

压缩态光场制备中的单频激光源噪声分析

史少平^{1,2}, 杨文海³, 郑耀辉^{1,2}, 王雅君^{1,2*}

¹山西大学光电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;

³中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100

摘要 采用自零拍探测法和分析腔转换法, 分别对适用于音频段压缩态光场制备的全固态单频激光器和光纤激光器的正交分量噪声进行了对比分析。结果表明, 1064 nm 全固态单频激光器的正交振幅噪声和正交相位噪声分别在分析频率大于 1.5 MHz 和 5 MHz 之后即达到散粒噪声基准, 光纤激光器在测量带宽范围内均高于散粒噪声基准。采用半导体放大器(SOA)降噪系统后, 光纤激光器的低频段(<620 kHz)正交振幅噪声小于全固态单频激光器。本研究结果为低频段压缩态光场的研究提供了单频光源选择方案; SOA 降噪系统可有效抑制低频段激光的正交分量噪声, 为音频段压缩态光场的制备提供了依据。

关键词 激光技术; 压缩态光场; 单频激光器; 振幅噪声; 相位噪声

中图分类号 TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0701009

Noise Analysis of Single-Frequency Laser Source in Preparation of Squeezed-State Light Field

Shi Shaoping^{1,2}, Yang Wenhai³, Zheng Yaohui^{1,2}, Wang Yajun^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

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

³China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, Shaanxi 710100, China

Abstract This study uses the self-homodyne detection and analysis cavity conversion method to compare the quadrature component noises of all-solid-state single-frequency laser and fiber laser suitable for the preparation of the squeezed-state light field in audio-band frequencies. The results show that the quadrature amplitude and quadrature phase noises of the all-solid-state, single-frequency, 1064 nm laser reach the shot-noise limitation after analysis frequencies of 1.5 MHz and 5 MHz, respectively. Moreover, the measurement bandwidth of the fiber laser is higher than that of the shot-noise limitation. With the semiconductor optical amplifier (SOA) noise-reduction system, the low-frequency-bandwidth (<620 kHz) quadrature amplitude noise of the fiber laser is smaller than that of the all-solid-state single-frequency laser. This result provides a single-frequency source-selection scheme for the study of the low-frequency-bandwidth squeezed-state light field. The SOA noise-reduction system can effectively suppress the quadrature component noise of the low-frequency-bandwidth laser and provide an evidence for the preparation of the squeezed-state light field in audio-band frequencies.

Key words laser technique; squeezed-state light field; single-frequency lasers; amplitude noise; phase noise

OCIS codes 270.6570; 270.2500

收稿日期: 2019-01-05; 修回日期: 2019-02-19; 录用日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(11874250, 11654002, 61575114, 11804207, 11504220)、山西省三晋学者特聘教授项目、山西省“1331”重点建设学科

* E-mail: wangyajun_166@163.com

1 引言

光学精密测量是激光技术在精密测量领域的重要应用方向之一,利用激光极好的相干性,可实现对目标强度和相位信息的高精度全方位采集,从而获取目标物理量,甚至实现目标三维信息的重构。该方法具有非接触性、高灵敏度和高精度等特点,在近代科学研究、生物医学、工业生产、空间技术和国防技术中得到了广泛应用^[1-7]。然而,随着各种精密测量装备的不断升级换代,激光本身的经典噪声成为进一步提高测量精度的瓶颈,如探测引力波^[8]。目前最先进的探测装置是美国(Hanford, Washington State and Livingston, Louisiana)的 LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)激光干涉仪,其音频段(带宽范围为 1 Hz~100 kHz)探测精度已经达到经典噪声极限(天文大事件引起的时空扭曲张力为 $h \approx 10^{-21}$),为了满足各种类型天文事件的探测要求,下一代的引力波探测装置将引入压缩真空态填补真空通道,以突破经典噪声极限,进一步降低干涉仪的背景噪声,提高探测灵敏度,使得可探测到的时空扭曲张力 h 达到 $10^{-22} \sim 10^{-23}$ 量级;其次,在磁场测量^[9]、生物粒子位移测量^[10]等研究领域,压缩态光场的引入将进一步降低本底噪声,提高磁场与位移信号探测的灵敏度。

压缩态光场正交分量噪声方差主要受限于光学损耗、相位起伏和光场技术噪声^[11]。光学损耗将会引入真空噪声。相位起伏将反压缩噪声耦合至压缩噪声中,从而降低压缩态光场的压缩度。技术噪声主要包括激光器低频段噪声(远高于散粒噪声基准)、寄生干涉、散射、光学元件自身的机械振动和环境声频噪声,以及各部分锁定系统、探测系统引入的噪声等,这将成为产生低频段压缩态光场的主要限制因素,也是相对于高频段压缩态光场制备高压缩度光场的难点。在真空压缩态光场的制备过程中,抽运光的强度噪声对压缩态的制备无影响,而激光场的相位噪声将会限制压缩度的提高^[12];而对于明亮的正交振幅和正交相位压缩态光场的制备,由于种子光的注入,在光学参量放大(OPA)的过程中,抽运噪声将会与种子光耦合传递给压缩态光场,进而降低明亮振幅压缩光的压缩度。通常音频段压缩态光场的制备受激光自身噪声的限制,因此,各类单频激光器噪声特性的研究对低频压缩态光场的制备至关重要。

本文分别采用自零拍探测法^[13]和分析腔转换法^[14],对压缩态光场制备中使用的自制全固态单频

激光器^[15-16]和华南理工大学的科研人员研制的单频光纤激光器^[17-18]的低频段正交振幅与正交相位噪声进行测量与对比分析。随后,在光纤激光器中引入半导体放大器(SOA)主动降噪技术,该技术利用半导体非线性增益饱和吸收效应,通过提高 SOA 的注入光功率,使 SOA 工作在线性饱和区域,此时噪声达到饱和导致激光器停止输出,从而抑制了输入光场的噪声,有效降低了激光器的强度噪声^[19-20]。当 SOA 处于打开状态时,光纤激光器的正交振幅噪声在 1.5 MHz 处高于散粒噪声基准 5 dB,正交相位噪声在 5 MHz 处仍高于散粒噪声基准 12 dB;然而,在 0~650 kHz 分析频段,光纤激光器的正交振幅噪声大幅下降,如在 250 kHz 处其振幅噪声仅高于散粒噪声基准 3 dB,而全固态激光器的正交振幅噪声则达到了 18 dB。由此可见,全固态单频激光器在兆赫兹量级以上时分析频率压缩态光场制备具有显著优势,如果采用光纤激光器需进一步考虑采取降噪措施;而采用了 SOA 主动降噪技术后,单频光纤激光器更适用于音频段压缩态光场的制备,这一结果为音频段压缩真空态和明亮压缩态光场的实验制备提供了重要依据。

2 光场噪声测量原理

压缩态光场是突破经典激光散粒噪声基准(SNL,即相干光所能达到的噪声极限)的量子非经典光源。一束相干光经过一片分束比为 50:50 的分束镜后输出功率相同的两束光,这两束光分别入射到一对电学特性相同的高共模抑制比、高增益、低噪声的光电探测器中,将两个输出信号相减,即可抵消光场的经典噪声,测量得到散粒噪声基准;将两个输出信号相加,即得到光场的正交振幅噪声,这种噪声测量的方法被称作自零拍探测法。然而,光场的正交相位噪声无法通过光场强度直接测量,通常采用一种干涉仪将相位噪声转换为干涉输出信号的强度(振幅)噪声,由自零拍探测法间接测量,正交振幅与正交相位噪声的测量原理如图 1 所示。

采用由两面平面镜和一面平凹镜构成的三镜环形腔分析激光器输出激光的相位噪声,其中输入平面镜的反射率 $R_1 = 0.98$,输出平面腔镜的反射率 $R_2 > 0.9995$,另一面均镀减反膜;平凹镜的曲率半径为 1.0 m,凹面反射率 $R_3 > 0.9999$;分析腔的腔长为 $L = 420$ mm,精细度 $F = 300$,自由光谱范围 $\nu_{\text{FSR}} = 714$ MHz,线宽 $\delta\nu = 2.3$ MHz,其反射光场的正交振幅噪声谱可表示为^[12]

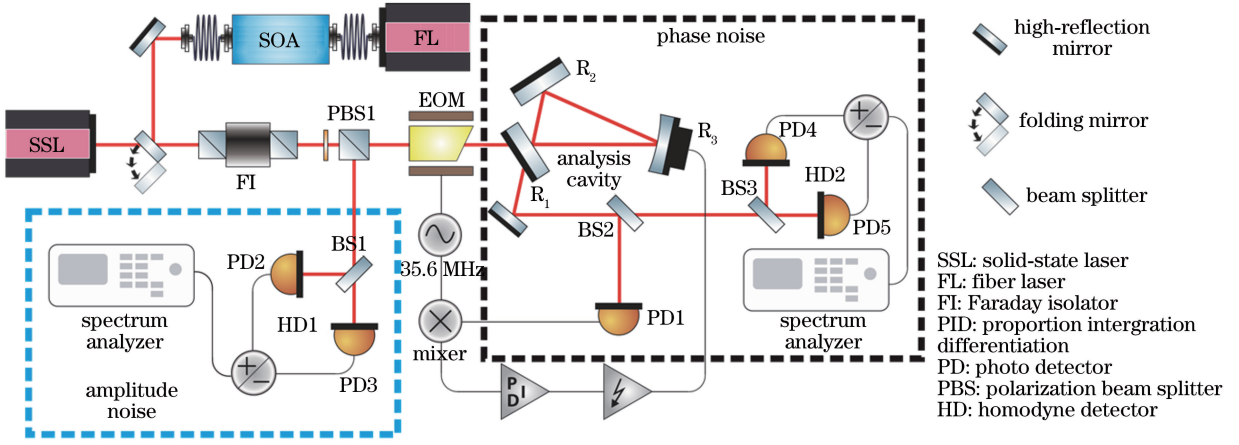


图1 单频激光器正交振幅与正交相位噪声测量装置图

Fig. 1 Experimental setup for measuring single-frequency laser quadrature amplitude and quadrature phase noises

$$S_R(\Delta, \nu') = |g_p|^2 S_p(\nu') + |g_q|^2 S_q(\nu') + |g_{vp}|^2 + |g_{vq}|^2, \quad (1)$$

式中: $S_p(\nu')$ 为输入场的正交振幅噪声; $S_q(\nu')$ 为正

交相位噪声; 后两项表示真空场的正交分量噪声对反射场正交振幅噪声的贡献。各项的耦合系数分别表示为

$$\begin{cases} g_p = \frac{1}{2} \{ \exp[-i\theta_R(\Delta)] r(\Delta + \nu') + \exp[i\theta_R(\Delta)] r^*(\Delta - \nu') \} \\ g_q = \frac{1}{2} \{ \exp[-i\theta_R(\Delta)] r(\Delta + \nu') - \exp[i\theta_R(\Delta)] r^*(\Delta - \nu') \} \\ g_{vp} = \frac{1}{2} \{ \exp[-i\theta_R(\Delta)] t(\Delta + \nu') + \exp[i\theta_R(\Delta)] t^*(\Delta - \nu') \} \\ g_{vq} = \frac{1}{2} \{ \exp[-i\theta_R(\Delta)] t(\Delta + \nu') - \exp[i\theta_R(\Delta)] t^*(\Delta - \nu') \} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\nu' = \frac{\nu}{\delta\nu}$ (归一化至线宽) 表示分析频率, 在时域

上对应于相位调制; $\Delta = \frac{\nu_0 - \nu_c}{\delta\nu}$ (归一化至线宽) 表示

谐振频率的相对失谐量, ν_0 为光场载波频率, ν_c 为接近 ν_0 的分析腔共振频率; $\exp[i\theta_R(\Delta)] = r(\Delta) / |r(\Delta)|$ 表示分析腔反射场叠加的附加相位因子; θ_R

表示附加位相角; $r(\Delta) = \frac{r_1 - r_2 \exp(i2\pi\Delta/F)}{1 - r_1 r_2 \exp(i2\pi\Delta/F)}$,

$t(\Delta) = \frac{t_1 t_2 \exp(i\pi\Delta/F)}{1 - r_1 r_2 \exp(i2\pi\Delta/F)}$ 分别表示分析腔对输

入光场的反射系数和透射系数, 其中 $r_i = \sqrt{R_i}$ ($i = 1, 2$) 和 $t_i = \sqrt{T_i}$ ($i = 1, 2$) 分别表示腔镜对输入光场的反射系数和透射系数, i 为腔镜编号; F 表示分析腔的精细度; 上角标 * 表示复共轭。

由(1)式和(2)式可知, 分析腔的相对失谐量 Δ 将通过相位因子 $\exp[\pm i\theta_R(\Delta)]$ 耦合到反射场的正交振幅噪声谱中, 并忽略分析腔的损耗及真空场对被测光

场的影响, 当相对失谐量 $\Delta = \pm 0.5$ 时, $|g_q|^2 = 1$, $|g_p|^2 = 0$, 由此得到 $S_R(\Delta, \nu') = S_q(\nu')$, 此时正交相位噪声将全部转化为正交振幅噪声, 即分析腔反射场的正交振幅噪声谱完全由输入场的正交相位噪声构成。因此, 可利用自零拍探测法测量工作于半失谐状态下的分析腔的反射场正交振幅噪声谱, 间接实现对输入场的正交相位噪声的测量。

3 实验结果与分析

3.1 实验过程

自制单频激光器中采用的是光纤耦合输出激光二极管(LD)抽运的全固态单频激光器, 增益介质为 Nd:YVO₄ 晶体, 掺杂浓度(原子数分数, 下同)为 0.5%, 谐振腔的腔型结构采用“8”字形环形腔结构(腔长为 320 mm), 并配合光学单向器[由半波片和铽镓石榴石(TGG)旋光晶体组成]和光学标准具, 实现稳定的单频激光输出, 输出耦合镜透射率为 4%, 中心波长为 1064 nm, 最大输出功率为 2 W, 光

束质量优于 ± 1.2 ,长期功率稳定性优于 $\pm 1.0\%$,线宽小于 150 kHz;光纤单频激光器由华南理工大学的科研人员所研制,其最大输出功率为 2 W,线宽为 1.7 kHz,同时配置了 SOA 降噪元件。在实验过程中,通过折叠镜架(FM)实现了两种激光器激光束的相互切换。如图 1 所示,单频激光器输出的激光经光学隔离器由偏振分束棱镜 PBS1 分为两束,其中反射光注入自零拍探测系统 I,经分束比为 50:50 的分束镜 BS1 均分为两束,分别进入 PD2 和 PD3,以保证两探测器直流输出的幅值相等,输出的交流信号分别作加、减运算后输入频谱分析仪,直接探测得到光场的正交振幅噪声和散粒噪声基准。PBS1 输出的透射光经电光相位调制器(EOM)^[21]后在载波两侧产生两级调制边带,随后注入分析腔,实现高效的模式匹配^[22],其反射光经分束比为 1:99 的分束镜 BS2 后,1%的反射光进入共振型光电探测器^[23]PD1,在探测器内部与本地射频信号混频并解调得到锁定腔长的误差信号,将直流信号用于分析监测的腔反射峰;BS2 输出的透射光直接进入自零拍探测系统 II 的 PD4 和 PD5,在分析腔锁定至半失谐的条件下,测量得到光场的正交相位噪声。将 EOM 调制频率设定为 35.6 MHz,实验中注入自零拍探测系统的功率为 1.7 mW。

3.2 结果分析

图 2 所示为采用自零拍探测法和分析腔转换法测量得到的全固态单频激光器和光纤激光器的正交

振幅与正交相位噪声。图 2(a)所示为两台单频激光器归一化的正交振幅噪声测试结果,其中 a 为全固态激光器输出激光的正交振幅噪声,分析频率大于 1.5 MHz 之后正交振幅噪声即达到散粒噪声基准; b 为关闭主动降噪 SOA 系统后光纤激光器输出激光的正交振幅噪声,在分析频率为 1.5 MHz 处正交振幅噪声仍高于散粒噪声基准 15 dB,在 0~420 kHz 范围内,其正交振幅噪声则低于全固态激光器的正交振幅噪声; c 为打开主动降噪 SOA 系统后光纤激光器输出激光的正交振幅噪声,可以看出在 1.5 MHz 处激光器的噪声降低了 10 dB,但仍高于散粒噪声基准 5 dB,同时在 0~650 kHz 范围内,光纤激光器的噪声均低于全固态激光器,尤其在 250 kHz 附近,光纤激光器的正交振幅噪声仅高于散粒噪声基准 3 dB。图 2(b)所示为两台单频激光器正交相位噪声的测试结果,其中 a 为全固态激光器正交相位噪声的测试结果,在分析频率达到 5 MHz 以后,其正交相位噪声即达到散粒噪声基准; b 为光纤激光器的正交相位噪声,可以看出该正交相位噪声在 5 MHz 处仍高于散粒噪声基准 12 dB,在 9 MHz 处仍高于散粒噪声基准 8 dB。测量中,频谱分析仪带宽设置为:分辨率带宽(RBW)为 200 kHz,视频带宽(VBW)为 51 Hz。测量结果的误差主要来源于分析腔镜及光学镜片镀膜的不完全反射引入的光学损耗、锁定分析腔半失谐状态的偏移和自零拍探测器频率响应特性的非线性等。

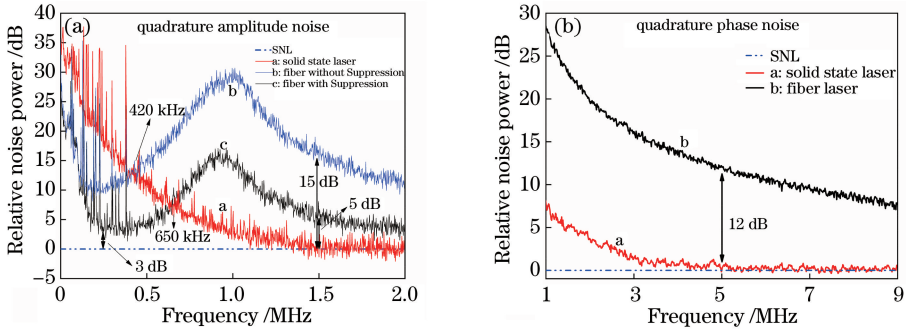


图 2 光纤激光器与全固态激光器正交分量噪声测量结果。(a)正交振幅噪声;(b)正交相位噪声

Fig. 2 Measurement results of quadrature noises of fiber laser and solid-state laser.

(a) Quadrature amplitude noise; (b) quadrature phase noise

在图 2(a)中,b 和 c 的光纤激光器正交振幅噪声测量结果中出现了较大的噪声包络,这主要是因为当激光器高于阈值运转时,激光介质通过受激辐射过程在谐振腔内形成的瞬态循环功率,与增益饱和效应达到动态平衡,形成了固有弛豫振荡^[15],其对应的噪声频率可表示为

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{\tau t_c}} \sqrt{\frac{P_{\text{pump}}}{P_{\text{th}}} - 1}, \quad (3)$$

式中: τ 为激光上能级自发辐射寿命;腔内光子寿命 $t_c = \frac{L}{c\delta}$ (L 为谐振腔的腔长, c 为真空中的光速, δ 为内腔损耗); P_{pump} 为抽运功率; P_{th} 为抽运功率阈

值。由(3)式可知,当 τ (铍离子:0.23 ms,镱离子:0.76 ms)与 $P_{\text{pump}}/P_{\text{th}}=1.3$ 为定值时,弛豫振荡峰值频率与 $\sqrt{t_c}$ 成反比,即 L 越短, t_c 越小,则 ω 越大;输出耦合镜的透射率越大,对应的 δ 越大, t_c 越小,则 ω 越大。实验中,全固态单频激光器输出耦合镜的透射率为4%,腔长为320 mm,对应的弛豫振荡峰值频率位于220 kHz附近,图2(a)所示的全固态单频激光器振幅噪声谱的弛豫振荡噪声湮没在测量光场的低频段噪声中;而光纤激光器的输出耦合透射率为20%,腔长仅为12 mm,其腔内光子寿命比全固态激光器小两个数量级,对应的弛豫振荡峰位于1 MHz附近。因此,当分析频率高于光纤激光器弛豫振荡峰值时,两种激光器噪声随分析频率的增加呈现出单调递减的变化趋势,且光纤激光器的噪声高于全固态激光器;当分析频率低于光纤激光器弛豫振荡频率时,受弛豫振荡频率噪声的影响,光纤激光器的噪声随分析频率的降低呈现出递减趋势,而此时全固态激光器的噪声仍保持增加趋势,因此当分析频率低于420 kHz时,光纤激光器的噪声低于全固态激光器。

除了光纤激光器种子光源固有的弛豫振荡频率外,在光纤放大器功率放大过程中引入了受激布里渊散射^[24](SBS)、瑞利散射^[25]、放大自发辐射^[26](ASE)等,这使得在高频处光纤激光器的强度噪声远高于全固态激光器。光纤激光器的相位噪声在全频段均高于全固态激光器,其主要原因是:自发辐射、基本热噪声、腔损耗波动、抽运源功率波动以及外界环境扰动等因素的存在,导致输出的激光在中低频段产生了严重的相位噪声。在本实验的测试过程中,采用SOA主动降噪系统仅仅抑制了光纤激光器在低频段产生的正交振幅噪声,而对相位噪声则不起作用。同时,本实验中使用的分析腔可等效于一种光场噪声的低通滤波器,当测量的分析频率低于线宽时,输入光场的相位噪声无法完全转换为反射光场的振幅噪声,即分析腔转换法不再适用,因此本研究仅给出分析频率高于1 MHz的高频相位噪声谱。结合上述分析可知,与全固态激光器相比,SOA主动降噪光纤激光器在音频段具有更优良的低噪声特性,因而更适用于高指标和实用化的低频压缩态光场的制备;而当分析频率大于1 MHz之后,全固态激光器则具有更大的优势。

4 结 论

采用自零拍探测法和分析腔转换法对比分析了

1064 nm全固态单频激光器和光纤激光器正交振幅与正交相位噪声特性。结果表明:全固态单频激光器正交振幅(正交相位)噪声在分析频率大于1.5 MHz(5 MHz)之后即达到散粒噪声基准,而光纤激光器在测量频段内均高于散粒噪声基准;当采用SOA降噪系统后,光纤激光器低频段(<650 kHz)的正交振幅噪声将远小于全固态单频激光器。因此,采用SOA主动降噪系统可有效避免激光低频噪声引入的技术噪声,更有利于获得高指标、实用化的压缩态光场输出。下一步,可以将SOA主动降噪系统应用于全固态单频激光器中,以降低其低频段噪声,获得更大压缩带宽的压缩态光场输出;同时采用模式清洁剂^[27-28]、超稳腔技术进一步抑制激光器低频段噪声,可获得高指标的音频段压缩态光场输出,并将其应用于引力波探测、光谱测量、磁场测量、生物粒子位移测量等领域。

参 考 文 献

- [1] Yin J, Cao Y, Li Y H, *et al.* Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers [J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1140-1144.
- [2] Huo M R, Qin J L, Sun Y R, *et al.* Generation of intensity difference squeezed state of light at optical fiber communication wavelength [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2018, 24(2): 134-140.
霍美如, 秦际良, 孙颖榕, 等. 光纤通信波段强度差压缩态光场的实验制备 [J]. *量子光学学报*, 2018, 24(2): 134-140.
- [3] Bai S, Wang J Y, Qiang J, *et al.* Predictive filtering-based fast reacquisition approach for space-borne acquisition, tracking, and pointing systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26462-26475.
- [4] Lin Y, Zhou Z Y, Wang R W. Opto-heterodyne measurement of thickness of coated films [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1988, 15(11): 652-655.
林跃, 周志尧, 王润文. 超外差光学膜厚的精密测量 [J]. *中国激光*, 1988, 15(11): 652-655.
- [5] Song S Y, Li Z L, Gao Y H, *et al.* Swept source optical coherence tomography system for transdermal drug delivery imaging by microneedles [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0807001.
宋思雨, 李中梁, 高云华, 等. 用于微针经皮给药成像的扫频OCT系统 [J]. *中国激光*. 2018, 45(8): 0807001.
- [6] Chen H F, Sun Y Q, Wang Y W, *et al.* High-precision laser tracking measurement method and experimental study [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0104003.
陈洪芳, 孙衍强, 王亚韦, 等. 高精度激光追踪测量

- 方法及实验研究[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0104003.
- [7] Ji N K, Zhang F M, Qu X H, *et al.* Ranging technology for frequency modulated continuous wave laser based on phase difference frequency measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1104002.
吉宁可, 张福民, 曲兴华, 等. 基于相位差测频的调频连续波激光测距技术[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1104002.
- [8] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, *et al.* Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters 2016, 116: 061102.
- [9] Horrom T, Singh R, Dowling J P, *et al.* Quantum-enhanced magnetometer with low-frequency squeezing [J]. Physical Review A, 2012, 86(2): 023803.
- [10] Taylor M A, Janousek J, Daria V, *et al.* Biological measurement beyond the quantum limit[J]. Nature Photonics, 2013, 7(3): 229-233.
- [11] Dwyer S E. Quantum noise reduction using squeezed states in LIGO [D]. Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- [12] Goda K, McKenzie K, Mikhailov E E, *et al.* Photothermal fluctuations as a fundamental limit to low-frequency squeezing in a degenerate optical parametric oscillator[J]. Physical Review A, 2005, 72(4): 043819
- [13] Yuen H P, Chan V W S. Noise in homodyne and heterodyne detection [J]. Optics Letters, 1983, 8(3): 177-179.
- [14] Villar A S. The conversion of phase to amplitude fluctuations of a light beam by an optical cavity[J]. American Journal of Physics, 2008, 76(10): 922-929.
- [15] Yang W H, Wang Y J, Li Z X, *et al.* Compact and low-noise intracavity frequency-doubled single-frequency Nd: YAP/KTP laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0502002.
杨文海, 王雅君, 李志秀, 等. 小型化、低噪声内腔倍频 Nd: YAP/KTP 单频激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502002.
- [16] Wang Y J, Zheng Y H, Shi Z, *et al.* High-power single-frequency Nd: YVO₄ green laser by self-compensation of astigmatism [J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(7): 506-510.
- [17] Yang C S, Guan X C, Zhao Q L, *et al.* High-power and near-shot-noise-limited intensity noise all-fiber single-frequency 1.5 μm MOPA laser [J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13324-13331.
- [18] Zhao Q L, Zhou K J, Wu Z S, *et al.* Near quantum-noise limited and absolute frequency stabilized 1083 nm single-frequency fiber laser [J]. Optics Letters, 2018, 43(1): 42-45.
- [19] Koyama F, Uenohara H. Noise suppression and optical ASE modulation in saturated semiconductor optical amplifiers [C] // Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004., November 7-10, 2004, Pacific Grove, CA, USA. New York: IEEE, 2004: 98-102.
- [20] Yamada M. Analysis of intensity and frequency noises in semiconductor optical amplifier [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(8): 980-990.
- [21] Li Z X, Ma W G, Yang W H, *et al.* Reduction of zero baseline drift of the Pound-Drever-Hall error signal with a wedged electro-optical crystal for squeezed state generation[J]. Optics Letters, 2016, 41(14): 3331-3334.
- [22] Zhang W H, Yang W H, Shi S P, *et al.* Mode matching in preparation of squeezed field with high compressibility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1112001.
张文慧, 杨文海, 史少平, 等. 高压压缩态光场制备中的模式匹配[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1112001.
- [23] Chen C Y, Li Z X, Jin X L, *et al.* Resonant photodetector for cavity- and phase-locking of squeezed state generation [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(10): 103114.
- [24] Hildebrandt M, Buesche S, Wessels P, *et al.* Brillouin scattering spectra in high-power single frequency ytterbium doped fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2008, 16(20): 15970-15979.
- [25] Fleyer M, Heerschap S, Cranch G A, *et al.* Noise induced in optical fibers by double Rayleigh scattering of a laser with a $1/f^{\nu}$ frequency noise [J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1265-1268.
- [26] Danion G, Bondu F, Loas G, *et al.* GHz bandwidth noise eater hybrid optical amplifier: design guidelines [J]. Optics Letters, 2014, 39(14): 4239-4242.
- [27] Li Z X, Yang W H, Wang Y J, *et al.* Optimal design of single-frequency laser system for 795 nm squeezed light source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0902002.
李志秀, 杨文海, 王雅君, 等. 用于 795 nm 压缩光源的单频激光系统的优化设计[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902002.
- [28] Yao L T, Feng J X, Gao Y H, *et al.* Generation of a low-frequency squeezed states at telecommunication wavelength[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2017, 23(2): 99-104.
要立婷, 冯晋霞, 高英豪, 等. 光通信波段低频压缩态光场的实验制备[J]. 量子光学学报, 2017, 23(2): 99-104.