

采用 NPRO 光源的零差相干光通信实验

王云祥, 李庭权, 邱 琪, 史双瑾, 苏 君

(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要: 在空间相干光通信应用中, 针对传统激光器线宽较宽、相位噪声大、易导致锁相环路失锁的问题, 研制了单频 Nd:YAG 非平面环形(NPRO)激光器, 其线宽小于 1 kHz, 相对强度噪声(RIN)低于-150 dB/Hz, 具有窄线宽、低噪声的特点。搭建了光锁相环路, 在信号光功率-67 dBm 的情况下实现了两台 NPRO 激光器的相位锁定。在此基础上开展了信号频率为 10 MHz 和 1.25 GHz 的模拟通信实验, 在信号光功率分别为-60 dBm 和-53 dBm 时可观测到较理想的眼图。在 2.5 Gbps 数字通信实验中, 接收灵敏度达到-50 dBm, 此时误码率为 3.2×10^{-6} 。系统灵敏度可接近量子极限, 明显优于传统的 IM/DD 方式, 是一种适合长距离、大容量传输的空间通信方式。

关键词: 零差相干光通信; 光锁相; 高灵敏度; 窄线宽; 低噪声

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1122003

Experiments on homodyne coherent optical communication with NPRO as light sources

Wang Yunxiang, Li Tingquan, Qiu Qi, Shi Shuangjin, Su Jun

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In the application of coherent space optical communication, traditional lasers have the problems of wide linewidth and severe intensity noise, which tends to lead to losing lock of phase locking loop. Single-frequency Nd:YAG non-planar ring oscillators (NPROs) were developed, with linewidth smaller than 1 kHz and relative intensity noise (RIN) lower than -150 dB/Hz. An optical phase locking loop was constructed and phase locking of two NPRO lasers was realized with -67 dBm signal laser power. The analog communication experiment was conducted at the signal frequency is 10 MHz and 1.25 GHz. When the signal light power is -60 dBm or -53 dBm, respectively, relative ideal eye diagram could be observed. In the digital communication experiment, the receiver sensitivity is -50 dBm at 2.5 Gbps transmission rate, the bit error (BER) is 3.2×10^{-6} . System sensitivity of quantum limit could be approached, which is much better than that in traditional IM/DD mode. This performance is suitable for long distance, large capacity space communication.

Key words: homodyne coherent optical communication; optical phase locking; high sensitivity; narrow linewidth; low noise

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61308041); 中央高校科研业务费(ZYGX2014J043)

作者简介: 王云祥(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光技术及应用方面的研究。Email: wangyunxiang@uestc.edu.cn

0 引言

零差相干光检测具有灵敏度高的突出优势,在长距离空间光通信方面具有重要应用^[1-5]。激光相位锁定是其中的关键技术,其对激光源的窄线宽、低噪声和可调谐特性提出了很高的要求^[6]。零差相干光通信的设想诞生于激光发明之初,之后相关理论和技术得到快速发展,并率先在气体激光器上实现了激光相位锁定和数据传输。但由于气体激光器的寿命、体积、效率等方面的限制,难以满足空间应用的需求。

随着半导体激光器的发展^[7],其线宽得到不断压缩,且发展出多种调谐方式,具备了应用于相干光通信的可能性。研究者率先实现了两台 GaAlAs 半导体激光器的相位锁定。为提高锁相的稳定性,还通过外腔反馈的方式降低了半导体激光器的频率噪声,并实现了激光器的相位锁定。S.Norimatsu 进一步实现了外腔半导体激光器的相位锁定,相位误差为 7.4°,并进行了 10 Gbps 的信号传输,接收灵敏度为 -34.2 dBm,即 297 photons/bit^[8]。半导体激光器虽具有体积小、成本低的优势,但其线宽较宽,相位噪声大,易导致锁相环路失锁,不利于系统的可靠运行。通过改进锁相环结构,可在一定程度上降低对激光器的线宽要求,但增大了环路或处理电路的复杂度,且限制了通信终端的信号处理能力^[2]。

随着二极管泵浦的固体激光技术的发展,其相干性好、噪声低、寿命长、可靠性高等优势得到充分发挥,逐步取代气体和半导体激光器而成为零差相干光通信系统中的首选光源^[9-12]。目前 Nd:YAG 单块非平面环形激光器(NPRO)的线宽和噪声可完全满足光锁相环和通信系统的要求,并已成功应用于空间零差相干光通信系统中,在 5.6 Gbps 的传输速率下可达到 -44.9 dBm 的接收灵敏度^[1,3]。文中针对零差相干光通信的应用需求研制了窄线宽、低噪声 NPRO 激光器,测试了激光器各项性能指标参数,搭建了光通信系统,实现了高精度激光相位锁定,在此基础上开展了零差相干光通信实验研究。

1 实验结构

零差相干光通信实验结构如图 1 所示。本振和信号光源均为窄线宽、低噪声 Nd:YAG NPRO 激光

器。信号激光器输出经光纤耦合输入隔离器,而后输入相位调制器,采用 BPSK 调制格式,而后经过衰减器输入光混频器。衰减器的主要作用是模拟空间传输过程中的光损耗,在空间传输过程中,色散和非线性效应的影响基本可忽略。本振激光经光纤耦合后输入光衰减器,而后输入光混频器。这里衰减器的主要作用是调节输入光电探测器的本振光功率,以获得最佳的灵敏度。信号光和本振光在光混频器内进行干涉,并输出相位差为 0°和 180°的混频光信号,采用高速平衡探测器进行接收,可起到噪声抑制的作用,得到相位误差信号。而后将相位误差信号输入环路滤波器,产生相位控制信号。该信号进行放大后输入激光器的压电调频控制端,从而形成锁相闭环环路。平衡探测器的输出信号经放大和滤波后即得到待恢复数据。实验中采用 Wandel & Golterman 公司的功率计,型号为 WG02P-15B,测量功率下限为 -70 dBm;Tektronix 公司的示波器,型号为 DP07254,带宽为 2.5 GHz;Anritsn 公司的误码仪,型号为 MT1810A,最高码率为 10 Gbps。

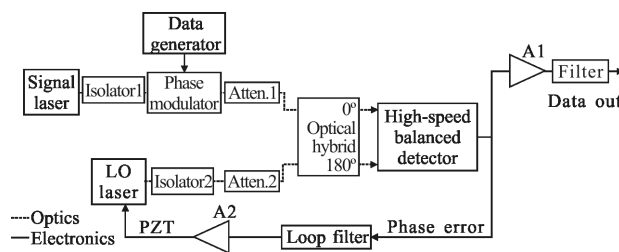


图 1 零差相干光通信实验结构

Fig.1 Schematic of experimental setup of homodyne coherent optical communication

Nd:YAG NPRO 激光器的线宽和强度噪声针对零差相干光通信应用进行了特殊设计。激光晶体尺寸为 3 mm×12 mm×13 mm,二面角为 45°。激光输出面镀膜对泵浦光高透,对 1 064 nm 的 p 光的透过率为 13%,对 s 光的透过率为 4%。采用较长的腔长有利于获得窄线宽输出,而低输出透过率有利于降低激光强度噪声。泵浦源为 3 W 光纤耦合半导体激光器,光纤芯径 100 μm,数值孔径 0.22,光纤输出经泵浦耦合镜会聚输入晶体,晶体内泵浦光腰直径为 175 μm 左右。

采用延时自外差拍频法测量了激光线宽,其线

宽小于 1 kHz,如图 2 所示。在自由运转情况下,激光输出噪声峰值频率为 280 kHz,相对强度噪声(RIN)为-105 dB/Hz 左右。采用光电负反馈方式开展了激光噪声抑制实验,在整个频谱范围内的相对强度噪声抑制到-150 dB/Hz 以下,如图 3 所示。激光器阈值泵浦功率为 0.35 W,斜率效率为 54%,单频输出功率达到 1 W 以上,如图 4 所示。

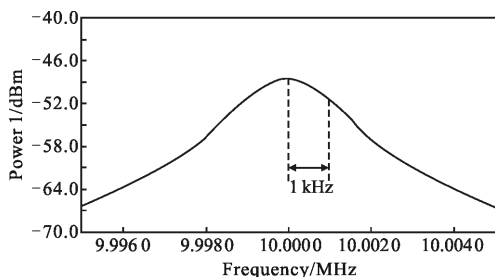


图 2 激光线宽测试结果

Fig.2 Laser linewidth test result

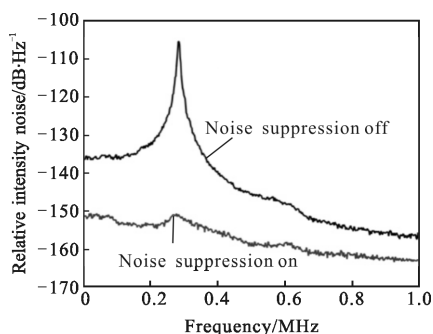


图 3 噪声抑制结果

Fig.3 Noise suppression result

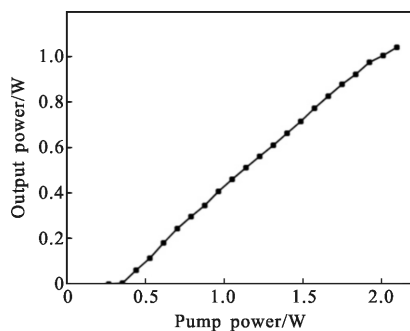


图 4 激光输出功率与泵浦功率的关系

Fig.4 Relationship between laser output power and pump power

激光器的频率调制可采用温度和压电两种方式。通过改变激光晶体的温度,可引起晶体折射率和

几何尺寸的微小变化,进而改变输出激光频率。温度调制范围可达到 60 GHz 以上,调制系数为 3 GHz/K。将压电陶瓷片粘接在激光晶体的顶面上,当对压电陶瓷片施加电压驱动信号时,压电陶瓷产生微小的收缩和伸张。因此在压电陶瓷内产生应力,该应力传导到晶体内产生应变,引起晶体折射率和几何尺寸的微小变化,进而改变激光频率。压电调制范围可达到 100 MHz 以上,调制系数为 3 MHz/V,压电调制响应带宽为 100 kHz。为实现对激光相位噪声的快速校正,主要利用压电调频方式实现锁相。

2 激光频率锁相实验结果

在开环状态下可观察到稳定的相位误差信号,如图 5(a)所示,相位误差信号的幅度为 ± 1 V 左右。由于环路未锁定,该信号即为两激光器输出的拍频信号。在激光器稳定工作状态下,在 1 min 内两激光器拍频的漂移小于 5 MHz。在闭环情况下,调试信号激光器的工作温度,使两激光器的频差减小到百 kHz 量级,即可观察到锁相现象。锁相精度与两方面的因素有关:一是光源、光路和电路的噪声,二是环路的增益、控制带宽和延时。在噪声方面,光源噪声主要取决于激光器线宽和强度噪声,光路噪声主要由环境振动和温度变化决定,而电路噪声主要包括探测和放大引起的噪声。对于一个稳定的环路,在环路噪声确定的情况下,环路延时越小,控制带宽越宽且增益越高,则锁相精度越高。环路延时由环路结构决定,不能无限减小;控制带宽取决于压电调频带宽;在此情况下,增益太高反而会导致环路不稳定。理论分析和实验表明,通过合理选取增益,使环路阻尼系数为 0.7 附近时可保证较高的环路稳定性和锁相精度,此时取环路放大器增益为 16 dB。图 5(b)为相位

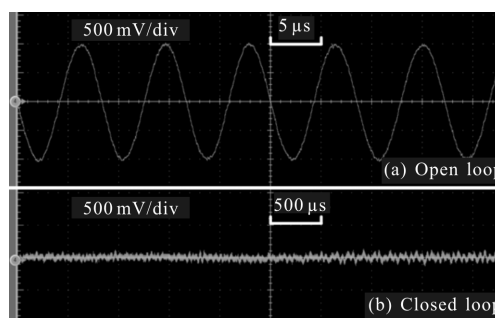


图 5 相位误差信号

Fig.5 Phase error signal

锁定状态下相位误差信号,可以看出两台激光器的相位差锁定在 0° 附近。误差信号均方根值为 40 mV, 对应锁相精度为 2.3° 。

考虑到在空间光通信应用中,经过远距离传输,终端接收到的信号光非常微弱,进一步开展了微弱光信号锁相的实验。通过提高环路放大器的增益,可使环路阻尼系数保持在 0.7 左右,仍可达到小于 10° 的锁相精度。实验中当输入光混频器的信号光功率衰减到 -67 dBm 时,仍实现了相位锁定。在更低的信号光功率下,量子噪声的影响更加显著,环路难以锁定。

为考察环路的可靠性,进一步开展了锁相时间测试,多次测量表明,锁相时间大于 1 h。图 6 所示为 1 000 s 的测试结果,图中所示信号为相位误差信号,时间轴刻度为 100 s/div。从图中可以看出,锁相后激光相位工作点保持恒定,即有源比例积分滤波器具有良好的抵抗信号光频率漂移(或斜升)的能力,这是有源比例积分滤波器相对于无源滤波器的一大优势。经测试,压电驱动信号接近 ± 8 V 时,环路仍保持锁定。考虑到压电调谐系数为 3 MHz/V,因此环路同步带可达到 48 MHz。

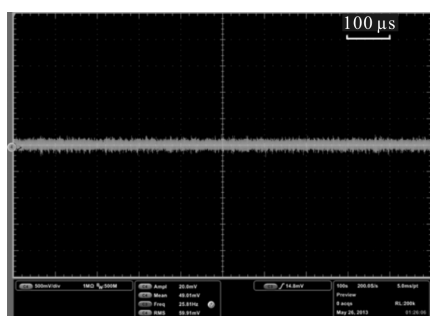


图 6 锁定时间测试结果

Fig.6 Phase-locking time test result

3 零差相干光通信实验结果

3.1 模拟通信

在实现稳定锁相的基础上开展了零差相干光通信实验。在模拟信号通信实验中,调制信号为 10 MHz 的正弦信号。图 7(a)~(d)分别是输入光混频器的信号光功率为 -30 、 -40 、 -50 、 -60 dBm 时的结果。从图中可以看出,当接收功率在 -50 dBm 以上时,所恢复的信号质量较高。而当接收功率降低到 -60 dBm 时,信号质量明显变差。

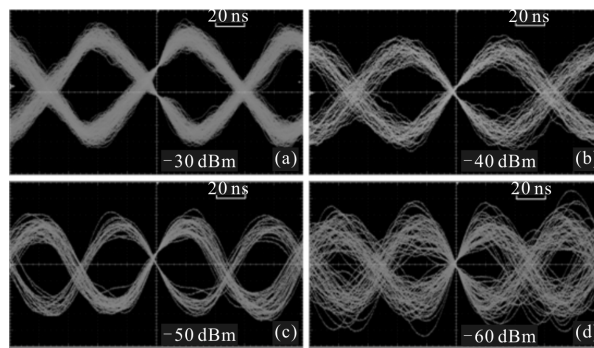


图 7 10 MHz 正弦信号调制下的零差相干光通信实验结果

Fig.7 Experimental results of homodyne coherent optical communication at modulation with 10 MHz sinusoidal signal

调制信号频率为 1.25 GHz 时的解调信号眼图如图 8 所示。图 8(a)~(d)分别是信号光功率为 -40 、 -45 、 -50 、 -53 dBm 时的结果。观察眼图可知,随着信号光功率逐渐减小,解调信号波形逐渐紊乱,通信质量下降。

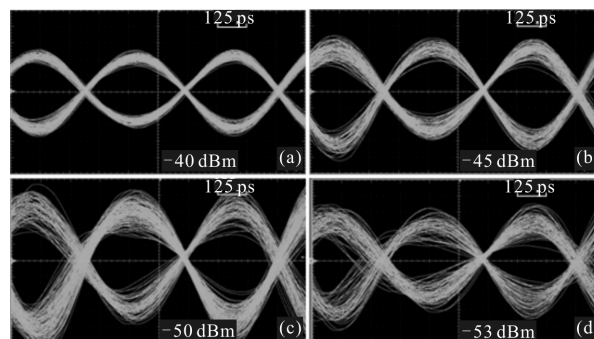


图 8 1.25 GHz 正弦信号调制下的零差相干光通信实验结果

Fig.8 Experimental results of homodyne coherent optical communication at modulation with 1.25 GHz sinusoidal signal

3.2 数字通信

在数字信号通信实验中,数据调制采用 BPSK 方式,相位调制器为 10 Gbps LiNbO₃ 波导相位调制器,角度调制幅度为 $\pm 75^\circ$ 。对于调制幅度的选取需综合考虑锁相和数据恢复两个方面。调制幅度太小,则搬移到载频的边带的功率太低,影响接收灵敏度;而调制幅度太大,则大大降低载频自身的功率,降低锁相精度。根据实验优化,调制幅度为 $\pm 75^\circ$ 时的接收效果最好。当然可以采用 Costas 锁相环,并采用载波恢复措施来同时保证 $\pm 90^\circ$ 的调制幅度和载波功率的完

全恢复。但在高传输速率下,对光路和电路的对称性以及电路性能均提出了很高的要求,这也是下一步改进的方向。

将误码仪输出的数字信号调制到信号光上。环路锁定后,经过平衡探测和放大滤波后输入误码仪,测得其误码率的大小。在不同的信号光功率下测量了误码率,误码率随着信号光功率的减小而逐渐增大。在 1.25 Gbps 传输速率下的数字通信实验结果如图 9 所示。理论分析表明,在 10^{-9} 误码率下,量子噪声极限约为 12 photons/bit,该码率下的量子噪声极限为 -56 dBm。

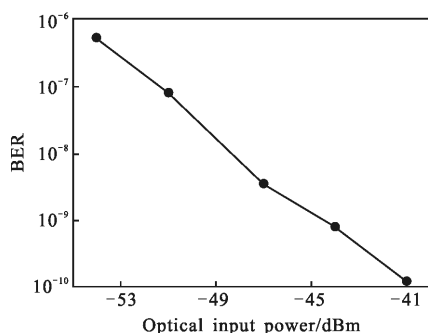


图 9 1.25 Gbps 传输速率下的零差相干光通信实验结果
Fig.9 Experimental result of homodyne coherent optical communication at 1.25 Gbps transmission rate

图 10 为 2.5 Gbps 速率下的数字通信实验结果。从图中可以看出,在 -42 dBm 信号光功率下,系统误码率接近 10^{-10} 。而在 -50 dBm 信号光功率下,系统误码率为 3.2×10^{-6} 。根据理论分析,在该码率下的极限灵敏度为 -53 dBm。要进一步提高灵敏度,除了上文提到的措施外,对于高码率传输,还需进一步改进数据恢复模块的滤波和降噪特性。

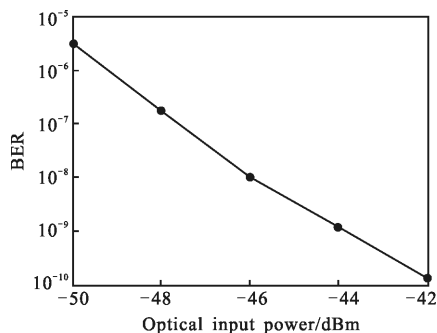


图 10 2.5 Gbps 传输速率下的零差相干光通信实验结果
Fig.10 Experimental result of homodyne coherent optical communication at 2.5 Gbps transmission rate

在实际的星间光通信应用中,激光器性能会受到空间环境的影响。例如空间温度变化会引起激光频率的漂移,为克服该问题,实验中所采用的激光器进行了二次封装,并采取了严格的温控措施,在实际空间应用中可进一步引入激光频率捕获子环路,以提高系统可靠性。考虑到相干的要求,激光偏振方向应该保持稳定,根据理论分析,偏振方向是由晶体输出面上的激光 s 光和 p 光反射率差决定的,其输出偏振态不随温度变化而改变,这一点已通过实验证实;而且,在激光器内设置了玻片和偏振分光棱镜,以保证偏振方向的稳定性。环境振动也会影响锁相的精度和通信性能,通过在环路中主动引入相位抖动,测试表明,环路可以很好地补偿 4 kHz 以内的相位抖动,这也是主要的振动频谱范围。

4 结论

零差相干光通信的突出优势是接近量子极限的超高灵敏度,但该通信模式需要高性能的光锁相环和光源,以保证通信的可靠性。为此,研制了窄线宽、低噪声、可调谐且高效率的 NPRO 激光器。设计并搭建了光锁相环路,锁相精度达到 2.3° ,锁相时间大于 1 h,可实现对 -67 dBm 的极微弱信号光的相位锁定,完全满足空间通信系统的要求。以光锁相环路为基础开展了零差相干光通信实验研究,进行了模拟信号传输和数字信号传输实验。在传输信号频率为 10 MHz 和 1.25 GHz 的模拟信号时,信号光频率低于 -50 dBm 的情况下可观测到较高质量的解调信号。数字信号传输实验中,在 1.25 Gbps 码率下,接收灵敏度达 -56 dBm (误码率 5.4×10^{-6}),而在 2.5 Gbps 码率下,接收灵敏度达到 -53 dBm (误码率 3.2×10^{-6})。通过对环路损耗和噪声抑制方面的改进,预期可实现灵敏度的进一步提升。

参考文献:

[1] Gregory M, Heine F, Kampfner H, et al. Coherent inter-satellite and satellite-ground laser links [C]//Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering, 2011, 7923: 301-308.

[2] Sano A. Recent progress in coherent optical communication technologies [C]//Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering, 2011, 7958: 501-507.

- [3] Gregory M, Heine F, Kampfner H, et al. Inter-satellite and satellite-ground laser communication links based on homodyne BPSK[C]//Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2010, 7587: E01–E05.
- [4] Huang Jian, Zhang Peng, Deng Ke, et al. Boundary parameters of adaptive optical system in satellite to ground coherent laser communication system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1204–1211. (in Chinese)
黄健, 张鹏, 邓科, 等. 星地相干激光通信中的自适应光学系统边界参数设计 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1204–1211.
- [5] Dai Yonghong, Liu Yanfei, Zhou Haotian, et al. Sensitivity testing and experiment of balanced photodetectors in the space coherent optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3110–3116. (in Chinese)
代永红, 刘彦飞, 周浩天, 等. 空间相干光通信中平衡探测器灵敏度测试实验 [J]. *红外激光与工程*, 2015, 44(10): 3110–3116.
- [6] Lu M, Park H, Bloch E, et al. A highly integrated optical phase-locked loop for laser wavelength stabilization [C]// Photonics Conference(IPC), IEEE, 2012: 844–845.
- [7] Tian Kun, Zou Yonggang, Ma Xiaohui, et al. Surface emitting distributed feedback semiconductor lasers [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 51–64. (in Chinese)
田锟, 邹永刚, 马晓辉, 等. 面发射分布反馈半导体激光器 [J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 51–64.
- [8] Norimatsu S, Iwashita K, Noguchi K. 10 Gbit/s optical PSK homodyne transmission experiments using external cavity DFB LDs [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(10): 648–649.
- [9] Zhao Zhenyang, Zhang Peng, Tong Shoufeng. Delayed self-homodyne phase noise measurement system with optical coherent receiver[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3211–3215. (in Chinese)
赵振阳, 张鹏, 佟首峰. 基于延时自零差光相干接收机的激光器相位噪声测试系统 [J]. *红外激光与工程*, 2015, 44(11): 3211–3215.
- [10] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaogang, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 65–73. (in Chinese)
曾飞, 高世杰, 伞晓刚, 等. 机载激光通信系统发展现状与趋势 [J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 65–73.
- [11] Luan Kumpeng, Yu Li, Shen Yanlong, et al. Widely tunable all-solid-state Cr:LiSAF lasers with external cavities [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3316–3321. (in Chinese)
栾昆鹏, 于力, 沈炎龙, 等. 外腔调谐的全固态 Cr:LiSAF 激光器 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3316–3321.
- [12] Amili A E, Alouini M. Noise reduction in solid-state lasers using a SHG-based buffer reservoir[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1149–1152.