

傅里叶极限分辨率的激光线宽测量

侯慧芳^{1,2}, 景明勇^{1,2}, 胡建勇^{1,2}, 秦成兵^{1,2}, 肖连团^{1,2*}, 贾锁堂^{1,2}

¹ 山西大学激光光谱研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

² 山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 提出了一种基于时间分辨及傅里叶变换测量激光线宽的方法, 其分辨率仅受限于傅里叶极限。在实验上通过时间分辨方法测量了半导体激光器和光纤激光器的线宽, 并与射频频谱分析的方法进行比较。对两种激光器在不同积分时间内进行线宽测量, 结果证明这种傅里叶极限线宽测量的方法相比于射频频谱分析的方法具有更小的测量误差, 通过时间分辨方法获取频谱信息具有实时采集的优势。

关键词 激光器; 线宽测量; 时间分辨; 傅里叶极限分辨率

中图分类号 O434

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.081402

Laser Linewidth Measurement at Fourier Limit Resolution

Hou Huifang^{1,2}, Jing Mingyong^{1,2}, Hu Jianyong^{1,2}, Qin Chengbing^{1,2},
Xiao Liantuan^{1,2*}, Jia Suotang^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

² Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract A method for measuring laser linewidth at Fourier limit based on time resolution and Fourier transform is proposed, whose resolution is limited by Fourier transform. In experiments, the linewidths of a fiber laser and a semiconductor laser are measured by the time-resolved method, which are compared with those by the traditional radio frequency (RF) spectral methods. The linewidth measurement results of these two lasers under different integration time show that the proposed measurement method at Fourier limit has smaller measurement errors than those by the RF spectral analyzer. Moreover, the acquisition of spectral information by the time-resolved method has the advantage of real-time acquisition.

Key words lasers; linewidth measurement; time resolution; Fourier limit resolution

OCIS codes 140.3425; 140.3510; 300.3700

1 引言

窄线宽激光器因其具有极好的单色性, 在超高精度和超远距离激光测距^[1]、光纤传感^[2]、卫星及光纤通信^[3]、精密测量^[4]、精密光谱^[5]等领域具有极其广泛的应用。激光器的噪声特性会显著影响系统的性能, 低噪声电源的发展使得现在商用激光器的强度噪声接近散粒噪声极限^[6]。与之相比, 激光器的

频率稳定性相对较差, 所以其频率噪声特性成为了衡量激光器性能优劣最重要的指标。因此, 研究不同积分时间内的激光频率噪声特性以表征光源噪声对系统性能的影响具有重要的应用意义^[7]。

表征激光器频率噪声特性的方法主要有激光器频率噪声谱密度^[8]、阿伦方差^[9]以及激光器线宽^[10]。其中, 激光线宽能够直观反映激光器频率噪声对系统性能的影响^[11]。准确测量不同积分时间

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2018-10-26; 录用日期: 2018-11-22

基金项目: 国家 973 计划(2017YFA0304203)、国家自然科学基金(61527824, 11434007, 61875109)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R70)、山西省“1331 工程”重点学科建设计划和高等学校学科创新引智计划(111 计划)(D18001)

* E-mail: xlt@sxu.edu.cn

内的激光线宽,便可精确预计在一定测量时间内激光器频率噪声对探测系统性能的影响。为了实现激光线宽的测量,需要将未知激光的频率信息转化为电子器件可测量的频率信号。目前激光线宽测量的方法主要有延时自外差法^[12-13]和差拍测量法^[14-15]。延时自外差法在测量较窄的激光线宽时,需要较长的延时光纤,其适合测量的线宽通常在千赫兹量级^[16-17]。差拍测量的方法则需要将未知激光器的频率信号与噪声相对较小的参考激光器频率信号进行拍频,理论上最小的线宽测量极限取决于参考激光器的线宽,该方法是目前针对窄线宽激光器线宽测量的主要方法之一。

在传统的测量手段中,参考激光与被测激光的拍频信号由频谱分析仪(SA)进行采集并分析,进而获得激光线宽。频谱分析仪的扫描工作方式导致其单次测量时间远大于由分辨率带宽决定的积分时间,因此在单次测量过程中,积分时间以外的激光频率噪声也会影响系统性能,降低频谱测量的精度。另外,在实际测量中,往往会通过多次平均的方式减小测量误差。但是多次平均的方式会进一步增加测量时间,导致激光器低频噪声对测量结果的影响更加严重。由于上述原因,使用频谱分析仪对拍频信号进行分析的方法往往无法实现傅里叶极限的频谱分辨能力^[18]。

时间间隔分析仪(TIA)可以以皮秒量级的精度实时采集信号并记录信号到达的时间,这种高精度时间分辨测量方法所测量的信号包含了频率信息,

可通过傅里叶变换提取信号的频率^[19]。通过时间间隔分析仪实时采集拍频信号并结合傅里叶变换获取频谱信息的线宽测量方法(时间分辨方法)具有实时采集的特点,有效地避免了除频谱仪扫描方式引入的积分时间外的噪声对系统性能的影响。

本文通过使用时间分辨方法测量了光纤激光器和半导体激光器(DL)在不同积分时间内的线宽,并与传统频谱仪方法进行比较。实验结果表明,基于时间分辨方法的线宽测量分辨率仅受限于傅里叶极限,所获得的线宽更接近标称线宽,误差也更小。

2 实验原理

频谱仪的扫描时间 T_{sweep} 为

$$T_{\text{sweep}} = \frac{\Delta f}{B^2}, \quad (1)$$

式中: Δf 为频率测量范围; B 为分辨率带宽。为完成完整的频谱测量, Δf 通常比 B 大一个量级以上,因此频谱仪的单次测量时间远大于傅里叶极限分辨率所需的测量时间($T_f = 1.77/B$)。故在使用频谱分析仪时,除积分时间以外的激光器频率噪声将会极大地影响频谱仪在确定积分时间内线宽测量的准确性,使其无法实现傅里叶极限的频率分辨。

图 1 展示了基于时间分辨方法测量激光线宽原理示意图,FWHM 为半峰全宽。如图 1 所示,总测量时间为 T , 单次测量积分时间为 τ , $T \gg \tau$ 。TIA 长时间实时记录拍频信号上升沿穿过阈值电平的时刻,记为 t_{nm} (n 表示第 n 个样本, m 表示此样本中第

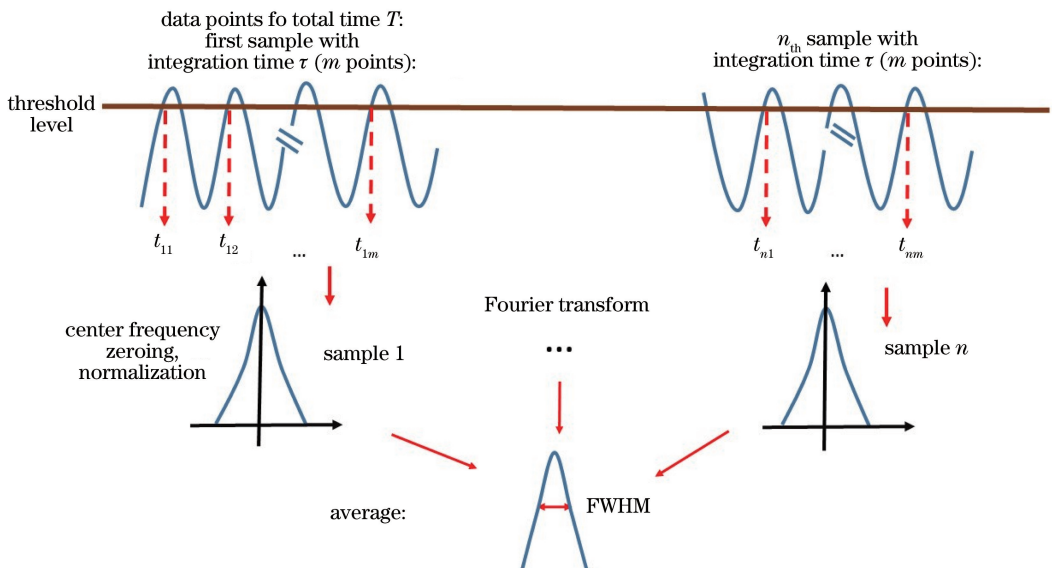


图 1 时间分辨方法测量激光线宽原理图

Fig. 1 Schematic of laser linewidth measurement based on time-resolved method

m 个点), 所获的时域信号为原始数据。之后, 按照积分时间 τ , 从原始数据中选出 n 段子样本, 每个样本点包含 m ($m = \tau/t$) 个数据点, 并依次对每个样本进行傅里叶变换, 获取积分时间 τ 内的拍频信号的频谱图。其中, 傅里叶变换公式为

$$P_n(\omega) = \left| \sum_m \exp(-2\pi i t_{mm} \omega) \right| \quad (2)$$

在获得频谱图之后, 对其进行中心频率归零, 以消除积分时间以外的频率漂移对线宽测量的影响。最后对频谱图进行归一化处理, 并将 n 个子样本频谱图作平均以减小误差。在实验中, 为了可以和频谱测量的结果作同等比较, 平均的次数 n 设为 10。时间分辨方法可以保证单次频谱测量时间和积分时

间相同, 实现傅里叶极限分辨率的线宽测量。

3 实验装置

图 2 为基于时间分辨方法线宽测量的实验装置示意图。实验中, 分别使用传统频谱分析仪和运行在时间分辨模式下的 TIA 对拍频信号进行采集、处理, 以获得待测激光器的线宽, 并对两种方法的测量结果进行比较。为了全面地展示两种线宽测量方法的特征, 待表征的激光器有两种, 分别为光纤激光器和半导体激光器, 它们的线宽由其自身与另外一束锁定在超稳腔 (ULE cavity) 的窄线宽激光 (线宽约为 18 Hz) 拍频获得。

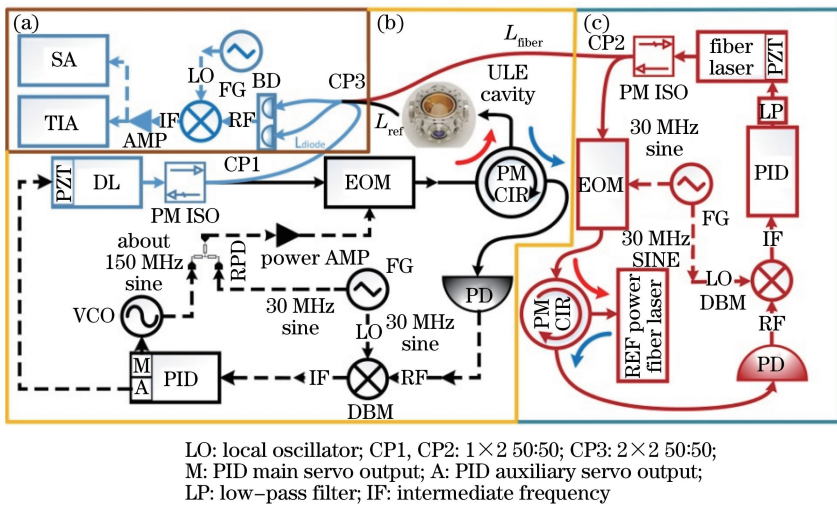


图 2 基于时间分辨方法的傅里叶极限分辨率激光线宽测量实验装置图。(a) 拍频测量实验装置; (b) 10 Hz 量级线宽相干光场产生光路; (c) 光纤激光器光路

Fig. 2 Experiment setup of linewidth measurement at Fourier limit based on time-resolved method. (a) Experimental device of beat-frequency measurement; (b) optical path for producing coherent light field with linewidth of 10 Hz; (c) optical path of fiber laser

半导体激光器输出的激光通过保偏 (PM) 光纤光隔离器 (ISO), 目的是防止反射激光影响激光器输出模式。激光经过光隔离后, 通过保偏分束器 (CP1) 分为两束光。一束光作为待测线宽的半导体激光器光源 (L_{diode})。另外一束光通过外调制稳频技术被锁定到超稳腔的共振频率上, 从而降低其频率噪声, 获得 10 Hz 量级线宽 (受限于腔体的热噪声) 的相干光场^[20]。这束光作为参考光 (L_{ref}), 用于和半导体激光器或光纤激光器进行拍频。

L_{ref} 具体产生方法如图 2(b) 所示, 经过 CP1 的一束激光由保偏光纤电光调制器 (EOM) 产生调制边带。该 EOM 边带的调制信号包含两部分, 分别为由一个高调谐带宽的电压控制振荡器 (VCO) 产生频率约为 150 MHz 的正弦信号以及由函数发生

器 (FG) 提供频率为 30 MHz 的正弦信号。两个信号通过阻性电子学功率分束器合束, 并经功率放大器 (AMP) 放大后输出到 EOM 调制端口, 目的是为了获得合适的调制深度, 以使一阶边带最强。EOM 调制产生的 150 MHz 边带将与超稳腔共振产生 L_{ref} , 而 30 MHz 边带则用于产生准同步数字系列 (PDH) 鉴频信号^[21], 以实现 150 MHz 边带相对于超稳腔的锁定。EOM 输出的激光经过保偏环形器 (CIR) 注入到超稳腔中, 反射光经环形器后交由光电探测器 (PD) 进行探测。光电探测器的输出信号传输至双平衡混频器 (DBM) 的射频 (RF) 端口, 以 30 MHz 为基频进行解调以获取 PDH 鉴频信号。该信号被输入到比例-积分-微分器 (PID) 中, 通过 PID 进行反馈控制以抑制激光器噪声。PID 具有两

路输出,其中主输出反馈到 VCO 的电压调节端口以便通过 EOM 实现高带宽(大于兆赫兹)的噪声抑制。这使得经过 EOM 之后,与腔共振的 150 MHz 激光边带具有 10 Hz 量级的较窄的线宽。经过超稳腔选模后,滤去主峰和另外一个边带频率的激光,便可获得窄线宽的 L_{ref} 。PID 的辅助输出以较小的反馈带宽(10 Hz)作用在半导体激光器的压电陶瓷(PZT)上,其目的是为了抑制激光器缓慢而幅度较大的频率漂移,以实现稳定的频率锁定。由于到半导体激光器压电陶瓷的反馈信号的带宽较小,因此该反馈对 L_{diode} 的噪声特性影响可以忽略, L_{diode} 基本保持了自身的噪声特性。实验用到的超稳腔的中心波长为 1550 nm,线宽约为 41 kHz,被置于真空度为 10^{-8} mbar 的真空腔室中,以减小空气折射率的变化对腔共振频率的影响,温度控制在零膨胀温度(38.68 °C)以减小热噪声对频率的影响。

图 2(c)为用于拍频的光纤激光器光路。为了减小光纤激光器波长长时间漂移,保证拍频信号频率较为稳定,实验通过与半导体激光器相同的 PDH 反馈回路对光纤激光器的输出光进行锁定。为了尽可能不影响光纤激光器自身噪声特性,反馈回路的带宽通过低通滤波被限制在 3 Hz 以下。实验使用到的参考法布里-珀罗(FP)腔(REF cavity)的线宽约为 2 MHz,处在常温常压环境中。经过处理后的 L_{diode} 和光纤激光器光源(L_{fiber})依次输入到 CP3 的同一端口中,与从另一端口输入的 L_{ref} 进行拍频。分束器两个输出端口的输出光分别输入到平衡探测器(BD)的两个探测端口,以抑制额外噪声,提高拍频信噪比。平衡探测器输出信号经过双平衡混频器混频到 20 MHz,并依次经过以 20 MHz 为中心频率的带通滤波器(未在图中体现)滤波和运算放大器放大至合适幅值后,输入到 TIA 以及 SA 中进行分析。在使用频谱仪采集拍频信号时,通过设置频谱仪不同的分辨率带宽从而设置不同的单次测量积分时间。单个频谱数据经过频谱仪 10 次平均,线宽信息可直接从频谱数据中读取 -3 dB 带宽获得。在使用 TIA 进行测量时,TIA 触发阈值设置为 0,触发方式为上升沿触发,从而记录拍频信号上升沿穿过零点的时间,测得的数据经过后期处理便可获得线宽信息。

4 结果与分析

使用频谱仪方法、时间分辨测量方法分别对半导体激光器和光纤激光器在不同积分时间内进行线

宽测量,其结果如图 3 所示。对于每个积分时间,进行了 10 次测量实验并进行统计,以获得测量的误差分布。实验所使用的半导体激光器(Toptica Photonics, DL Pro, Germany)标称线宽小于 100 kHz,光纤激光器(Orbits Lightwave, Model ETH, American)在 0.4 ms 积分时间时,根据频率噪声谱密度理论估算其线宽约为 1 kHz。实验中积分时间为 0.00156, 0.00312, 0.00624, 0.01248, ..., 102.4 ms,共 17 组数据,研究了不同单次采集积分时间频谱仪方法与时间分辨方法所获得的激光线宽测量结果。实验结果表明,随着积分时间由小到大,两种方法测量的线宽都具有由大变小再变大的趋势,分别受限于傅里叶极限和激光器逐渐增加的低频噪声^[22-23]。从半导体激光器的实验结果来看,在积分时间较短时(小于 0.01 ms)两种测量方法均受限于傅里叶极限。当积分时间在 0.01 ms 到 0.04 ms 的范围内,使用频谱仪的测量结果明显大于傅里叶极限,而时间分辨测量方法的结果依旧与傅里叶极限很接近,并且受限于傅里叶极限。该现象的主要原因是:当使用频谱仪进行测量时,其工作方式扫描式测量,如果单次测量时间远大于由分辨率带宽所决定的积分时间,积分时间外的激光器低频噪声将对测量结果产生严重的影响。而时间分辨测量方法的实时测量的工作原理保证了其可以完全不受积分时间外的低频噪声影响,从而实现傅里叶极限分辨率的线宽测量。当积分时间在 0.04 ms 到 70 ms 范围内时,时间分辨测量方法偏离傅里叶极限,这是由于积分时间以内的激光器低频噪声对线宽的影响已经大于傅里叶极限分辨率,测量结果受到了激光器自身线宽的影响。此时频谱测量的方法同样受到了积分时间以外的激光器噪声影响,其测量结果的误差大于时间分辨方法的误差。当积分时间在 70 ms 以上时,频谱仪和时间分辨方法的测量结果基本相同,这是由于在长时间积分下,激光器自身的频率漂移逐渐收敛于最大值,积分时间对线宽测量的影响逐渐减小,从而频谱测量受到积分时间外的影响减小。从测量结果的误差可以看出,在 0.01 ms 到 70 ms 范围内,半导体激光器由于受到除积分时间外低频噪声的随机影响,测量结果具有较大的误差,而时间分辨测量方法则具有更高的精确度。对于所有积分时间,半导体激光器的线宽测量结果均小于 100 kHz,说明其标称线宽是正确的。光纤激光器的测量结果也展现出了与半导体激光器相同的趋势。光纤激光器由于噪声较小,频谱测量

方法的结果偏离傅里叶极限的积分时间(大于 0.07 ms),相较于半导体激光器的积分时间(0.01 ms),向长积分时间移动,同时两种方法不再产生区别的积分时间(小于 10 ms)向短积分时间移动。从时间分辨测量方法的结果可以看出,当积分时间为 0.4 ms 时,光纤激光器线宽约为 2 kHz,接近于其理论估算线宽,而频谱测量的方法获得的线宽(6 kHz)则远大于其理论估算线宽。综上所述,在使用时间分辨测量的方法进行激光器线宽测量时,其分辨率仅受限于傅里叶极限,不受积分时间的影响。从 10 次实验结果统计获得的标准差(见图 3 中的误差条)可以看出,该方法具有更小的测量误差(小于 8%)。

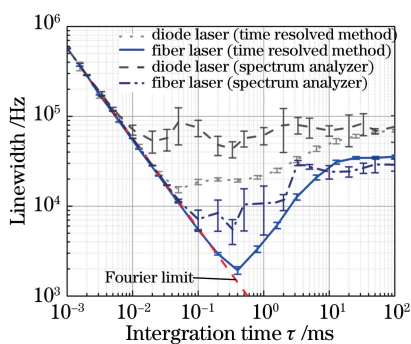


图 3 基于频谱仪方法和时间分辨测量方法测量半导体激光器、光纤激光器线宽的实验结果

Fig. 3 Experimental results of linewidths of diode laser and fiber laser based on spectral analyzer and time-resolved method

5 结 论

提出了一种傅里叶极限分辨率的线宽测量方法——时间分辨方法。实验使用该方法对半导体激光器和光纤激光器在不同积分时间内分别进行了线宽测量,并与传统频谱仪测量结果进行比较。实验结果表明,使用时间分辨方法测量激光线宽时其测量结果仅受限于傅里叶极限,其测量精度也获得了极大的提高(测量误差小于 8%)。该方法可以准确表征在确定积分时间内的激光器线宽,从而可以精确估计激光器噪声在实际测量时间内对系统信号的影响。该方法在基于单频激光器的精密测量、精密光谱、激光通信等领域具有十分重要的应用。

参 考 文 献

[1] Zhang W. Research on digital laser ranging technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
张旺. 数字式远距离激光测距技术研究[D]. 天津:

天津大学, 2010.

- [2] Tang B, Cheng H. Application of distributed optical fiber sensing technology in surrounding rock deformation control of TBM-excavated coalmine roadway[J]. Journal of Sensors, 2018: 8010746.
- [3] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [4] Phung D H, Alexandre C, Lintz M. Two-mode interference measurement for nanometer accuracy absolute ranging[J]. Optics Letters, 2013, 38(3): 281-283.
- [5] Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W *et al.* Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy[J]. Physical Review Letter, 2000, 85(11): 2264.
- [6] Li Y J. Theoretical and experimental study of a 1.5 μm solid state laser pumped by a laser diode[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013.
李渊骥. 激光二极管泵浦的 1.5 μm 固体激光器的理论和实验研究[D]. 太原: 山西大学, 2013.
- [7] Von Bandel N, Myara M, Sellahi M, *et al.* Time-dependent laser linewidth: Beat-note digital acquisition and numerical analysis [J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27961-27978.
- [8] Fox R W, Oates C W, Hollberg L W. Stabilizing diode lasers to high-finesse cavities[J]. Experimental Methods in the Physical Sciences, 2003, 40: 1-46.
- [9] Zhang H, Jin Y W, Li Y. Time domain representation of frequency stability: Allan variance [J]. Industrial Measurement, 2001(S1): 192-193.
张晖, 金玉雯, 李延. 频率稳定度的时域表征: 阿仑方差[J]. 工业计量, 2001(S1): 192-193.
- [10] Xie D H, Deng D P, Guo L, *et al.* Line-width measurement method of narrow linewidth lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010006.
解东宏, 邓大鹏, 郭丽, 等. 窄线宽激光器线宽测量方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010006.
- [11] Bucalovic N, Dolgovskiy V, Schori C, *et al.* Experimental validation of a simple approximation to determine the linewidth of a laser from its frequency noise spectrum[J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4582-4588.
- [12] Horak P, Lob W H. On the delayed self-heterodyne interferometric technique for determining the linewidth of fiber lasers[J]. Optics Express, 2006,

- 14(9): 3923-3928.
- [13] Zhang N, Rao W, Xu P, *et al.* Line shape analysis of frequency-modulated laser with delayed self-heterodyne method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(3): 0302005.
张楠, 饶伟, 徐攀, 等. 基于延迟自外差方法的调频激光器线型分析 [J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0302005.
- [14] 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.
- [15] Peng X F, Ma X R, Zhang S G, *et al.* Effect of beat frequency linetype on measurement of laser linewidth using two independent lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0408002.
彭雪峰, 马秀荣, 张双根, 等. 两台独立激光器拍频线型对线宽测量的影响 [J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0408002.
- [16] de Iuliis J D, Grootthoff N, Holdsworth J L, *et al.* 10 kHz linewidth distributed feedback photonic crystal fibre (DFB-PCF) laser [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7004: 70042I.
- [17] Chen J P, Gao J, Jiao D D, *et al.* Laser linewidth measurement based on system parameters insensitive recirculating delayed self-heterodyne interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1114001.
陈玖朋, 高静, 焦东东, 等. 系统参数不敏感的循环延迟自外差激光线宽测量法 [J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1114001.
- [18] Cohen L. Time-frequency analysis: Theory and applications [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(5): 4002-4002.
- [19] Hu J, Yu B, Jing M, *et al.* Experimental quantum secure direct communication with single photons [J]. Light Science & Applications, 2016, 5(9): e16144.
- [20] Gao F, Liu H, Xu P, *et al.* Narrow linewidth laser system used for the intercombination transition spectrum measurement [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(14): 153-159.
高峰, 刘辉, 许鹏, 等. 用于互组跃迁谱测量的窄线宽激光系统 [J]. 物理学报, 2014, 63(14): 153-159.
- [21] Black E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. American Journal of Physics, 2001, 69(1): 79-87.
- [22] Tourenç J P, Signoret P, Myara M, *et al.* Low-frequency FM-noise-induced lineshape: A theoretical and experimental approach [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(4): 549-553.
- [23] Tsuchida H. Laser frequency modulation noise measurement by recirculating delayed self-heterodyne method [J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 681-683.