

低相噪光学频率梳

韩海年[†] 魏志义^{††}

(中国科学院物理研究所 光物理重点实验室 北京 100190)

2016-05-30收到

[†] email: hnhan@iphy.ac.cn

^{††} email: zywei@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160705

Low phase noise optical frequency comb

HAN Hai-Nian[†] WEI Zhi-Yi^{††}

(Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘 要 光学频率梳是光钟的重要组成部分,相噪是光梳的基本特性。文章从光梳相噪的描述方法入手,对光学频率梳相噪产生的几种常见来源及相噪抑制技术进行了综述,详细介绍了业已实现的几种低相噪光学频率梳。文末展望了未来低相噪光学频率梳的发展新趋势。

关键词 光学频率梳, 相位噪声, 锁相环反馈, 移频前置反馈

Abstract Phase noise is a fundamental characteristic of an optical frequency comb (OFC). Low phase noise OFCs are powerful tools for the comparison of different optical clocks, precision spectroscopy, and time and frequency transfer. After a description of the phase noise, we summarize the noise sources affecting OFCs and the techniques for suppressing the noise, and present several low phase noise OFC systems developed in our lab. Finally, we review the prospects for future developments.

Keywords optical frequency comb, phase noise, phase-locked-loop, forward-feedback frequency shift

1 引言

20世纪末实现的飞秒光学频率梳发展至今已将近二十年^[1, 2],在带动光钟计量领域飞速发展的同时^[3, 4],也不断开拓出新的应用领域,如阿秒的产生^[5, 6]、基本物理常数测量^[7, 8]、高精度时频基准和传递^[9]、天文光谱^[10]、长度测量^[11]等等,无不与光梳技术的发展息息相关。衡量光学频率梳性能的一个重要指标是稳定性,稳定性分为长稳和短稳,光学频率梳的长稳取决于参考源,短稳取

决于对相噪的抑制。不同的应用对于光梳长稳和短稳的要求不同,比如,在光钟、光频比对、时频传递等应用中,光学频率梳作为组成光钟的三大部件之一,随着光钟的稳定度达到 10^{-18} 量级,对光钟计时和比对传递工具的光学频率梳的稳定度要求必须优于 10^{-19} ,相噪线宽要求小于1 Hz。因此,低相噪的光学频率梳是实现高精度光钟的必要条件,同时为高精度时频、高精密度测量提供了强大的工具。

目前,成熟的光学频率梳根据增益介质分为钛宝石光梳^[1, 2]、光纤光梳^[12, 13]及全固化光梳^[14, 15]等。另外,近几年还有半导体光梳^[16, 17]、微腔光梳^[18, 19]等新型光梳技术出现,但是它们具有超高

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2012CB821304)、国家自然科学基金(批准号:11078022, 61378040)资助项目

重频、低稳定度的特性，主要用于微波光子学、光通信、快速光电采样等领域，本文不讨论这类光梳。前三种作为光梳发展主流，钛宝石光梳是最先实现商业化的光梳，1999年钛宝石光梳首次实现载波包络相移频率的测量及锁定，并用于光频绝对值测量，两台钛宝石光梳直接比对的结果验证了光梳具有 10^{-19} 的稳定度传递能力^[20]，这一报道成为2005年光梳技术被授予诺贝尔物理学奖的重要佐证之一。相比钛宝石光梳在相噪方面的天生丽质，光纤光梳由于光纤飞秒激光器高增益、高损耗的谐振腔特点，导致本身输出就携带了大量的噪声，因此对于光纤光梳的相噪抑制需要更多倚重于腔外的电路反馈控制，但是光纤光梳的优势在于结构上更紧凑，操作更方便，价格更低廉，而且在抗环境干扰及长期保持稳定运行状态方面具有无可比拟的优良性能，所以即使在噪声及高重复频率获得方面有一些劣势，但是由于极高的实用价值令人们将更多的关注放在了光纤光梳上，而光纤光梳从2000年提出至今发展异常迅速，现在基本上有取代钛宝石光梳的趋势。全固化光梳的相噪性能介于钛宝石和光纤之间，一方面全固化光梳可采用半导体激光泵浦，使体积和价格大大降低，另一方面全固化的锁模技术和钛宝石类似，因此操作性和长期运行方面不及光纤，目前没有见到有商用的全固化光梳，实验室科研用全固化光梳的主要研究点也是集中在高功率的时域应用，在频率方面的应用较少。

决定光梳性能的最重要的特性是相噪，不同光梳相噪已经从噪声源、抑噪办法及噪声评估等多方面被充分研究过，比如对泵浦源引入噪声的分析^[21]，振荡器及放大色散特性引入的噪声研究^[22]，高非线性光纤引入的相噪分析^[23]，电路前反馈实时移频降噪技术研究^[24]，不同光梳直接比对的噪声评估^[25]等等。本文首先对光梳的噪声定义做简要说明，梳理影响光梳相噪的各种原因，总结降低相噪的技术，然后介绍我们最近在低相噪钛宝石光梳、光纤光梳及全固化光梳方面的研究工作，最后对低相噪光梳未来的发展趋势进行了展望。

2 光学频率梳相噪一般描述

2.1 噪声功率谱密度与线宽

光梳相位噪声的概念来自电磁波的噪声扰动。电场中噪声分为强度和相位两种。强度噪声指的是电场幅度抖动，相位噪声指的是电场相位的抖动。我们在光梳特性分析中重点关注的是相位抖动，因为相位抖动表现在时域中就是光场时间上的抖动，表现在频域中就是频率的抖动，这在很多要求同步和频率稳定的研究中是至关重要的决定因素。

简单来说，光学频率梳的相噪指的是单个梳齿，也就是单个纵模的相位噪声，已知光学频率梳的每个梳齿都可以用公式 $f_n = nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$ 表示，其中 f_{ceo} 是相邻飞秒脉冲之间的载波包络相移频率， f_{rep} 表示重复频率， n 是纵模数。因此，每个梳齿频率的噪声也由重频噪声和载波包络相移频率噪声决定，而在重频噪声之前还要乘一个 10^6 量级的纵模数，因此重频的噪声将是光梳噪声的决定因素。在相噪定量的分析方法中，通常是采用噪声功率谱密度来进行的定义：

$$S_\phi(f) = \phi^2(f) \frac{1}{BW}, \quad (1)$$

式中 BW 是测量系统的带宽，单位是Hz，噪声功率谱密度为单边功率谱密度，即频率 f 的范围为正($0 \rightarrow +\infty$)， $\phi(f)$ 是相位噪声偏差。噪声功率谱密度 $S_\phi(f)$ 给出了单位频率内不同傅里叶频率噪声的抖动大小，单位可以用 rad^2/Hz 或 Hz^2/Hz ，而我们有时感兴趣的是相位噪声与载波之间的关系，因此用 $\mathcal{L}(f)$ 表示相位噪声单边功率谱密度和信号功率的比率：

$$\mathcal{L}(f) = \frac{\text{相位噪声单边功率谱密度}}{\text{信号功率}} = \frac{S_\phi(f)}{2}, \quad (2)$$

$\mathcal{L}(f)$ 通常取 $\log$ 值，单位为 dBc/Hz 。

有了定量的噪声功率谱数据，可以通过积分运算得到相位抖动及时间抖动的数值：

$$A = \int_{f_1}^{f_2} \mathcal{L}(f) df. \quad (3)$$

$$\text{相位抖动(弧度)} = \sqrt{2 \times 10^{4/10}}, \quad (4)$$

$$\text{时间抖动(秒)} = \frac{\sqrt{2 \times 10^{4/10}}}{2\pi f_0}. \quad (5)$$

可见, 相位抖动和时间抖动是取一段噪声频率区间(f_1, f_2), 并对这个区间内的所有噪声功率进行积分得到的数值, 因此在提到相噪或进行不同光梳的相噪比较时, 必须要指出所包含的噪声频率范围, 如[1 Hz, 1 MHz]或[10 Hz, 100 kHz]等等, 不同的频率范围得到的相噪是不同的, 一般只有在相同傅里叶频率范围内的相噪大小比较才有意义。时间抖动是相位抖动在时域上的具体表现, 光梳关注的是频率的抖动, 时间抖动是光梳技术用于阿秒脉冲产生这些强场物理实验时, 人们所关注的一个指标。

还有一个常用的描述激光噪声特性的参数是激光线宽, 线宽与噪声有密不可分的关系, 物理上线宽实际就是由噪声引起的, 一个完全没有噪声的连续激光, 对应的光谱线宽就是0, 因此线宽的大小反映了激光噪声的大小。通常情况下, 因为在低频段的频率噪声会有所偏离, 比如存在 $1/f$ 噪声, 因此在提到线宽时必须指定一个观察时间, 比如1 ms的线宽是多少, 类似于计算相位抖动和时间抖动时需要指定频率范围。光梳的线宽指的是单个梳齿的线宽, 实验上通过光梳与一个窄线宽的连续激光进行拍频, 测量这个位于射频波段的拍频信号的线宽就可以得到光梳的线宽。这是一个独立的数值, 提供了对光梳梳齿频率噪声功率谱密度的完全描述, 可以说在实验上相对容易得到。当然, 线宽也可以通过噪声功率谱曲线数据直接推导出来, 对几种简单的噪声功率谱曲线形状, 有几篇文献已经推导出了它们的线宽, 这在下面将介绍。

噪声功率谱密度、相位抖动、时间抖动、线宽是从不同的角度描述了光梳的相位噪声特性, 而且光梳由于包含大量的纵模成分, 每个纵模梳齿光频实际上都对应了不同的相噪, 这在下面的噪声源分析中可以看出, 不同的纵模频率的相噪实际是不同的, 对于 f_{ceo} 的相噪分析, 由于它本身就位于射频波段, 所以可以直接用频谱分析

仪测量到 f_{ceo} 信号进行噪声功率谱分析, 进而测量出线宽。

2.2 噪声源及其对光梳相噪和线宽影响的分析

光学频率梳相噪的来源可以分为两类^[26]: 一类是腔内的, 另一类是腔外的。所谓腔内的噪声, 指的是对飞秒激光振荡器本身, 包括环境(温度、气流、振动等)对振荡器腔长的影响, 泵浦源强度噪声的影响, 飞秒激光振荡器内放大的自发辐射(ASE)的影响, 色散的影响, 等等; 所谓腔外的噪声, 指的是经过激光放大、超连续产生、传输环境、探测器等等的影响, 包括放大过程ASE影响, 超连续产生中的非线性因素影响, 环境对光传输的影响及探测器的散粒噪声影响等。这两类噪声源对光梳相噪的影响具有本质的不同。

首先, 光梳对腔内噪声的敏感性远远大于腔外噪声。这是因为振荡器的谐振功能使得相同的噪声抖动在腔外引起的是相位噪声, 而在腔内则会引起频率噪声。比如, 腔外长度的变化使光梳电场引入了一个相位漂移, 而腔内长度的变化则会由于光脉冲往复多次的振荡导致光场频率的漂移; 还有, 在腔外放大过程中的ASE效应会导致一个白相位噪底, 而腔内的ASE则会引入白频率噪底, 导致量子噪声极限的重复频率变化和光梳纵模频率变化。总之, 腔内噪声会加宽光梳的线宽, 而腔外噪声则会使噪底升高, 降低光梳的可视性, 也就是降低信噪比。

另外, 腔内噪声可以进行定量分析和控制, 而腔外噪声则不能。腔内噪声的分析可以采用“定点”法, 外加噪声法等, 控制可以通过电路反馈飞秒激光振荡器来实现, 而腔外噪声由于一定的随机性, 无法做到定量分析和控制。腔内噪声定量分析的前提是基于这样基本的假设: 噪声对脉冲串的干扰是通过调制脉冲能量、载波频率、脉冲到达时间和最低阶的载波相位实现的, 即噪声不能打断脉冲串或将一个梳齿的噪声附加到其他梳齿上。在频域上, 基本梳结构要保持不变, 噪声仅仅从时间上影响频梳方程, 也就是方

程 $f_n = nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$ 变为 $f_n(T) = nf_{\text{rep}}(T) + f_{\text{ceo}}(T)$, 这里 T 相对于腔内往返时间是慢变的, 因此, 噪声对于光梳每个梳齿的影响最终可以归结为对重复频率的影响和对载波包络相移频率的影响。而腔外噪声对光梳噪声的影响比较复杂, 有一定不规则性和随机性。比如, 超连续光谱对探测器的散粒噪声的影响由于超连续中各光谱成分强度不同导致散粒噪声也不一样, 这样的噪声无法进行控制, 而腔外环境变化引起的程长改变对每个梳齿的噪声影响是相同的, 这样的噪声就可以用电路反馈进行控制。

下面从噪声功率谱密度和线宽角度来看看腔内噪声和腔外噪声是如何影响光梳相噪的。

假设各个噪声源是相互独立互不干扰的, 则光梳的噪声功率谱密度可以写为

$$S_{\text{fn}} = \left(S_{\text{fn}}^{\text{length}} + S_{\text{fn}}^{\text{loss}} + S_{\text{fn}}^{\text{pump}} + S_{\text{fn}}^{\text{ASE}} \right) + \left(S_{\text{fn}}^{\text{supercontinuum}} + S_{\text{fn}}^{\text{shot noise}} + S_{\text{fn}}^{\text{length, ext}} \right),$$

式中第一个括号中是腔内噪声, 第二个括号中是腔外噪声, 文献[26]中以铒光纤光梳为例, 选取 f_{ceo} 、1535 nm 梳齿、1126 nm 梳齿做噪声功率谱密度曲线图, 如图1所示, 可以看到有几个规律性: 第一, 环境噪声的影响在低频段, 泵浦噪声影响在低—中频段, 量子极限噪声在偏高频段, 最后腔外超连续噪声、散粒噪声引入的是高频段的白噪声。第二, 各不同噪声源之间的转折频率取决于梳齿的位置。例如, 在频梳的两翼, 环境噪声在 500 Hz 以下, 泵浦噪声在 500 Hz—50 kHz, 量子极限噪声在 50 kHz—500 kHz, 超连续和散粒噪声在 500 kHz 以上。在铒光纤光梳中心频率处(1500 nm), 不存在泵浦和量子极限噪声, 环境噪声在 50 Hz—100 kHz, 超连续和散粒噪声在更高的频率。根据图1的噪声功率谱曲线分布, 还可以推导出光梳线宽, 由于线宽由腔内噪声决定, 所以在计算线宽时不考虑腔外噪声的影响, 如图2所示, 可以看出在不同的光梳梳齿位置, 线宽是不同的, 中心波长处的线宽最窄, 两翼的频率线宽逐渐加宽, 对于载波包络相移频率来说相当于 0 Hz 的位置, 线宽最大, 通常在 100 kHz 量级, 这也和大多数的铒光纤光梳实验结果相吻合。

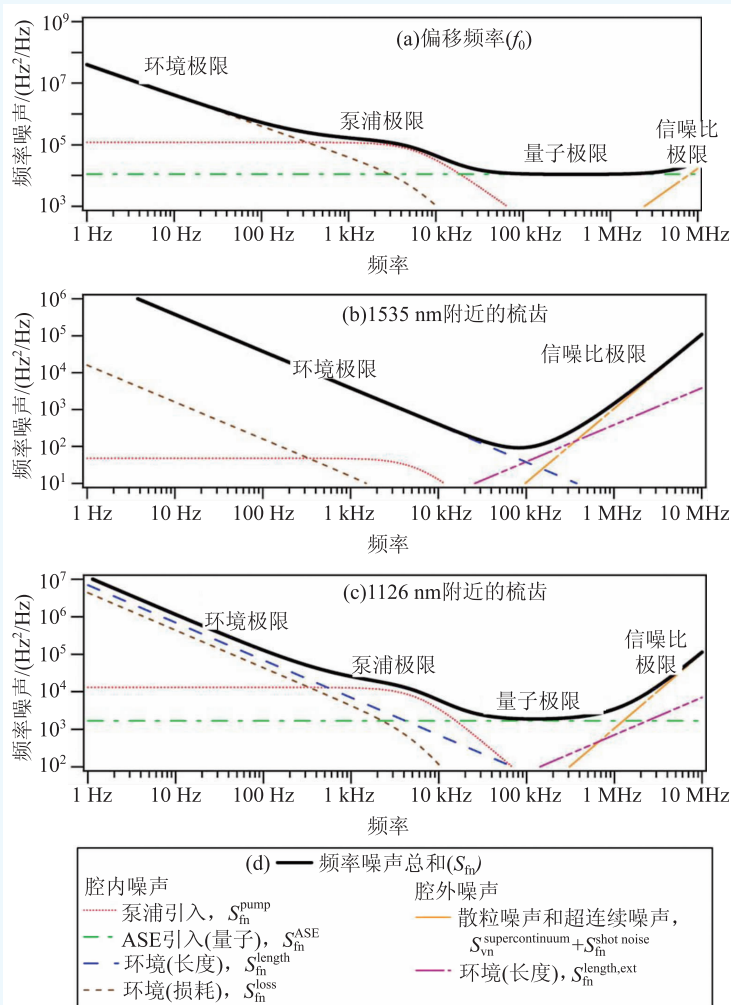


图1 以铒光纤光梳为例, 选取 f_{ceo} 、1535 nm 梳齿、1126 nm 梳齿做噪声功率谱密度曲线图(黑实线)。泵浦噪声为红线, 量子极限噪声为绿线, 环境噪声为蓝线, 腔损耗噪声为褐色线

3 光学频率梳噪声抑制设计及技术

从光梳噪声源的分析中可以看到, 如果想抑制光梳的噪声, 在设计光梳系统时需要考虑从以下几个方面考虑: 第一是环境噪声的隔离, 环境噪

声是指温度、气流、振动、声音等外界因素对光梳频率的影响,而且考虑到光梳对腔内噪声比腔外噪声更敏感,需要在对整个光梳系统做屏蔽、防震、温控、隔音设计时,单独将飞秒激光振荡器部分做重点封装,加强对外界环境的隔离;第二,从抑制腔内量子极限噪声出发,要选择和合理设计飞秒激光振荡器的腔型结构、锁模原理、色散控制等等,保证腔内脉冲谐振是最干净的放大受激辐射,尽量减少放大自发辐射、啁啾调制、多脉冲等引起的噪声效应;第三,泵浦源的强度噪声是引起腔内中高频噪声的最主要来源,因此对泵浦源的选择也很重要,如果泵浦源强度不稳,需要首先对泵浦源做强度噪声抑制处理,将泵浦源的噪声降下来,才有可能降低光梳的噪声;第四,腔外噪声中超连续的产生引起的噪声会增加光梳的白噪声背景,从而影响光梳的信噪比,因而要选择合适的高非线性光纤来产生超连续谱,或者不采用超连续产生,将彻底消除这部分噪声;第五,探测重复频率和载波包络相移频率的光电探测器引入的散粒噪声对信噪比提高不利,尽量选择噪声低的探测器或者其他外差平衡探测技术。

设计时考虑了以上的噪声抑制措施,建成的整个光梳源系统将处于相对比较稳定的状态,此时再采用电路锁相环反馈控制技术,主动控制影响光梳的两个重要因素——重复频率和载波包络相移频率,将大大降低光梳的相位噪声。采用锁相环电路反馈控制光梳相噪技术多种多样,得到的锁定效果和精度也不一样,从最初的直接对重复频率基频进行控制,到提取高次谐波进行控制,到提取光频拍频进行控制,相噪抑制得越来越好,得到的光梳的频率稳定度、噪声功率谱密度、相噪、线宽等等参数也越来越高,比如目前钛宝石和光纤光梳都能达到的 10^{-19} 的长期稳定性就是将光梳重复频率直接锁定在超稳激光上得到的结果。对于光梳载波包络相移频率的锁定,也提出了很多的技术降低相噪,比如采用差频技术测量 f_{ceo} ^[27],不需要高非线性光纤进行光谱扩展,可以将超连续产生的噪声直接去掉;采用前置反

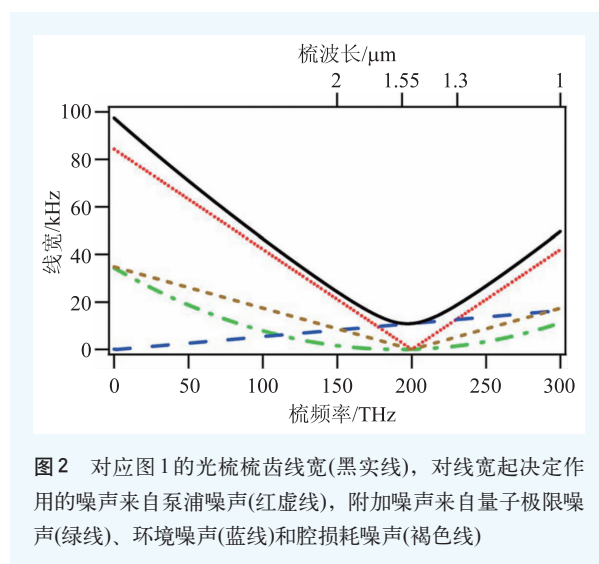


图2 对应图1的光梳梳齿线宽(黑实线),对线宽起决定作用的噪声来自泵浦噪声(红虚线),附加噪声来自量子极限噪声(绿线)、环境噪声(蓝线)和腔损耗噪声(褐色线)

馈移频技术^[24],将一个声光移频器放在腔外飞秒激光的光路中,直接把测量到的 f_{ceo} 信号施加到移频器上,就会实时将漂移的 f_{ceo} 频率拉回来。这种技术相比反馈锁相环电路,不受带宽限制,实际锁定结果得到了国际最高12 as的时间抖动。

采用锁相环电路做反馈控制振荡器参数是比较通用的光梳相噪控制办法,也得到了良好的锁定效果,但是最终限制光梳的线宽进一步压窄的因素有很多,跟锁相环带宽、驱动器的响应速度、锁定技术原理等等都有很大关系。为了得到性能最佳的光梳系统,需要从以上噪声源抑制、锁相环抑制等方面去平衡考虑,如果噪声源抑制措施做得好,也就是光梳本身的相噪特性较好,则对电路锁相环的抑噪要求就没那么高,而如果在噪声源上抑制得不好,也就是说光梳天生就携带了很多的噪声,则在锁相环电路设计上就要做更多的考虑。稳定的光梳是源和锁相电路两者综合平衡的结果。

4 几种低相噪光学频率梳

4.1 基于差频测量 f_{ceo} 的单块钛宝石光学频率梳

传统的测量光梳 f_{ceo} 的技术叫自参考技术,需要将光梳光谱扩展到大于一个倍频程,然后利用倍频程中的高频成分和低频成分的倍频做拍频,

得到 f_{ceo} 信号。这个超连续产生过程会引入腔外随机噪声,增加了光梳的白噪底,进而影响测量到的拍频信噪比,如果锁相环电路的带宽不够宽,则引入的白噪底不能有效抑制,锁定后仍然会有剩余噪声。

2009年我们曾报道基于差频技术测量 f_{ceo} 的宽谱钛宝石光梳^[28],差频技术采用近倍频程的宽光谱飞秒振荡器作为光梳源,不需要非线性光纤扩展光谱,而是直接入射到一块PPLN晶体中产生差频,通过差频光与基频光在近红外部分的重叠区拍频得到 f_{ceo} 信号,这样得到的 f_{ceo} 信号没有超连续产生引入的噪声,短期相噪和长期稳定性都大大提高,经过锁相环电路锁定后,相位噪声为242 mrad。2015年我们采用相同的技术^[29],对机械结构封装等做了重新设计,搭建了一套83 MHz的差频钛宝石光梳,测量到的 f_{ceo} 信号信噪比高达58 dB,如图3所示(图中RBW为频谱仪的分辨率),自由运转的线宽应该小于1 kHz,经电路锁定后噪声功率谱密度如图4(b)所示,积分后相位噪声为55 mrad,对应时间抖动23 as,图4(a)是 f_{ceo} 信号锁定后的频谱曲线,线宽有明显的压窄,

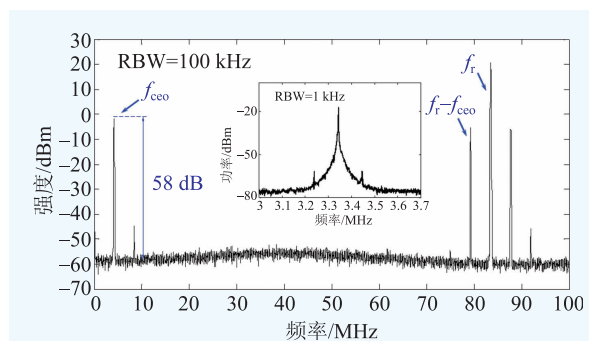


图3 f_{ceo} 信号和重复频率信号频谱图(自由运转情况)

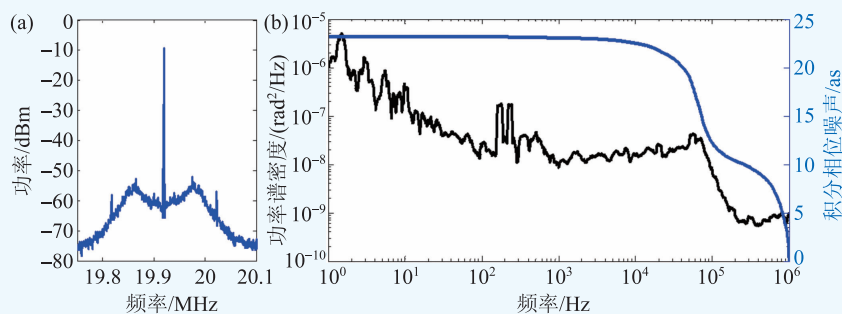


图4 锁定后 f_{ceo} 信号的线宽(a)及噪声功率谱密度和时间抖动(b)

在 f_{ceo} 频率两边有两个台阶,表明锁相环带宽被限制在200 kHz左右。

4.2 宽谱低相噪掺镱光纤光梳

近年来,光纤光梳技术及应用发展都非常迅速。光纤光梳最初实现时,由于半导体泵浦源较大的强度噪声导致光纤光梳本身携带很大的相位噪声,随着对半导体泵浦源电流纹波的控制精度越来越高,光纤光梳的相位噪声也慢慢降下来,现在光梳比对的结果证明,锁定后光纤光梳也可以具有与钛宝石光梳相同的稳定度和相噪。飞秒光纤振荡器实现锁模的技术有很多种,包括半导体可饱和吸收体锁模,偏振旋转锁模,碳纳米管、拓扑绝缘体吸收体锁模,8字型或9字型锁模等等,其中偏振旋转锁模腔内的自发辐射最小,经色散控制后可以得到最宽的光谱和最窄脉宽,因此最适合用于光梳。当然,其他锁模原理的光纤激光器也有建成光梳的,就像前面分析过的,如果源本身携带的噪声较大,则在电路锁定抑制噪声时就需要更高带宽的锁相系统,对锁相环电路的压力比较大。我们建成了一套250 MHz、基于NPR锁模的掺镱(Yb)光纤光梳^[30],腔内采用光栅对调节色散,有利于相噪的压低。图5是Yb光纤光梳的实验装置图,它由NPR锁模的飞秒振荡器、一级激光放大、单模拉锥光纤产生超连续谱、自参考测量 f_{ceo} 信号、两套锁相环电路(控制重复频率和 f_{ceo} 频率)组成,这里直接将重复频率和 f_{ceo} 频率都锁定到一个外部的微波频率源上,得到的 f_{ceo} 信号锁定前和锁定后都在100 kHz左右,

并没有明显的压窄(如图6所示),原因在于用于控制 f_{ceo} 的半导体激光电流调制速度不够快,因此高频的噪声抑制不够理想。从图7的噪声功率谱密度曲线也不难看出,相比钛宝石锁定后的噪声功率谱密度,光纤光梳在10 Hz到 10^5 Hz区间内的噪声比钛宝石

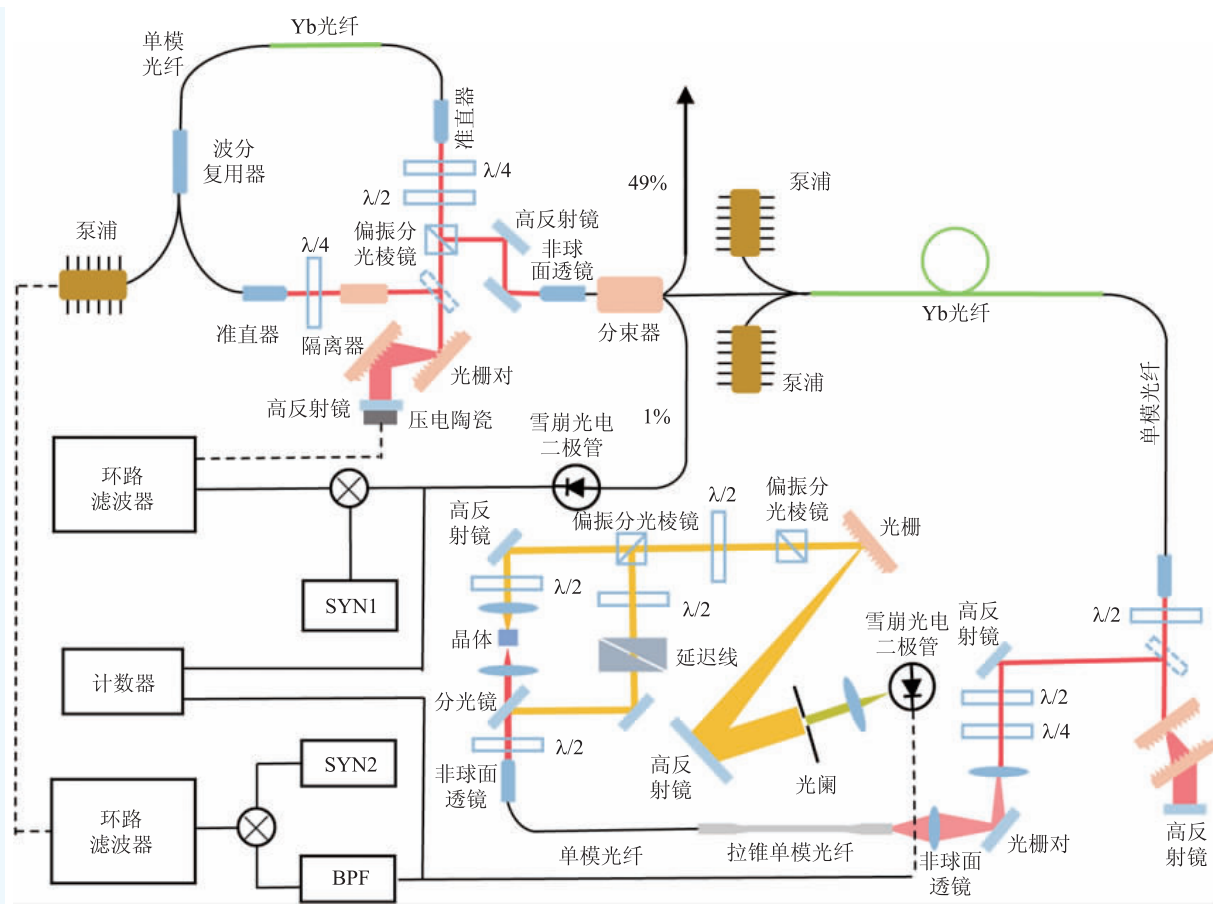


图5 基于偏振旋转锁模的Yb光纤光梳实验装置图(BPF为带通滤波, SYN为频率综合器)

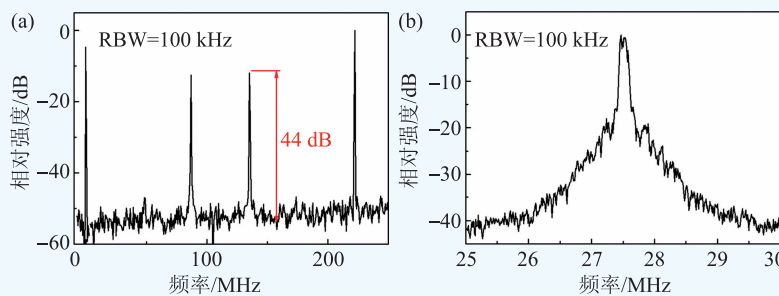


图6 f_{∞} 锁定前(a)和锁定后(b)的频谱图(RBW为频谱仪分辨率)

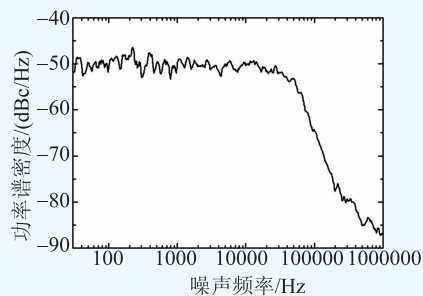


图7 f_{∞} 信号噪声功率谱密度曲线

大了将近三个数量级。我们目前正在光纤光梳振荡器腔内插入了一块铌酸锂晶体作为快速电光调制,正在尝试将光梳直接锁定到超稳激光上,如果实现后,光梳稳定度将比现在直接锁定在微波频率上提高至少三个数量级。

4.3 全固态掺镱铝酸钇钙(Yb: CYA)光学频率梳

全固态光梳性能介于钛宝石光梳和光纤光梳之

间,我们在实验室采用Yb: CYA晶体搭建了一套利用克尔透镜锁模的飞秒激光振荡器^[31],输出了重复频率80 MHz、脉宽45 fs、功率250 mW的飞秒脉冲,将这样的飞秒脉冲直接耦合进一段光子晶体光纤中产生超连续谱,随后采用简化的共轴单路自参考系统测量了 f_{∞} 信号,整个光梳装置如图8所示。这套光梳系统的泵源采用的是976 nm光纤激光器,相比半导体激光器,光纤激光的强度噪声低于半导体激光器,如图9所示,这从泵源方

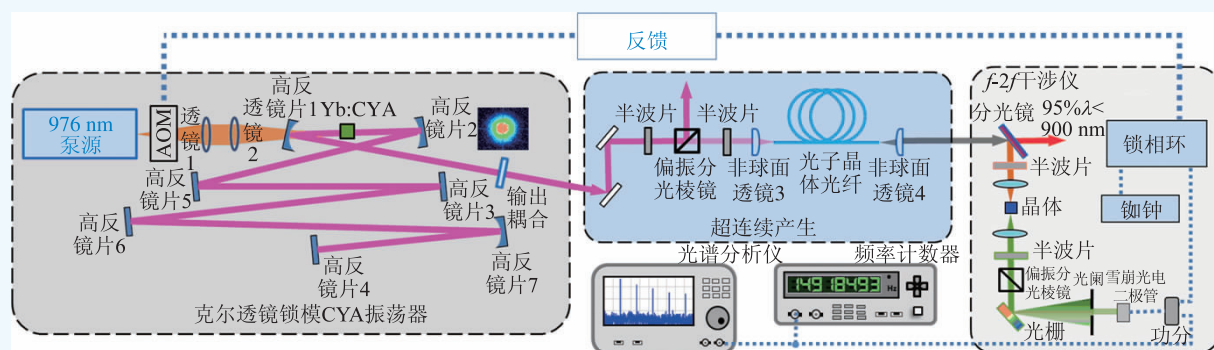


图8 基于克尔透镜锁模的Yb: CYA固体光学频率梳实验装置(AOM为声光调制器)

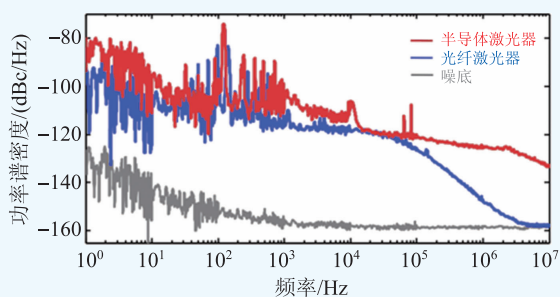


图9 光纤激光泵浦源与半导体激光泵浦源强度噪声比较

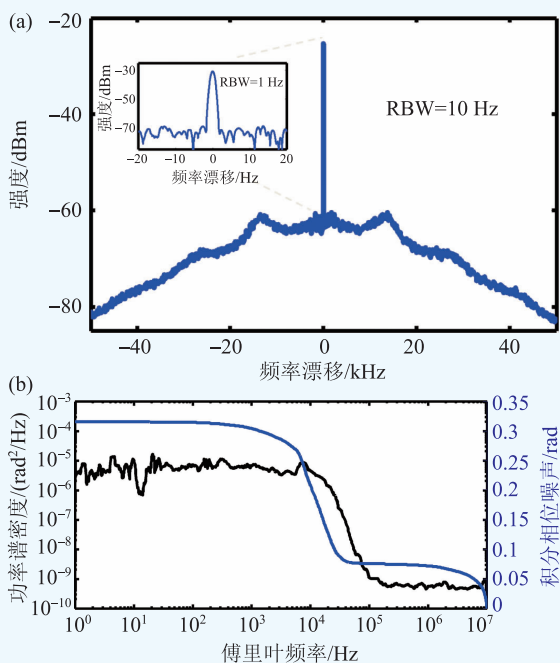


图10 锁定后 f_{co} 频谱图(a)及噪声功率谱密度和相位抖动(b)

面降低了光梳噪声。还有克尔透镜锁模原理相比可饱和吸收体锁模，可得到脉宽更短的飞秒脉冲，这样的高峰值功率的飞秒脉冲入射到PCF中产生超连续时引入的白噪声相对较低，有利于得

到高信噪比的 f_{co} 拍频信号，而且线宽较窄，信噪比可达42 dB，线宽小于100 kHz。经过锁相环电路锁定后， f_{co} 的半高全宽被大大压窄，如图10(a)所示，但是底部很高的噪声平台说明在40 kHz以内的噪声抑制得并不好，从图10(b)显示的噪声功率谱密度曲线中也可以看出这一点。

以上三个实验我们只比较了 f_{co} 的锁定及相噪情况，光梳梳齿与连续激光拍频的相噪分析还正在进行，这里没有给出结果。在锁定 f_{co} 时用的都是同一个锁定电路，钛宝石光梳和CYA光梳的控制办法是采用驱动声光调制器(AOM)改变泵浦光功率，光纤光梳是直接调制半导体激光器的驱动电流，这里AOM响应速度在1 MHz以上，电流调制频率被限制在100 kHz。锁定后的结果表明，钛宝石光梳由于泵浦噪声小，加之没有超连续产生引入噪声，因此本身携带相噪较小，经过锁相环反馈后，相噪抑制和线宽压缩效果最好。全固化光梳 f_{co} 经电路压缩后，线宽也有明显的压窄，只有光纤光梳的线宽在锁定前和锁定后没有明显变化，这说明锁相环电路相同的情况下，AOM和半导体激光器驱动电流调制方法的响应速度最终决定了相噪的抑制效果，如果在光纤光梳内采用高速电光调制器(EOM)或AOM进行调制^[32]，光纤光梳 f_{co} 的线宽也会被压窄。

5 结论与展望

光钟精度的提高对光学频率梳的相噪提出了更高的要求，如何得到更低相噪的光学频率梳将

是频标领域发展的一个重要课题。光学频率梳的相噪产生与腔内和腔外噪声源有关,因此对于相噪的抑制也要首先从源头进行,比如环境噪声的隔离、做好控温隔振等措施。尤其关键的是,光梳的源头飞秒激光振荡器的设计至关重要,要尽量控制腔内 ASE 噪声到量子噪声极限,这就需要从锁模原理、色散补偿、腔型设计等方面进行精细考虑。我们研究组的三项工作(钛宝石光梳、Yb 光纤光梳、CYA 全固化光梳)中,飞秒振荡器选择的都是快速的非线性效应锁模,钛宝石光梳和 CYA 光梳采用克尔透镜锁模,Yb 光纤光梳采用偏振旋转锁模,同时腔内的色散也要尽量控制到 0 色散,以保证腔内参与锁模的纵模数最多,从而得到最宽光谱和最短脉冲输出,避免了腔内直流噪声。有文献从理论上计算得到,量子噪声极限的振荡器输出的激光线宽在可见和中红外波段小于 1 kHz,只有钛宝石飞秒激光振荡器能够做到这一点,说明从源头来说,钛宝石光梳的内在噪声性能是最低的,光纤光梳和全固化光梳由于泵

源噪声、损耗噪声等等引入的附加噪声导致自由运转线宽在大于 10 kHz 量级,需要经过后续电子锁相环电路的压缩实现跟钛宝石光梳相同的相噪量级。当然,最终的抑制结果显示控制后的光纤光梳具有与钛宝石光梳相同的稳定度水平,加之光纤光梳结构简单、价格低廉、维护方便等等特性,导致光纤光梳的发展异常迅速,在低功率频率应用领域有逐渐取代钛宝石光梳的趋势,如光钟、时频传递、精密光谱学等领域,但是钛宝石保持了高重复频率和天生低相噪的优点,在某些高功率时间应用领域,比如阿秒产生、高次谐波产生等,还是有不可替代的作用。全固化光梳的应用目前还没有具体报道,但是根据全固化的特点,有望于在薄片高功率激光方面进行 f_{∞} 噪声控制后^[33],用于下一代高通量阿秒光源产生中。

致 谢 感谢中国科学院物理研究所光物理实验室博士研究生于子蛟、谢阳、庞利辉、张子越在低相噪光学频率梳方面所做的实验工作。

参考文献

- [1] Apolonski A, Poppe A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85(4): 740
- [2] Jones D J, Diddams S A *et al.* Science, 2000, 288: 635
- [3] Hinkley N, Sherman J A *et al.* Science, 2013, 341: 1215
- [4] Huang Y, Guan H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 013001
- [5] Hentschel M, Kienberger R *et al.* Nature, 2001, 14: 509
- [6] Kienberger R, Hentschel M *et al.* Science, 2002, 297: 1144
- [7] Fortier T M, Ashby N, Bergquist J C. Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 070801
- [8] Parthey C G, Matveev A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 104: 33001
- [9] Giorgetta F R, Swann W C *et al.* Nature Photonics, 2013, 7: 434
- [10] Braje D A, Kirchner M S *et al.* European Physical Journal D, 2008, 48: 57
- [11] Coddington I, Swann W C *et al.* Nature Photonics, 2009, 3: 351
- [12] Washburn B R, Diddams S A *et al.* Opt. Lett., 2004, 29: 250
- [13] Ruehl A, Marcinkiewicz A *et al.* Optics Letters, 2010, 35(18): 3015
- [14] Meyer S A, Squier J A *et al.* Eur. Phys. J., 2008, 48: 19
- [15] Stumpf M C, Pekarek S *et al.* Appl. Phys. B, 2010, 99(3): 401
- [16] Delfyett P J, Gee S *et al.* J. Lightwave Technol., 2006, 7: 2701
- [17] Ozdur I, Akbulut M *et al.* Conference-lasers&Electro-optics Society Meeting-leos, 2009. 491—492
- [18] Del'Haye P, Schliesser A *et al.* Nature, 2007, 450: 1214
- [19] Kippenberg T J, Diddams S A *et al.* Science, 2011, 332(6029): 555
- [20] Ma L S, Bi Z Y *et al.* Science, 2004, 303(5665): 1843
- [21] Vernaleken A, Schmidt B *et al.* Opt. Express, 2012, 20: 18387
- [22] Helbing F W, Steinmeyer G *et al.* Appl. Phys. B, 2002, 74: S35
- [23] Corwin K L, Newbury N R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 90(11): 113904
- [24] Koke S, Grebing C *et al.* Nat. Photonics, 2010, 4: 462
- [25] Kubina P, Adel P *et al.* Opt. Express, 2005, 13: 904
- [26] Newbury Nathan R, Swann William C *et al.* J. Opt. Soc. Am. B, 2007, 24(8): 1756
- [27] Takao Fuji, Jens Rauschenberger *et al.* Opt. Lett., 2005, 30: 32
- [28] Zhang W, Han H N *et al.* Opt. Express. 2009, 17: 059
- [29] 于子蛟, 韩海年, 谢阳等. Chinese Physics B, 2016, 25 (4): 044205
- [30] 谢阳, 韩海年, 庞利辉等. Chinese Physics B, 2016, 25 (4): 044208
- [31] Yu Z J, Han H N *et al.* Optics express, 2016, 24(3): 3103
- [32] Lee C C, Mohr C, Bethge J *et al.* Opt. Lett., 2012, 7(15): 3084
- [33] Pronin O, Seidel M *et al.* Nat. Commun., 2015, 6: 6988