率不稳定性就被限制在 1×10^{-15} ，这和实验测量数据相吻合。

从参考腔的热噪声中分析，腔镜和镀膜材料分子的热运动占主要因素，因此增加参考腔的腔长将减小参考腔的相对长度变化，这很好地解释了美国NIST用24 cm长的参考腔得到激光频率不稳定性为 3×10^{-16} 的原因。鉴于这项分析，2011年，美国NIST采用30 cm长的光学参考腔得到了频率不稳定性为 3×10^{-16} 的578 nm激光(铯原子光钟本振激光)；2012年，美国JILA实验室采用40 cm长的光学参考腔，将铯原子光钟的本地振荡激光(698 nm)的频率不稳定性降低至 1×10^{-16} (1秒平均时间)。2015年，PTB采用48 cm长的光学参考腔，实现了频率不稳定性为 8.7×10^{-17} 的698 nm稳频激光。这些腔长较长的光学参考腔，都采用上文提到的水平支撑方式，从而获得非常小的振动敏感度。

在国内，开展长度约30 cm的光学参考腔实现高稳定度激光的研究单位有华东师范大学、中国计量科学研究院、华中科技大学和中国科学院物理与数学研究所。他们通过克服振动噪声的影响，陆续实现频率不稳定性在 10^{-16} 量级的激光，有的能够达到 2×10^{-16} ^[9]，接近参考腔的热噪声极限。

除了增加腔长外，降低温度是减小参考腔材料分子热运动的最直接方法。2012年，德国PTB和美国JILA实验室共同研制了21 cm长的单晶硅光学参考腔，该参考腔置于124 K低温环境中，并实现了1.5 μm激光频率锁定到参考腔的谐振频率上，测得激光频率不稳定性为 1×10^{-16} (1秒积分时间)、线宽为40 mHz。之后，他们优化了参考腔的支撑方式，减小了振动的影响。2017年，该1.5 μm稳频激光的频率不稳定性可达 4×10^{-17} ，线宽达到10 mHz^[10]。2017年，美国JILA实验室采用闭环式液氦制冷机冷却6 cm长的单晶硅参考腔至4 K，并将1.5 μm激光锁定在该低温参考腔上，实现了17 mHz线宽、秒稳为 1×10^{-16} 的稳频激光。采用闭环式液氦制冷机对光学参考腔进行制冷，制冷机的振动噪声很大，因此振动不敏感的参考腔设计就显得尤为重要。

除了上述采用降低温度和增加腔长外，由于腔镜和镀膜材料分子的热运动占主要因素，因

此采用低机械损耗的腔体材料也有助于降低参考腔的热噪声影响。2009年,法国巴黎天文台采用机械损耗较ULE玻璃小的熔石英材料作为参考腔的腔镜,从而利用10 cm长的参考腔实现了 5.6×10^{-16} 的激光频率不稳定性(1秒平均时间),是使用全ULE玻璃材料制成参考腔的热噪声极限的1/2倍。除了腔镜使用低机械损耗的材料,2013年,G. D. Cole等人发现:AlGaAs晶体镀膜材料的机械损耗比传统的Ta₂O₅/SiO₂膜层降低近一个数量级,从而可降低参考腔热噪声对激光频率稳定性的影响。

另外,如果增大光学参考腔腔镜上的光斑面积,可使镜面上热噪声起伏在更大面积上进行平均,也可降低参考腔的热噪声影响。2017年,美国NIST采用曲率半径为10.5 m的凹面镜制成光学参考腔,将腔镜上的光斑直径从0.5 mm左右增大到1.34 mm,从而利用29 cm长的光学参考腔实现热噪声限制的激光频率不稳定性为 1×10^{-16} 。2018年,华中科技大学将激光锁定在10 cm长的全ULE材料的光学参考腔的HG₀₂模上,实现了激光频率不稳定性为 4.9×10^{-16} ,略小于锁定在光学参考腔的HG₀₀模上的热噪声极限(6×10^{-16})。

2.3 可搬运稳频激光系统

以上窄线宽稳频激光系统都放置在实验室环境下,通过将参考腔放置在特殊的支撑点,从而实现振动免疫的功能,因此参考腔不容易搬动。随着窄线宽稳频激光器的应用逐渐从实验室环境扩展到室外乃至太空环境中,如重力势测量、空间引力波探测等,因此研制可搬运的稳频激光是十分必要的。

在可搬运窄线宽稳频激光系统中,既能实现光学参考腔的搬运特性又能保持参考腔对环境振动的不敏感是研制该系统最核心的问题。2011年,美国NIST设计了直径为50.8 mm的球形光学参考腔,腔体由球心对称的两点挤压固定,参考腔的通光轴与支撑轴的夹角经过特殊设计,使得参考腔的腔长对加持力不敏感。2013年,他们设计了高精度振动测量与反馈消除的系统,使得环境振动对参考腔长度的影响在 10^{-12} /g量级。他们

将稳频激光系统放置在行驶的客车中,测得1070 nm激光锁定线宽为100 Hz。2011年英国NPL实验室设计了边长为50 mm的立方体光学腔,将正方体8个顶点切割边长为6.7 mm的正三角形平面,在其中四个对称顶点进行挤压支撑,通过倒转腔体,测得振动敏感度为 2.5×10^{-11} /g。之后,德国PTB的研究小组设计了圆柱形、水平放置的光学参考腔,在参考腔的3个维度上多点挤压支撑,实现可搬运及振动不敏感,最终将稳频激光的频率不稳定性改进到 10^{-16} 量级。

3 总结与展望

从1983年第一次提出PDH技术开始,经过35年的发展,稳频激光的线宽从百赫兹量级到如今的十毫赫兹量级。然而继续前进的步伐还没有终止,因为像原子光钟、空间引力波探测、低噪声微波/光波信号合成等应用需要频率稳定度更高、线宽更窄的激光。例如:在原子光钟中,窄线宽稳频激光作为光钟的钟跃迁激光,如将稳频激光的频率不稳定性从 10^{-15} 提高到 10^{-17} ,可将光钟的频率稳定度提高两个量级,从而能使光钟实现 10^{-18} 精度的测量时间从 10^6 秒(11天)减少到百秒量级,这使得利用光钟进行高精度地测量瞬时物理量变化成为可能。

进一步提高稳频激光的频率稳定性和压窄激光线宽的难度比以往更大,这是因为利用PDH技术稳频的激光系统已受限于参考腔的热噪声。从参考腔的热噪声分析来看,要使参考腔的热噪声对稳频激光的频率稳定度的影响降到 10^{-18} 量级,可行的方法只有使用长度在30 cm左右且温度在4 K左右的光学参考腔。这对实验技术的考验非常大:制冷机的制冷功率有限,很难对如此庞大的参考腔进行冷却;制冷温度在几十微开的起伏将破坏参考腔的频率稳定度,还需在参考腔和制冷系统直接增加足够的热屏蔽层,从而衰减一些温度起伏,这将给制冷系统又增加制冷负载;循环制冷机的振动噪声非常大,目前采用振动不敏感的设计,也仅能将其减小到 10^{-17} 量级,而长度在30 cm左右的长腔,其对振动的敏感度将更大。因此如何突破现有的支撑设计、获得超

低的振动敏感度将是 10^{-18} 激光频率稳定度的最大的挑战。

当然，为了绕过参考腔的热噪声影响，也有人试图从原子系统获得超窄线宽激光。在“主动光钟”方案中，北京大学与美国JILA实验室将具有窄跃迁谱线的原子放在光学腔中，分别作为激光增益与激光腔。由于激光增益介质的能级跃迁宽度远小于激光腔的线宽，在此条件下产生的激光的频率主要依赖于增益介质的窄线宽跃迁，而不是激光腔的长度。除了该方案，也有人提出利用超窄线宽的原子跃迁谱线作为激光鉴频曲线进行激光稳频，结合光学腔增强效应补偿跃迁能级间的弱相互作用，从而提高钟跃迁谱线的信噪比。华东师范大学也提出了利用毫赫兹量级的原子能级跃迁宽度的四能级系统产生四波混频光的设想，该方案中，混频光的线宽主要受原子能级之间跃迁宽度限制，能够达到毫赫兹量级。目前，上述采用原子系统实现窄线宽激光的方法还依赖于连续原子的制备，或者还需克服原子运动等问题。

畅想未来，我们期望有朝一日能够实现毫赫兹甚至亚毫赫兹线宽的稳频激光。那时再进行精密光谱和精密测量时，会发现更多目前无法观测到的现象，也能为人类探索新的规律提供强有

力的技术支撑。同时，我们还期待超窄线宽稳频激光系统能够做到小型化甚至微型化，为利用窄线宽稳频激光开展研究带来无比的便利。

(2018年12月24日收稿) ■



参考文献

- [1] BARGER R L, HALL J L. Wavelength of the 3.39- μ m laser-saturated absorption line of methane [J]. Appl Phys Lett, 1973, 22(4): 196-199.
- [2] EVENSON K M, WELLS J S, PETERSEN F, et al. Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of the Methane-stabilized laser [J]. Phys Rev Lett, 1973, 29(19): 1346-1349.
- [3] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. Appl Phys B, 1983, 31(2): 97-105.
- [4] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. Phys Rev Lett, 2016, 116: 061102.
- [5] YOUNG B C, DA CRUZ F C, ITANO W, et al. Visible lasers with subhertz linewidths [J]. Phys Rev Lett, 1999, 82(19): 3799-3802.
- [6] NOTCUTT M, MA L-S, YE J, et al. Simple and compact 1-Hz laser system via an improved mounting configuration of a reference cavity [J]. Opt Lett, 2005, 30(14): 1815-1817.
- [7] CHEN H Q, JIANG Y, FANG S, et al. Frequency stabilization of Nd:YAG lasers with a most probable linewidth of 0.6 Hz [J]. J Opt Soc Am B, 2013, 30(6): 1546.
- [8] NUMATA K, KEMERY A, CAMP J. Thermal-noise limit in the frequency stabilization of lasers with rigid cavities [J]. Phys Rev Lett, 2004, 93(25): 250602.
- [9] JIN L, JIANG Y, YAO Y, et al. Laser frequency instability of 2×10^{-16} by stabilizing to 30-cm-long Fabry-Perot cavities at 578 nm [J]. Opt Express, 2018, 26(14): 18699-18707.
- [10] MATEI D G, LEGERO T, HÄFNER S, et al. 1.5 μ m lasers with sub-10 mHz linewidth [J]. Phys Rev Lett, 2017, 118(26): 263202.

Sub-hertz-linewidth frequency-stabilized lasers

JIANG Yanyi, BI Zhiyi, MA Longsheng

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

Abstract Lasers are widely used in precision spectroscopy and precision measurement. The laser frequency stability and spectral purity determine the measurement accuracy and precision. Therefore, lasers with even higher frequency stability and narrower linewidth are pursued. In this paper, we review the techniques of sub-hertz-linewidth lasers and prospect the ways to realize lasers even higher frequency stability.

Key words laser frequency stabilization, PDH technique, optical atomic clock, gravitational wave detection, optical reference cavity, thermal noise

(编辑：段艳芳)