

# 超窄线宽激光\*

## ——激光稳频原理及其应用

沈辉 李刘锋 陈李生<sup>†</sup>

(中国科学院武汉物理与数学研究所 中国科学院原子频标重点实验室 武汉 430071)

## Lasers with ultra-narrow linewidth

### ——Theories and applications of laser frequency stabilization

SHEN Hui LI Liu-Feng CHEN Li-Sheng

(Laboratory of Atomic Frequency Standards, Wuhan Institute of Physics and Mathematics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

2016-05-30收到

<sup>†</sup> email: lchen@wipm.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160704

**摘要** 自从20世纪激光发明以来,激光的应用已经深入到我们生活的各个方面,如光刻机、激光3D打印、激光医疗、大型激光干涉引力波探测等。在科学研究上,激光是一种不可或缺的重要光源,它以其优异的光谱特性被应用于许多研究领域,尤其是超窄线宽的高稳定度激光可以作为一双独特“眼睛”,能够用来观察原子分子的微观物理世界。如果以这种高稳定度激光来探测原子或离子的光谱特征,并将激光频率锁定在原子或离子的能级跃迁上,能形成计时无比精准的“光学原子钟”。这种新型的时钟具有前所未有的计时精度,它的累积误差将可以做到从宇宙起源(137亿年前)至今仍小于1秒!获取这种超窄线宽的高稳定度激光是一项关键且非常重要的技术,文章详细介绍了该项技术的发展历程和基本原理,以及它的几项重要的用途和前沿进展。

**关键词** 激光稳频, 窄线宽激光, 光频率标准

**Abstract** Since its invention in the 20th century, lasers have permeated every aspect of our daily life. With its exceptional spectral features it is now an indispensable light source, and lasers have been widely adopted in many areas of scientific endeavor, including laser photolithography, 3D printing, laser medicine, and large-scale gravitational wave detectors based on laser interferometry. In particular, lasers with ultra-narrow linewidth and high frequency stability act as unique "eyes" that enable us to peer through the micro world of atoms and molecules. This type of laser is used to probe the spectral features of atoms or ions and can be locked onto their transitions, leading to the development of an "optical atomic clock" with unprecedented precision in timekeeping. In fact, the optical atomic clock is incapable of accumulating just one wrong second if it started to tick at the moment of the creation of the universe some 13.7 billion years ago. How to obtain such a laser is by no means a trivial task, as it involves many key scientific technologies. This paper reviews the principles and historic development of laser frequency stabilization. We also describe many important applications and future developments of ultra-stable lasers.

**Keywords** laser frequency stabilization, narrow line lasers, optical frequency standard

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB821300)、国家自然科学基金(批准号: 11235004, 11327407)资助项目

## 1 引言

激光已经渗透到人们生活中的方方面面。电影“星球大战”中挥舞的激光剑深深地吸引了我们。各种各样的激光武器也显示出了巨大的威力。目前,在实验室中科学家们正在利用高稳定的激光研制计时精准的光钟,大爆炸理论指出宇宙起源于137亿年前,光钟的累积误差将可以做到从宇宙起源至今仍小于1 s!与普通光源相比,激光在单色性、辐射强度等方面都具有非常独特的性质。在本文中,我们首先了解激光的单色性,分析如何来定量地评估这一特性,然后仔细地探讨怎样才能够获得单色性更好、频率更稳定的激光,以及有哪些值得我们去深入探索的科学问题。

## 2 激光稳频的发展历史

1960年7月美国加州Hughes实验室的Theodore H. Maiman演示了世界上第一台红宝石固体激光器。在这之后,不同波段和类型的激光器相继被实现,激光器的各种性能也得到很大改善。自激光诞生以来,就以其优异的时间相干性和空间相干性,迅速地取代了普通光源而被广泛应用于各项科学技术领域。

提高激光频率稳定度的努力从激光的诞生初期就已经开始。很多科学研究和实际应用对激光

的光谱纯度和稳定性有很高要求,而自由运转的激光并不能满足这一需求。为了获得高光谱纯度、窄线宽和高频率稳定度的激光器,人们提出了各种各样的方法和技术来降低激光的频率噪声。最初,研究人员通过对激光器采用隔振、控温等被动措施来稳定其输出激光的频率。这些措施能使激光器更加稳定地运行,却没有很有效地压窄激光的线宽。

相对于被动措施,反馈控制系统能够主动补偿激光频率的变化,从而达到压窄激光线宽的目的。图1显示了主动稳频技术的原理框图。要实现激光频率的主动稳定,首先需要有一个光学频率参考,通过激光频率与参考频率比对来获得鉴频误差信号,然后再通过反馈来校正激光频率,使激光频率跟随频率参考的变化。因此在这个方案中频率参考的选择对稳频的效果十分关键,一般需要参考频率具有较高的稳定度、复现性和较窄的光谱线宽等特性,以及能匹配被稳激光的频率。

原子分子跃迁谱线能够提供一种绝对的频率参考,最大的优点在于其具有优异的长期稳定性,可以使激光获得较好的长期频率稳定度。基于原子分子跃迁谱线发展出了各种各样的稳频技术,例如饱和吸收稳频<sup>[1]</sup>、调制转移光谱稳频<sup>[2]</sup>、偏振光谱稳频<sup>[3]</sup>、Zeeman效应稳频<sup>[4]</sup>等。这其中的一个典型例子就是以碘分子的超精细跃迁谱线为基准的激光稳频<sup>[1,5]</sup>。但由于原子分子的跃迁谱线存在许多展宽效应,而导致其谱线较宽,当激光锁定在这一较宽的谱线上时,很难获得较好的短期频率稳定度。此外,由于跃迁谱线的频率由原子分子的能级间隔决定,通常只是一些特定的频率,因而对于一些特定波长的激光,很难找到与之对应的原子分子跃迁谱线作为频率参考。

除了上面提到的原子分子吸收谱线,光学谐振腔(又称法布里—珀罗(Fabry—Perot)腔,以下简称光腔)的特征频率也可以作为激光稳频用的参考频率,并且基于它的激光稳频技术具有鉴频特性好且不依赖于光强、信噪比高等优点,能大大压窄激光线宽,很大程度上提高激光频率的短期

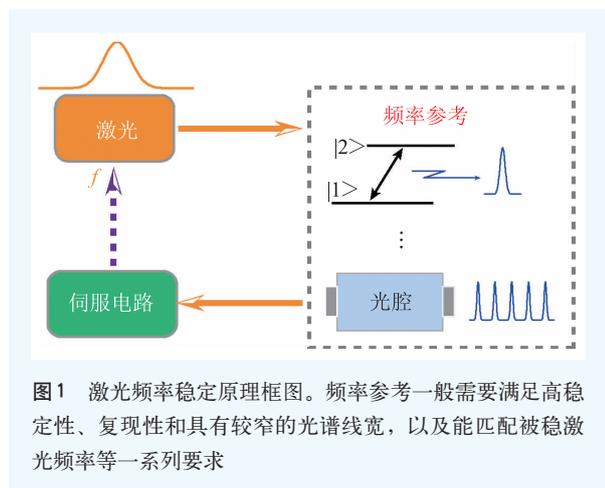


图1 激光频率稳定原理框图。频率参考一般需要满足高稳定性、复现性和具有较窄的光谱线宽,以及能匹配被稳激光频率等一系列要求

稳定度。在利用光腔作为频率参考的激光稳频方法中，具有代表性且得到广泛应用的一种方法就是 Pound—Drever—Hall(PDH) 锁频，下面就介绍一下这种方法的工作原理。

### 3 PDH锁频

PDH锁频的基本实验装置如图2所示，它在原理上借鉴了1946年 R. V. Pound 使用微波腔进行微波稳频的思路<sup>[6]</sup>，也类似于原子分子物理中用于探测原子或分子的光学共振谱线的频率调制光谱技术<sup>[7]</sup>。首先对待锁频的激光进行相位调制，调制后的激光入射到光腔中。与光腔相互作用后，被反射回来的光经过光电探测并进行解调，获得用于锁频的误差信号(其幅度正比于激光频率相对光腔谐振频率的失谐量)。误差信号经过滤波和放大后，再反馈给激光器的频率执行机构，对激光频率进行补偿，使激光频率锁定在光腔的谐振频率上。

在PDH锁频技术中，光腔的 $Q$ 值(谐振频率与谐振峰宽度的比值)可以达到很高的值，使得该方法具有很强的鉴频能力；再加上采用光学外差拍频进行探测，获得的鉴频信号的信噪比也很高；此外由于谐振腔的共振模式成梳状结构，其谐振频率在理论上可以无限延展，因而它可满足不同波长的激光器的稳频需求。虽然利用光腔稳频的激光没有绝对的频率参考，难以保证激光的长期稳定性，不能单独作为光频率标准，但是它具有优异的短期频率稳定性，使其在光频率标准、高分辨精密激光光谱、引力波探测、低噪声超稳微波信号产生以及很多精密物理实验中都有非常重要的应用。

### 4 高频率稳定度、超窄线宽激光的应用

高频率稳定度、超窄线宽激光是新一代光学

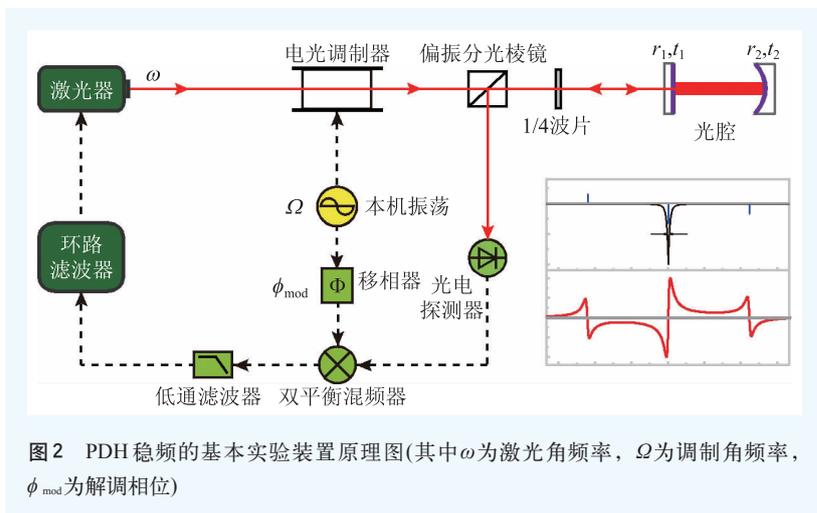


图2 PDH锁频的基本实验装置原理图(其中 $\omega$ 为激光角频率,  $\Omega$ 为调制角频率,  $\phi_{\text{mod}}$ 为解调相位)

频率标准研制中所急需的一项关键性技术。这种光频本机振荡器同冷原子(或囚禁单离子)和飞秒光梳系统一起，构成了新一代的时间频率基准——光钟。新一代原子或离子光频标采用在光频范围内( $\sim 10^{14}$  Hz)的量子跃迁，其对应的谱线线宽非常窄，处于几赫兹到亚赫兹量级，相应的 $Q$ 值至少能达到 $10^{14}$ 量级，具有优良的频标潜力。但是要在实验上实现光频标必须要有性能优异的光频本机振荡器。探测原子或离子中的“光钟”跃迁对激光器的稳定性提出了非常高的要求。探测激光器的短期频率稳定度至少要和“光钟”跃迁的线宽(赫兹到亚赫兹量级)相匹配。目前商用激光器的自由运转线宽大约是1 kHz到1 MHz量级，同时这些激光器频率的长期漂移一般是不可预测的，远不能满足研制光钟的要求，还需要借助外部的高稳定性光腔来大幅度地提升激光的光谱纯度和频率的稳定性。

高稳定激光与光学频率梳<sup>[8]</sup>相结合，可以进行光频计量，形成窄线宽光学频率综合器<sup>[9, 10]</sup>，产生超稳微波信号<sup>[11]</sup>，以及直接链接时间和粒子的质量<sup>[12]</sup>等。随着技术的提高，这种超稳激光在传输很远的距离时仍能保持其稳定度，可用于远距离光学时频传输和通讯<sup>[13]</sup>。此外高光谱纯度的激光辐射在量子光学、超精细光谱研究、计量、空间科学和国防等领域都有着广泛的应用。

基于高稳定光腔的激光稳频技术也在一些前沿基础物理研究中发挥着重要作用(图3)。目前

很多的引力波探测仪(如LIGO、TAMA、VIRGO等),都是利用频率锁定在两个光腔(长度从几百米到几公里)上的高稳定性激光,来探测空间尺度在 $10^{-22}/\sqrt{\text{Hz}}$ (大致在Hz到kHz频率范围内)量级上的变化。采用光腔还可以对洛伦兹不变性进行高精度的检验,目前检验精度已提升到 $10^{-17}$ [14]。这类精密测量物理实验将会在量子引力理论的检验中发挥重要的作用。

## 5 研究进展

1983年,Drever和Hall等人采用PDH的锁频方法将激光频率锁定在光腔上,得到线宽小于100 Hz的激光[15],此后激光稳频的研究取得了很

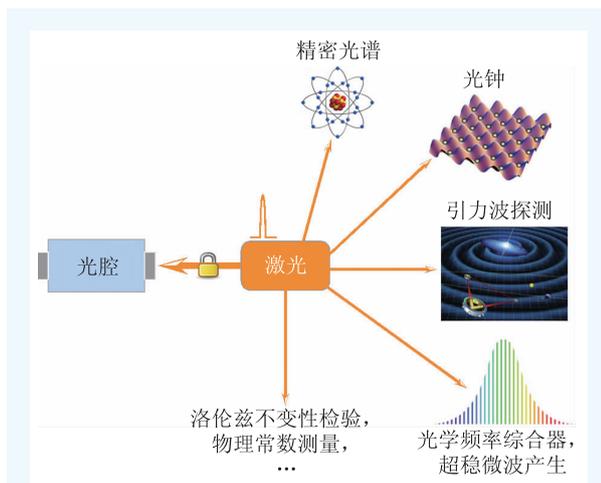


图3 超稳激光器的应用。利用PDH技术将激光锁定在超稳光腔上,能获得很窄的激光线宽和优异的短期稳定度

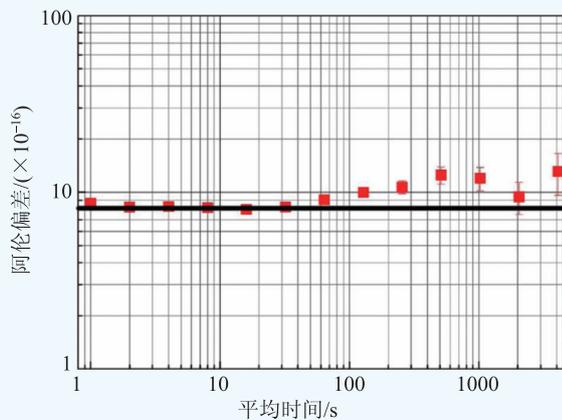


图4 锁定在高稳定光腔上的1557 nm激光的频率稳定度(相对值)。结果取自参考文献[19]

大的进展。1999年,美国国家标准与技术研究所(NIST)的Bergquist小组实现了亚赫兹线宽激光辐射[16]。由于激光稳频对隔振和隔声都有极其严格的要求,这类系统往往非常庞大而且非常复杂。2005年美国天体物理联合实验室(JILA)报道了采用垂直安放的光腔的实验[17],同传统的振动隔离不同,该方法在减小系统体积的同时大幅度提高了光腔的稳定性。

现在PDH锁频技术已经发展得比较成熟,利用这一技术,一个相对小型的激光稳频系统的频率稳定度在1—100 s内能达到 $1 \times 10^{-15}$ ,这一稳定度甚至能更进一步延伸到 $1 \times 10^3$  s的时间尺度。国际上很多研究机构都实现了赫兹和亚赫兹量级的超窄线宽激光,如美国的NIST和JILA、英国的NPL、德国的PTB、华东师范大学等(相关的报道见参考文献[18]中的引用)。此外华中科技大学、中国科学院武汉物理与数学研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、国家授时中心、山西大学和中国计量科学研究院等研究机构也开展了这方面的研究。图4给出了锁定在高稳定光腔上的1557 nm激光的稳定性测量结果[19],其频率稳定度在100 s以内都进入了 $10^{-16}$ 的量级,而且在1000 s量级也能保持很好的稳定性,同时激光的线宽已降至了0.26 Hz。随着技术的改进和光腔的热噪声水平的降低,通过腔稳的激光器的频率稳定度已经达到了 $10^{-16}$ 量级[20, 21],甚至是 $10^{-17}$ 量级,激光的线宽降到了40 mHz[22]。

无论是囚禁单个离子光钟,还是中性冷原子光晶格钟,高稳定的钟频激光都会大大缩短钟跃迁测量的平均时间,提高光钟的整体性能。利用这种超稳激光器,目前光学频率标准的稳定度已经进入到了 $10^{-18}$ 量级水平[23, 24]。在日本RIKEN等多家研究机构最近报道的一项光频标研究工作中[25],采用了秒稳在 $3 \times 10^{-16}$ — $5 \times 10^{-16}$ 的钟频激光,精确地测量了镱(Yb)原子和锶(Sr)原子两个光晶格钟的频率比值 $R=1.207507039343337749(55)$ 。值得注意的是,仅用150 s平均时,其相对不确定度就已降至 $5 \times 10^{-17}$ ,这一优异的特性也是和采用高稳定的钟跃迁探测激光分不开的。

随着稳频激光性能不断提升,我们对激光频率噪声的认识也在不断地深入。定量地分析激光频率噪声的产生机制是十分必要的,它为进一步提高激光性能提供重要的参考信息。下面就简要介绍一下与激光频率噪声有关的问题,即激光线宽和剩余幅度调制。

激光线宽是一个经常提到的衡量其单色性的指标。对于线宽与频率噪声之间定量关系,我们比较熟悉的是著名的肖洛—汤斯线宽<sup>[26]</sup>。但这只是一个特例,因为肖洛—汤斯线宽假设激光的频率噪声具有白噪声的特性,即不同频率处的噪声谱都一样,而激光由于受外界环境因素影响,其频率波动中有很多缓慢变化的成分,也就是说其频率噪声中低频成分相对较大。处理这种情况的相关理论<sup>[27]</sup>目前已经得到了实验验证<sup>[18]</sup>(图5)。理论和实验都表明振荡器线宽随测量时间的增加而加大,同时提高频率噪声会导致激光的线型、线宽发生相应的变化。这些工作使我们认识到激光线宽同频率噪声和频率稳定度之间有着定量的关系,这对于高稳定频率振荡器的指标评定以及各类实验中如何进行激光光谱线型以及线宽的测量都具有重要的参考价值。

在激光稳频中的另一个噪声机制就是剩余幅度调制(RAM),它是影响激光频率稳定度的重要因素之一。RAM普遍存在于光相位调制和调制光场传播过程中,在PDH激光稳频中,它通过影响锁频误差信号来影响频率稳定度。早期的研究工作已经探索了引起RAM的各种因素和物理机制,并进行了许多量化的分析。近年来对剩余幅度调制进行了更系统的分析<sup>[28]</sup>,能够定量分析双折射、寄生标准具、参考光相位漂移、光偏振态变化等所带来的频率漂移。这些研究成果在激光稳频、激光光谱、干涉测量等领域都有着重要的参考价值。

## 6 窄线宽激光关键技术

获得超窄线宽激光涉及到很多关键技术,例如高稳定、低损耗光腔的研制和对各种外界环境

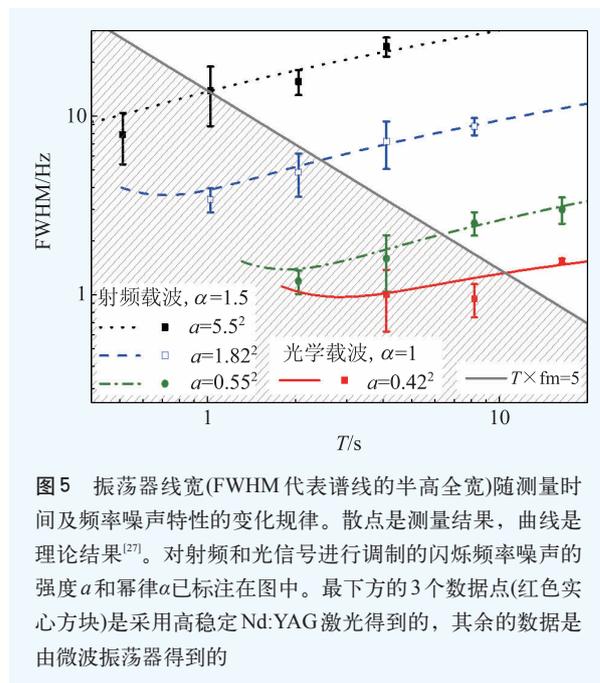


图5 振荡器线宽(FWHM代表谱线的半高全宽)随测量时间及频率噪声特性的变化规律。散点是测量结果,曲线是理论结果<sup>[27]</sup>。对射频和光信号进行调制的闪烁频率噪声的强度 $\alpha$ 和幂律 $\alpha$ 已标注在图中。最下方的3个数据点(红色实心方块)是采用高稳定Nd:YAG激光得到的,其余的数据是由微波振荡器得到的

因素的隔离等等。这里重点介绍其中涉及到的几个关键问题。

作为频率参考的光腔(图6)是超窄线宽激光的核心组件。通常光腔都设计为圆柱状或长方体状,腔体的两个端面分别安装一个低损耗的高反射镜。光腔的精细度目前已达到100万的量级甚至更高,对应的光的单程损耗在几个ppm( $1 \text{ ppm} = 1 \times 10^{-6}$ ,即百万分之一)的量级,也就是说光在两面腔镜中反射约50万次,其强度才降低到初始值的一半。高反射率、低损耗腔镜是研制光腔的关键步骤和难点之一,其中涉及基片的抛光和镀膜。高稳定光腔的研制还涉及到零膨胀材料、谐振腔的几何形状和参数选择、腔体的支撑和悬挂、精密温度控制、真空技术等多个环节。

光腔作为PDH激光稳频的光学参考,极易受到外界环境扰动的影响,需要从多个方面入手来提高其稳定性。首先光腔的长度会随温度的波动而发生变化。目前主要采取两种应对的方法,即采用具有超低热膨胀系数的材料和提高腔体的温度稳定性。一些特种玻璃材料具有极低的热膨胀系数,可以达到 $10^{-8}/\text{K}$ 的量级甚至更低。另一方面,需要提高腔体的温度稳定性。例如对放置腔体的真空室进行高精度温控,将其温度的长期波

动降低到0.1 mK的量级。此外需尽量降低真空室外壁到光腔之间的热量传递速度,这样就可以过滤掉很大一部分温度波动(当然温度波动越缓慢,这种滤波效果就越弱,直至完全失去效果)。

尽可能地降低振动对光腔长度的影响是激光稳频中一项重要的工作。振动隔离装置主要分为被动振动隔离系统和主动振动隔离系统两种。被动振动隔离系统的基本原理是利用机械阻尼结构的振动特性来减小振动。同传统的机械隔振系统相比,目前商用的被动隔振平台已经在尺寸和重量上降低了很多,但一般其自然频率大约在1 Hz左右,只能对高于1 Hz的振动进行衰减。主动隔振技术<sup>[29]</sup>是利用机电反馈控制技术来主动补偿传感器所检测到的振动。近年来随着传感技术的进步,主动隔振已展现出优秀的性能,其结构、工

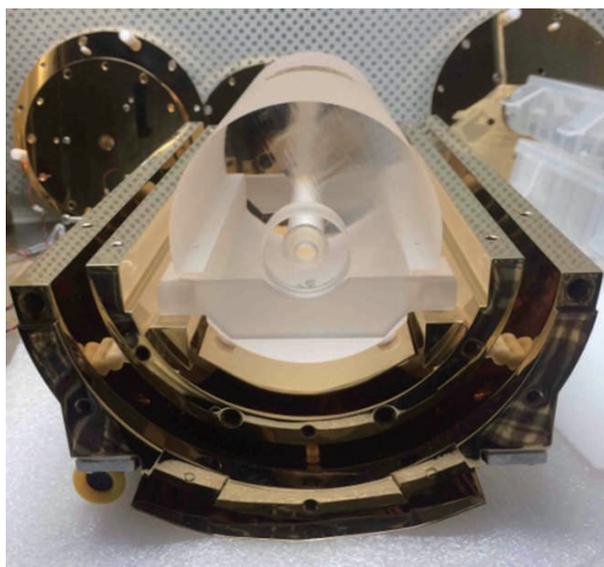


图6 用于激光稳频的高细度、低损耗光腔

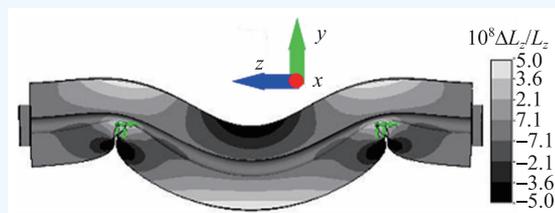


图7 通过优化支撑方式来降低光腔对振动的敏感程度。图中显示的是光腔在重力(垂直向下)作用下的形变(已放大)。在这个例子中通过合理选择支撑间距,使得左右两个端面保持平行,并且它们之间的距离保持不变

作模式和操作相对简单,且不易受到外界环境(声音、气流等)的影响。另一个非常有效的方法是,通过合理地设计光腔的几何形状和支撑方式来降低光腔长度对振动的敏感度<sup>[30-32]</sup>(图7)。这种优化方法的准确性已经得到了验证,可用于设计和优化各种类型光腔的几何形状和支撑结构,在很大程度上缩短了研制周期。

采取上面的措施,即便是获得了高稳定的光学参考,但并不等于就能得到高频率稳定度的激光。激光在进入光腔(或其他频率参考)以前必定要走一段路程,这一段可能是空间光路,也可能是光纤。而这段光程的不稳定性会带来额外的频率噪声,将本来很窄的激光谱线展宽。光纤噪声压制是为解决此问题而发展出来的一种巧妙且非常有效的方法<sup>[33]</sup>,其思路就是独立地测量出这一段额外光程所带来的噪声,然后通过反馈的方式将这部分噪声抵消掉。这一方法目前也被广泛地应用在光频率的远距离光纤传输中,这使得经过几公里到几百公里,甚至是上千公里的传输,输出端激光谱线的展宽也不会超过1 mHz。

## 7 发展趋势

目前获得超窄线宽激光的主要手段是利用高细度、超低损耗的光腔。不断地提高低损耗光腔的性能仍将是一个长期的工作。这方面涉及到很多高精尖技术,例如超低损耗的反射镜。镀膜技术(如离子溅射镀膜)也是获得低损耗腔镜的关键。此外对于制造光腔的材料也有很高的要求:需要具有零膨胀的特性且机械损耗低。以上这些技术的实现和进一步完善都需要不懈的努力。

激光频率稳定度的进一步提高会受到光腔热噪声的限制<sup>[34]</sup>。根据热噪声理论分析,对于长度在100 mm左右的ULE(一种具有超低热膨胀系数的玻璃材料)光腔,由于光腔的热噪声,锁定在其上的激光的频率稳定度无法小于 $1 \times 10^{-15}$ 。使用机械损耗系数更小的腔镜基片材料,增加光腔的有效腔长,增大腔镜上光斑的尺寸,降低光腔的温

度等措施可以在一定程度上降低热噪声。目前通过采用熔石英腔镜,并将光腔长度增加到40 cm左右,激光的频率不稳定性降低到了 $8 \times 10^{-17}$ <sup>[35]</sup>。锁定在低温单晶硅光腔上的激光器的频率不稳定性也开始进入 $10^{-17}$ 量级<sup>[22]</sup>。

热噪声在很多精密物理测量中是一个共性的问题,探索降低热噪声的方法是一项有着重要意义的工作。例如在探测引力波的激光干涉仪实验中,热噪声是影响引力波探测仪灵敏度的重要因素之一。在用光腔检验洛伦兹不变性的实验中,热噪声也是影响实验探测精度的主要噪声源。为了探索降低光腔热噪声的新方法,人们尝试通过改变镀膜的材料和重新设计镀膜结构<sup>[36]</sup>,同时也从不同方面研究热噪声自身特性<sup>[37]</sup>。综合目前激光稳频和相关领域的研究情况来看,直接大幅度地降低热噪声是一项长期的、极具挑战性的工作,需要从热噪声理论、镀膜以及光腔材料等多个方面入手进行深入的研究。

随着光钟性能的不断提高,对激光频率稳定性的要求也在不断地提升,其他相关的精密物理测量实验对超窄线宽激光的需求也是十分迫切。除了指标的提高,在一些具体的应用中对稳频激光的小型化、可搬运等特性也提出了新的要求。为了满足这些需求,近年来窄线宽稳频激光有了新的发展。

在激光锁频中可以用一段光纤来替代作为频率参考的光腔<sup>[38]</sup>。这种方法的特点是采用光纤代替超低损耗的光腔,其体积可以做得较小。但为了保证其稳定性,仍需要对光纤进行振动隔离和温度稳定。

另外近年来出现一种新的激光稳频方法,即利用晶体的光谱烧孔来对激光进行稳频<sup>[39]</sup>。有一些晶体在极低的温度下(液氮温度附近)具有极窄的烧孔宽度,并且可以长时间保持该特性。可以将这种烧孔作为频率参考,把激光频率锁定在烧孔的中心。这种方法具有体积小、抗振动及不受环境温度波动影响的特点,有可能实现激光稳频系统的小型化以及可搬运性。但是,烧孔晶体需要工作在极低温的环境中,并且对被锁定激光的

频率稳定性有较高要求,因此晶体烧孔目前还不能替代通常采用的光腔。

“坏腔激光”<sup>[40]</sup>可能是获得高稳定度、超窄线宽激光的另一个完全不同的途径。“坏腔激光”的一个显著特点是不需要外部的频率参考。这种激光的增益介质的带宽远小于谐振腔的线宽,这与普通激光是完全相反的,使得激光的频率由增益介质的中心频率所决定,受激光谐振腔的影响大大降低,对腔的热噪声不敏感。但这种激光的结构比较复杂,其中还存在一些难点,目前仍在研究中<sup>[41]</sup>。考虑到其不受光腔热噪声限制的这一优势,“坏腔激光”作为光频率标准中钟频激光的一种替代方案,是非常值得探索的一种全新的方法。

窄线宽激光的另一个发展趋势是研制可搬运、甚至可以在空间可靠运转的稳频激光系统。在这一类应用中,需要激光本身及参考光腔的结构坚固可靠,同时光腔还能维持低的振动敏感度,这样锁定在光腔上的激光就能可靠地运转在各种各样的交通工具上,甚至是飞行器上。这对于像激光制导、光频的传递与比对等很多应用都是十分重要的。空间型稳频激光在如地球卫星重力测量、高精度星间激光干涉测距以及空间引力波探测等空间科学研究中都会发挥巨大的作用。

## 8 总结

窄线宽激光具有优秀的光谱特性,而被广泛地应用于多个研究领域,例如光频率标准、超稳微波信号产生、精密激光光谱、高精度激光干涉测量特别是引力波探测、及很多用来检验物理学基本原理的精密测量实验。这里介绍了激光稳频中所采用的各种方法,也回顾了激光稳频及相关领域的最新的研究进展。利用PDH稳频方法将激光频率锁定在高细度光腔的谐振峰上是目前获得超窄线宽激光的最有效的方法之一,围绕该稳频方法我们介绍了几种提高激光频率稳定度的重要措施和其中所涉及的一些科学问题。

激光稳频是一个不断发展,充满活力的研究

领域,目前还在不断地涌现出各种富有创造性方法和技术,同时也依然存在着非常具有挑战性的科学问题和技术难点,例如怎样进一步降低光腔热噪声等难点问题。这些问题在等待着人们,特别是年轻一代科学家的不懈的努力。随着对激光

稳频原理的不断深入探索及相关技术的进步,高稳定激光的性能仍将不断地提升,从而在基础科学研究、高技术以及科技创新中发挥更加重要的作用。

## 参考文献

- [1] Hall J L, Ma L S, Taubman M *et al.* IEEE Trans. Instrum. Meas., 1999, 48(2):583
- [2] Negnevitsky V, Turner L D. Opt. Express, 2013, 21(3):3103
- [3] Pearman C P, Adams C S, Cox S G *et al.* J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys., 2002, 35(24):5141
- [4] Lin D, Dai G, Yin C *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2006, 77(12):123301
- [5] Ye J, Robertsson L, Picard S *et al.* IEEE Trans. Instrum. Meas., 1999, 48(2):544
- [6] Pound R V. Rev. Sci. Instrum., 1946, 17(11):490
- [7] Bjorklund G C. Opt. Lett., 1980, 5(1):15
- [8] Cundiff S T, Ye J. Rev. Mod. Phys., 2003, 75(1):325
- [9] Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85(11):2264
- [10] Ma L S, Bi Z, Bartels A *et al.* Science, 2004, 303(5665):1843
- [11] Millo J, Abgrall M, Lours M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 94(14):141105
- [12] Lan S Y, Kuan P C, Estey B *et al.* Science, 2013, 339(6119):554
- [13] Giorgetta F R, Swann W C, Sinclair L C *et al.* Nat. Photonics, 2013, 7(6):434
- [14] Eisele C, Nevsky A Y, Schiller S. Phys. Rev. Lett., 2009, 103(9):090401
- [15] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V *et al.* Appl. Phys. B, 1983, 31(2):97
- [16] Young B C, Cruz F C, Itano W M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82(19):3799
- [17] Notcutt M, Ma L S, Ye J *et al.* Opt. Lett., 2005, 30(14):1815
- [18] Li L, Shen H, Bi J *et al.* Appl. Phys. B, 2014, 117(4):1025
- [19] Wu L, Jiang Y, Ma C *et al.* Sci. Rep., 2016, 6:24969
- [20] Keller J, Ignatovich S, Webster S A *et al.* Appl. Phys. B, 2014, 116(1):203
- [21] Hagemann C, Grebing C, Lisdat C *et al.* Opt. Lett., 2014, 39(17):5102
- [22] Kessler T, Hagemann C, Grebing C *et al.* Nat. Photonics, 2012, 6(10):687
- [23] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B *et al.* Science, 2013, 341(6151):1215
- [24] Ushijima I, Takamoto M, Das M *et al.* Nat. Photonics, 2015, 9(3):185
- [25] Nemitz N, Ohkubo T, Takamoto M *et al.* Nat. Photonics, 2016, 10(4):258
- [26] 周炳琨,高以智,陈倜嵘等.激光原理(第5版).北京:国防工业出版社,2004,179—181
- [27] Di Domenico G, Schilt S, Thomann P. Appl. Opt., 2010, 49(25):4801
- [28] Shen H, Li L, Bi J *et al.* Phys. Rev. A, 2015, 92(6):063809
- [29] Shen H, Wang C, Li L *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2013, 84(5):055002
- [30] Ren L Q, Zhu S, Xu G J *et al.* Acta Phys. Sin., 2014, 63(9):90601
- [31] Zhang J, Luo Y X, Ouyang B *et al.* Eur. Phys. J. D, 2013, 67(2):46
- [32] Chen L S, Hall J L, Ye J *et al.* Phys. Rev. A, 2006, 74(5):53801
- [33] Ma L S, Jungner P, Ye J *et al.* Opt. Lett., 1994, 19(21):1777
- [34] Numata K, Kemery A, Camp J. Phys. Rev. Lett., 2004, 93(25):250602
- [35] Haefner S, Falke S, Grebing C *et al.* Opt. Lett., 2015, 40(9):2112
- [36] Cole G D, Zhang W, Martin M J *et al.* Nat. Photonics, 2013, 7(8):644
- [37] Kondratiev N M, Gurkovsky A G, Gorodetsky M L. Phys. Rev. D, 2011, 84(2):022001
- [38] Kefelian F, Jiang H F, Lemonde P *et al.* Opt. Lett., 2009, 34(7):914
- [39] Cook S, Rosenband T, Leibrandt D R. Phys. Rev. Lett., 2015, 114(25):253902
- [40] Yu D S, Chen J B. Phys. Rev. Lett., 2007, 98(5):050801
- [41] Westergaard P G, Christensen B T R, Tieri D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 114(9):093002