

傅里叶极限分辨率的激光线宽测量

候慧芳^{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, 山西大学, 太原 030006

²极端光学协同创新中心, 山西大学, 太原, 山西 030006

摘要 在光纤通信及精密测量等领域, 激光光源的频率噪声特性会极大的影响系统的性能, 对激光频率噪声的准确表征具有重要的意义。通常基于频谱分析仪分析拍频信号的激光线宽测量方法受到激光器低频噪声以及频谱仪扫描工作方式的限制, 导致测量线宽加宽、误差较大, 无法实现傅立叶极限分辨率的线宽测量。本文提出了一种基于时间分辨及傅立叶变换测量激光线宽的方法, 其分辨率仅受限于傅立叶极限。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, 并与频谱分析的方法进行了比较。对两种激光器不同积分时间下线宽测量证明, 这种傅立叶极限线宽测量的方法相比于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特点。

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

Measurement of laser linewidth at Fourier limit resolution

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

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

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

Abstract In the fields of optical fiber communication and precision measurement, the frequency noise characteristic of laser light source will greatly affect the performance of the system. Limited by the low frequency noise of the laser and the working way of sweeping RF spectrum analyzer, the traditional laser linewidth measurement method can't achieve the Fourier limit resolution, which will widen the measurement linewidth and increase the measurement error. In this paper, a method of measuring laser linewidth at Fourier limit based on time-resolved method and Fourier transform is presented. By comparing the measurement linewidths of fiber (semiconductor) lasers of the time-resolved method and traditional RF spectrum method, it is proved that this time-resolved method of Fourier limit resolution has smaller measurement error than that of RF spectrum analyzer, and the acquisition of spectrum information by time-resolved method has the characteristics of real-time acquisition.

Key words laser; linewidth measurement; time-resolved; Fourier limit resolution

OCIS codes 140.3425; 140.3510; 300.3700

基金项目：国家重点基础研究发展计划(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”重点学科建设和高等学校学科创新引智计划 (111 计划) (D18001)

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

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。激光器的噪声特性将会显著影响系统的性能,而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优劣最重要的性能指标。因此研究不同积分时间下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]。

常用的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下的激光线宽,便可以精确预计在一定测量时间下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,首先需要将未知激光的频率信息转化为电子学器件可测量的频率信号。目前激光线宽测量的主要方法有延时自外差法^[12-13]以及差拍测量法^[14-15],其中延时自外差法测量较窄的激光线宽时,需要较长的延时光纤,其通常适用的线宽测量的范围在 kHz 量级^[16-17]。而使用差拍测量的方法则需要将未知的激光器与噪声相对更小的参考激光器拍频,理论上最小的线宽测量极限取决于参考激光器的线宽,是目前针对窄线宽激光器主要的线宽测量方法。

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(Spectrum Analyzer, 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,会受到积分时间以外的激光频率噪声影响,从而降低了频谱测量的精度。另外,在实际测量中,往往会通过平均的方式减小测量误差。但是多次平均使得测量时间进一步增加,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,往往无法做到傅立叶极限^[18]的频谱分辨能力。

时间间隔分析仪(Time Interval Analyzer, TIA)可以以皮秒量级的精度实时采集并记录信号到达的时间,这种高精度时间分辨测量方法包含了信号的频率信息,可以通过傅立叶变换进行提取^[19]。通过时间分辨测量方法结合傅立叶变换获取频谱信息具有实时采集的特点,有效地避免了因频谱仪扫描方式所引入的积分时间外噪声的影响。本文中,我们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在不同积分时间下的线宽,并与传统频谱仪测量的方法进行比较。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立

叶极限，获得的线宽更接近标称线宽，并具有更小的误差。

2 实验原理

频谱分析仪与时间分辨方法分析拍频信号原理

由于频谱仪的扫描工作方式，其扫描时间 T_{sweep} 由以下公式确定

$$T_{sweep} = \frac{\Delta f}{B^2}$$

其中 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达到傅里叶极限分辨率所需的测量时间 $T_f = 1.77/B$ 。此时，在使用频谱分析仪进行测量时，积分时间以外的激光器频率噪声将会极大的影响频谱仪测量的确定积分时间下线宽的准确性，使其无法达到傅立叶极限的频率分辨能力。

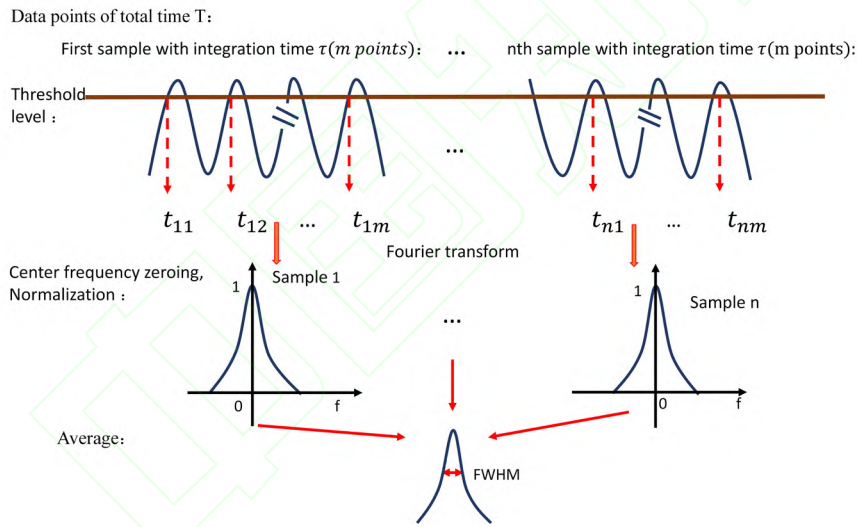


图 1 时间分辨方法测量激光线宽原理图

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

图 1 展示了基于时间分辨方法测量激光线宽原理示意图。如图 1 中所示，总测量时间为 T ，单次测量积分时间 τ 下，TIA 长时间 ($T \gg \tau$) 实时记录拍频信号上升沿穿过阈值电平的时刻 t_{kj} ，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 $m = \tau/t$ 个数据点，并依次将每个样本进行傅立叶变换获取积分时间 τ 下的拍频信号的频谱图。其中傅立叶变换公式如下：

$$P_k(\omega) = \left| \sum_{j=1}^m e^{-2\pi i t_{kj} \omega} \right|$$

在获得频谱图之后，对其进行中心频率归零，以移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 个子样本频谱图平均以减小误差。在实际实验中，为了可以和频谱测量的结果同等比较，平均的次数 n 设置为 10 次。时间分辨方法保证了单次频谱测量时间和积分时间相同，可以实现傅立叶极限分辨率的线宽测量。

3 实验装置

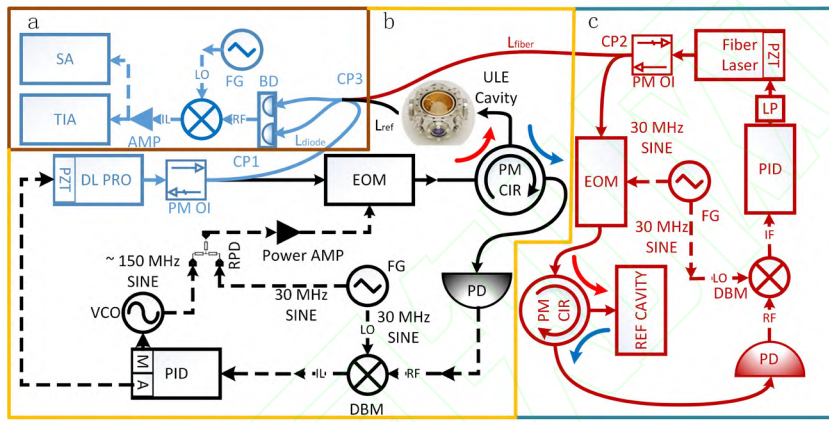


图 2 基于时间分辨方法的傅里叶极限分辨率激光线宽测量实验装置图。a. 拍频测量实验装置。b. 10Hz 量级线宽相干光场产生光路。c. 光纤激光器光路。DL pro: 半导体激光器, PZT: 压电陶瓷, PM OI: 保偏光隔离器; CP1、CP2: (1×2, 50:50) 保偏光纤分束器, CP3: (2×2, 50:50) 保偏光纤分束器, EOM: 保偏电光相位调制器, PM CIR: 保偏光纤环形器, PD: 光电探测器, DBM: 双平衡混频器, PID: 比例积分微分控制器, M: PID 主输出, A: PID 辅助输出, VCO: 压控振荡器, RPD: 阻性电子学功率分束器, Power AMP: 射频功率放大器, ULE Cavity: 超低热膨胀材料 FP 腔 (超稳腔), FG: 函数发生器, Fiber Laser: 光纤激光器, LP: 低通滤波器, REF Cavity: 参考 FP 腔, BD: 平衡探测器, AMP: 射频运算放大器, TIA: 时间间隔分析仪, SA: 频谱分析仪

Fig. 2 Experiment setup. DL pro: diode laser, PZT: piezoelectric transducer, PM OI: polarization-maintaining fiber isolator, CP1, CP2: (1×2 50:50)polarization-maintaining fiber coupler, CP3: (2×2 50:50) polarization-maintaining fiber coupler, EOM: polarization-maintaining electro-optic phase modulator, PM CIR: polarization-maintaining fiber circulator, PD: photodetector, DBM: double-balanced mixer, PID: proportion-integration-differentiation controller, M: PID main servo output, A: PID auxiliary servo output, VCO: voltage-controlled oscillator, RPD: resistive electronic power splitter, Power AMP: RF power amplifier, ULE Cavity: ultra-low thermal expansion material FP cavity, FG: function generator, LP: low-pass filter, REF Cavity: reference cavity, BD: balanced detector, AMP: RF operational amplifier, TIA: time interval analyzer, SA: spectrum analyzer.

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，我们分别使用传统频谱

分析仪和运行在时间分辨模式下的 TIA 对拍频信号进行了采集、处理，以获得待测激光器的线宽，从而对两种方法的测量结果进行比较。为了全面的展示两种测量线宽方法的特征，待表征的激光器分为两种，分别为光纤激光器和半导体激光器，他们的线宽由其自身与另外一束锁定在超稳腔的窄线宽激光（线宽约为 18 Hz）拍频获得。

半导体激光器输出的激光经过保偏光纤光隔离器，从而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，其中一束作为待测线宽的半导体激光器光源（ L_{diode} ）；另外一束使用外调制稳频技术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]，作为参考光（ L_{ref} ）用于和半导体激光器以及光纤激光器进行拍频。

L_{ref} 具体产生方法如图 2 中 b 部分所示：经过 CP1 的一束激光由保偏光纤 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 VCO 产生的约 150 MHz 正弦信号以及由函数发生器提供的 30 MHz 正弦信号。两个信号通过阻性电子学功率分束器合束，并经由功率放大器放大后输出到 EOM 调制端口，从而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 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注入到超稳腔中，反射光场经由环形器导入到光电探测器中进行探测。光电探测器的输出输入到双平衡混频器的 RF 端口，以 30 MHz 为基频进行解调以获取 PDH 鉴频信号，并将该信号输入到 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(Vtune)以通过 EOM 实现高带宽 (>MHz)的噪声抑制，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上,用来抑制激光器缓慢而幅度较大的漂移,以实现稳定的锁定。由于反馈到半导体激光器压电陶瓷的反馈带宽较小，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。实验中用到的超稳腔，其中心波长为 1550 nm，线宽约为 41 kHz，放置于真空度为 10^{-8} mbar 的真空腔室中以减小空气折射率改变对腔共振频率的影响，温度控制在其零膨胀温度（38.68 °C）以减小热噪声对频率的影响。

图 2 中 c 部分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，以保证拍频信号频率较为稳定，实验中通过与半导体激光器相同的 PDH 反馈回路将光纤激光器锁定到了参考 FP 腔上。同时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限制在 3 Hz 以下。实验中使用到的参考 FP 腔线宽约为 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}) 依次分别输入到 CP3 的同一端口中，与从另一端口输入的 L_{ref} 拍频，分束器的两个输出端口分别输入到平衡探测器的两个探测窗口，以抑制额外噪声，提高拍频信噪比。平衡探测器输出经过双平衡混频器混频到 20 MHz，并经过以 20 MHz 为中心频率的带通滤波器（未在图中体现）滤波，经过运算放大器放大到合适幅值，输入到 TIA 以及 SA 中进行分析。使用频谱仪采集拍频信号时，频谱仪分别设置不同的分辨率带宽，从而设置单次测量积分时间。单个频谱数据经过谱仪十次平均，线宽信息直接从频谱数据中读取 -3 dB 宽度获得。使用 TIA 进行测量时，TIA 触发阈值设置为 0 V，触发方式为上升沿触发，从而记录拍频信号每次以上升沿穿过零点的时间信息，测得的数据经过后期处理获得线宽信息。

4 结果与分析

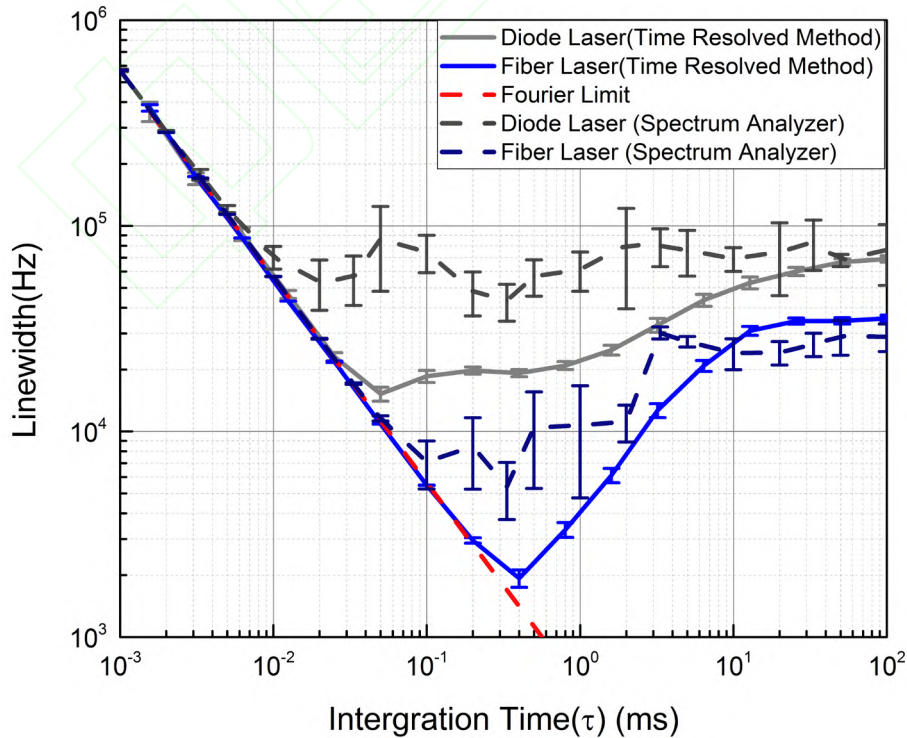


图 3 频谱仪测量、时间分辨测量方法分别测量半导体、光纤激光器线宽实验结果图

Fig. 1 The experimental results of the linewidth of diode laser and fiber laser based on time-resolved method and spectrum analyzer method.

图 3 展示了使用频谱仪测量、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下线宽测量的结果。每个积分时间下进行了十次测量并进行统计,以获得测量的误差分布。实验中使用的半导体激光器(Toptica Photonics, DL Pro)标称线宽小于 100 kHz, 光纤激光器(Orbits Lightwave, Model ETH)在 0.4 ms 积分时间下,根据频率噪声谱密度理论估算线宽约为 1 kHz。实验中,我们研究了从 0.00156 ms 到 102.4 ms 范围内,以两倍为步长,不同单次采集积分时间下频谱仪测量与时间分辨测量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,分别受限于傅立叶极限以及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(<0.01 ms)两种测量方法均受限于傅立叶极限(红色虚线)。在 0.01 ms 到 0.04 ms 的范围内,使用频谱仪的测量结果(深灰色虚线)明显大于傅立叶极限,而时间分辨测量方法的结果(灰色实线)依旧受限于傅立叶极限。这主要由于使用频谱仪进行测量时,其工作方式扫描式测量,因此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对测量结果产生了影响。而时间分辨测量方法的实时测量的工作原理保证了它可以完全免疫积分时间外的低频噪声影响,从而实现傅立叶极限分辨率的线宽测量。在 0.04 ms 到 70 ms 积分时间范围内,时间分辨测量方法偏离傅立叶极限,这是由于积分时间以内的激光器低频噪声已经大于了傅立叶极限分辨率,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由于受到了积分时间以外的激光器噪声影响,其测量结果大于时间分辨方法的测量结果。在 70 ms 以上的积分时间下,频谱仪和时间分辨方法的测量结果基本相同,这是由于在更长的时间下,激光器自身的频率漂移逐渐收敛于最大值,积分时间增加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。在所有积分时间下,半导体激光器的线宽测量结果均小于 100 kHz,满足其标称线宽的要求。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。由于光纤激光器噪声较小,频谱测量方法的结果(深蓝色虚线)偏离傅立叶极限的积分时间(>0.07 ms)相较于半导体激光器(0.01 ms)向长时间移动,同时两种方法不再产生区别的积分时间(<10 ms)向短积分时间移动。从时间分辨测量结果(蓝色实线)中可以看出,在 0.4 ms 积分时间下,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

于标称线宽。综上所述,在使用时间分别的方法进行激光器线宽测量时,在任意积分时间下,其分辨率仅受限于傅立叶极限。从图 3 中十次实验结果统计获得的标准差(误差条)可以看出,该方法具有更小的测量误差(小于 8%)。

5 结论

本文提出了一种傅里叶极限分辨率的线宽测量方法。实验中通过使用该方法对半导体激光器以及光纤激光器在不同积分时间下分别进行了线宽测量,并与传统频谱仪测量结果进行比较。实验结果证明,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立叶极限,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下的激光器线宽,从而可以精确估计激光器噪声在实际测量时间内对信号的影响,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, 2010:1-15.
张旺.数字式远距离激光测距技术研究[D].天津:天津大学,2010: 1-15.
- [2]. Tang B, Cheng H. Application of distributed optical fiber sensing technology in surrounding rock deformation control of TBM-excavated coal mine roadway[J]. Journal of Sensors, 2018 2018(4):1-10.
- [3]. Kaushal H, Kaddoum G. Optical Communication in Space: Challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, PP(99):1-1.
- [4]. Phung D H, Alexandre C, Lintz M. Two-mode interference measurement for nanometer accuracy absolute ranging[J]. Optics Letters, 2013, 38(3):281.
- [5]. Holzwarth R, Udem T, Hansch T W, et al. Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy[J]. Phys.rev.lett, 2000, 85(11):2264-2267.
- [6]. Li Y J. Theoretical and experimental study of a 1.5m 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]. Bandel N V, 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. Trace detection with diode lasers[D]. 1995.
- [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. Measurement methods for linewidth of narrow linewidth

- laser[J]. *Laser and 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):4582-8.
- [12]. Horak P, Wei H L. On the delayed self-heterodyne interferometric technique for determining the linewidth of fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9):3923-8.
- [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 Laser*, 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 Laser*, 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]. Groothoff N, Holdsworth J L, Canning J, et al. 10 kHz linewidth distributed feedback photonic crystal fibre (DFB-PCF) laser[C]. *International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics*, 2008:70042I-70042I-4.
- [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(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(11):1114001.
- [18]. Cohen L. Time-frequency analysis: theory and applications[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, 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, Chang H, et al. A narrow linewidth laser system for intergroup transition spectrometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014,63(14):153-159.
高峰, 刘辉, 常宏等. 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*, 2000, 69(1):79-87.
- [22]. Tournenc 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):681-3.

网络首发:

标题: 傅里叶极限分辨率的激光线宽测量

作者: 侯慧芳, 景明勇, 胡建勇, 秦成兵, 肖连团, 贾锁堂

收稿日期: 2018-09-30

录用日期: 2018-11-13

DOI: 10.3788/lop56.081402

引用格式:

侯慧芳, 景明勇, 胡建勇, 秦成兵, 肖连团, 贾锁堂. 傅里叶极限分辨率的激光线宽测量[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(08):081402.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

种子注入的全固态单频脉冲激光器研究进展

龙江雄 李刚 杨彬 姚红权 丁建永 周军

陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

激光与光电子学进展, 2018, 55(9):090001

Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄组合晶体双频激光器实验研究

金涛 胡淼 李鹏 范红丹 韩宁 冯冰 欧军 周雪芳 杨国伟 卢旻 毕美华

杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018

激光与光电子学进展, 2018, 55(9):091407

高功率窄线宽光纤激光器研究进展

郑也 李磐 朱占达 刘小溪 王军龙 王学锋

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094

激光与光电子学进展, 2018, 55(8):080002

基于光微流单模激光的液体折射率测量

韩超 邱诚玉 侯梦迪 张婷婷 王文杰

太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西, 太原 030024

激光与光电子学进展, 2018, 55(8):081401

大功率640 nm红光半导体激光器的设计及制备

朱振 肖成峰 夏伟 张新 苏建 李沛旭 徐现刚

山东华光光电子股份有限公司, 山东 济南 250100

激光与光电子学进展, 2018, 55(8):081403