

doi:10.3788/gzxb20164509.0914002

高功率全光纤光载微波信号功率放大器

康英,程丽君,杨苏辉,赵长明,张海洋,何滔

(北京理工大学 光电学院 光电子信息技术实验室,北京 100081)

摘 要:为获得可应用于光载微波雷达系统的高功率双频激光源,用 1 064 nm 窄线宽 Nd:YAG 单块非平面环形腔激光器作为单频种子源,其输出分为两路,一路直接耦合入光纤,另一路经声光移频,与未移频的光束合束后获得中心频差为 150 MHz、功率为 20 mW 的双频激光。利用以半导体激光泵浦和掺 Yb³⁺ 石英光纤为增益介质的 3 级主振荡功率放大系统对双频固体激光器输出的双频激光进行放大,获得 50.3 W 的双频放大输出,光束质量因子为 1.30,第三级主放大斜效率为 74%。双频成分的幅度比、频差在放大过程中得到保持,拍频调制深度及信噪比等特性也未有恶化。双频光纤功率放大器在频差稳定和高功率输出等方面均有良好的表现。

关键词:激光技术;光纤放大器;光载射频;双频;声光调制器;高功率激光器;高斜度效率

中图分类号:TN24

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)09-0914002-5

High Power Optical-carried Radio Frequency Signal Fiber Power Amplification

KANG Ying, CHENG Li-jun, YANG Su-hui, ZHAO Chang-ming, ZHANG Hai-yang, HE Tao

(Laboratory for Opto-electronic Information Technology, School of Optoelectronics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To obtain the high power dual-frequency laser source for lidar-radar system, a narrow-linewidth Nd:YAG monolithic nonplanar ring-oscillator laser with central wavelength of 1 064 nm was used as a single-frequency seed laser. The output was split into two parts, one was transmitted in optical fiber and the other was frequency shifted by an acoustooptic modulator. The combined beam had power of 20mW and contained two frequency components with frequency separation of 150 MHz. A three-stage master oscillator power amplifier using diode laser pumped and Yb³⁺-doped quartz fiber as gain medium was proposed to boom the output power of dual-frequency laser. The maximum amplified power was 50.3 W, beam quality factor was 1.30 and the slope efficiency of the third-stage main amplifier was 74%. The amplitude ratio and frequency separation of the dual-frequency components were maintained in the amplification process. The modulation depth and signal-noise ratio of the beat signal had not deteriorated. Dual-frequency laser fiber power amplifier provides robust performance of both the stable beat frequency and the relative high output power.

Key words: Laser technique; Fiber amplifiers; Radio-over-fiber; Dual-frequency; Acoustooptic modulators; High power lasers; High slope efficiency

OCIS Codes: 140.3510; 140.3280; 140.3295; 140.3518

0 引言

光载微波雷达是一种新型激光雷达,它将激光雷达和无线电雷达结合起来,将微波频率调制到激光束上,利用两个光波频率的拍来完成测量,由于拍频信号

对应的波长在米数量级,其在大气中的抗干扰能力大幅提高,并且在信号处理方面可以借鉴发展比较完善的微波雷达技术,保持了激光雷达高的空间分辨率,提高了雷达整机性能^[1-2]。

电光晶体双频固体激光器^[3]、耦合腔双频固体激

基金项目:国家自然科学基金(No. 61275053)资助

第一作者:康英(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤放大器. Email: ykangsx@126.com

导师(通讯作者):杨苏辉(1968-),女,教授,博士,主要研究方向为固体激光器及激光应用. Email: subuiyang@bit.edu.cn

收稿日期:2016-03-31;录用日期:2016-05-17

<http://www.photon.ac.cn>

光器^[4]、声光调制型双频固体激光器^[5]、半导体双频激光器^[6]等可直接获得双频激光,但获得的双频功率均较小,难以进行远距离探测.为提高测量距离,需要稳定、高功率的双频光源.

近几年来,半导体泵浦光纤材料和工艺技术的不断发展使光纤放大系统进展很快,光纤放大器是现阶段应用最广泛的激光放大技术之一,其中主振荡功率放大器(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)具有诸多优点,技术发展比较成熟,但其主要被应用于单频率的激光放大^[7-10].有关多频率激光同时放大的实验较少,且大部分工作将多频率激光放大应用于受激布里渊散射的抑制以提高激光功率^[11-14].

本文基于1064 nm的Nd:YAG单块非平面环形腔激光器(Nonplanar Ring-Oscillator Laser, NPRO)^[15],用分束-声光移频-合束方式实现了频差可调的双频激光源,再将双频小信号接入三级主振荡功率放大系统,获得50.3W双频激光放大输出.并对放大前后双频光及拍频信号进行分析.

1 实验系统

1.1 双频信号源

由808 nm半导体激光器泵浦的Nd:YAG单块非平面环形腔激光器,空间输出波长为1064 nm、线宽为2 kHz的窄线宽单频激光,使用自聚焦透镜将输出光耦合进单模光纤中,耦合效率可达65%.如图1,单频激光进入一分二光纤耦合器,分光比为1:6,其中单臂占1/7的激光沿光纤传输,单臂占6/7的激光以布喇格角入射到声光调制器(Acoustooptic Modulator, AOM)上,声光移频器连接射频源(Radio Frequency, RF),其射频可调范围 $f_{RF}=125\sim 175$ MHz,两束激光都接由偏振控制器(Polarization Controller, PC)调节偏振态,并通过二合一耦合器进行合束后输出双频种子光.

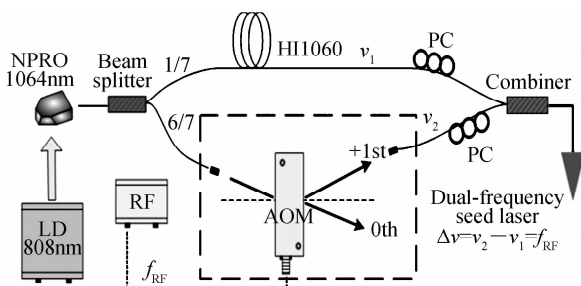


图1 双频种子激光组成

Fig. 1 Schematic of the dual-frequency seed laser

1.2 双频光纤放大

由于两个光的频率间隔很小(125~175 MHz),增益光纤在两个波长处的发射截面和吸收截面几乎相等,双频光不存在增益竞争,其放大倍数相等,可用单

频光纤放大理论模型进行分析.实验中,采用三级MOPA系统对双频种子光进行放大,结构如图2.

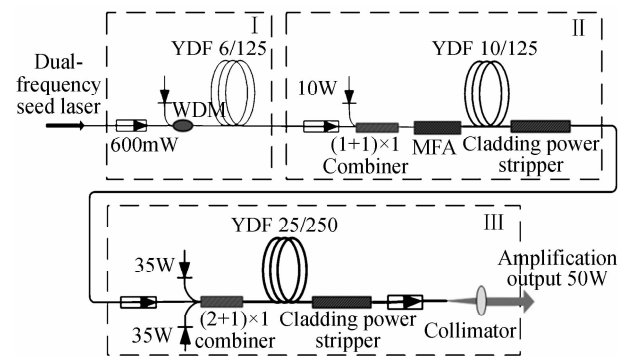


图2 双频激光三级光纤放大示意图

Fig. 2 Configuration of the dual-frequency laser three-stage fiber amplifier

I级为预放大,种子光通过隔离器,600 mW的976 nm泵浦光由波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)接入,再连接5.5 m长的单包层掺镱增益光纤(Yb^{3+} -Doped Fiber, YDF)(6/125 μm , $\text{NA}=0.13$)进行放大.

II级放大中,激光先通过隔离器,再连接一个(1+1) \times 1合束器,用一个10 W的半导体激光器进行泵浦.增益光纤为5 m长的双包层掺镱光纤 YDF(10/125 μm , $\text{NA}=0.075/0.46$).因前后芯径不匹配,采用模场适配器(Mode Field Adaptor, MFA)来衔接不同芯径的光纤.因为双包层光纤中存在大的内包层数值孔径(≥ 0.46)和小的纤芯数值孔径(可低至0.06),包层中会残留泵浦光、从纤芯泄漏到内包层中传输的放大自发辐射光以及信号光.因此在输出端连接了包层功率剥除器,以吸收在双包层光纤中内包层部分传输的光,而在纤芯中传输的信号光能够被很好地保持.

III级主放大中,信号光先通过一个大功率的光纤隔离器后连接(2+1) \times 1合束器,由两个35 W的半导体激光器进行泵浦,合束器输出端为25/250 μm 双包层非掺杂光纤,熔接到大模面积双包层掺镱光纤(25/250 μm , $\text{NA}=0.065/0.46$)上,依据实验经验,泵浦光经光纤充分吸收99%,放大效果最佳.主放大级光纤对976 nm泵浦光吸收系数为4 dB/m,对应最佳光纤长度为5 m.放大后的双频激光再通过一个大功率的光纤包层功率剥除器提高光束质量.在输出端接大功率隔离器防止回光损坏MOPA系统.为便于应用,对放大光进行准直,准直后的光束直径为5 mm,发散角为1 mrad.

2 结果及讨论

2.1 双频功率放大结果

双频激光源输出功率为20 mW, I级预放大可将双频种子光放大至100 mW, II级放大系统可将I级的双频光信号放大至1W,在III级放大中,双频功率可

放大至 50.3 W. 第三级放大功率随泵浦功率变化如图 3, 平均光-光转换效率达到 74%. 双频光继续放大受限于泵浦光功率, 增加泵浦光功率有望进一步提高双频光输出功率.

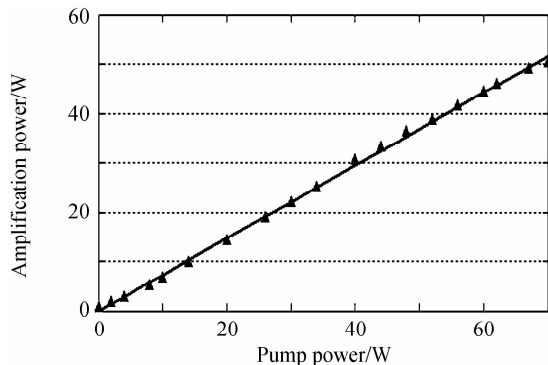


图 3 Ⅲ级放大器输出功率随泵浦功率的变化
Fig. 3 Output power of three-stage amplifier versus pump power

2.2 放大前后双频激光测试

为检测放大器对双频信号光的影响, 实验用扫描法布里-珀罗干涉仪 (Fabry - Péro t Interferometer, FP) 对放大前 20 mW、放大后 20 W 的双频激光频谱进行监测. 图 4(a) 是放大前双频信号的 FP 扫描图, 双频间隔为 150 MHz, 两个频率信号强度比为 1 : 2; 图 4 (b) 是放大后双频信号的 FP 扫描频谱图, 双频间隔及两个频率分量的强度比均未发生改变.

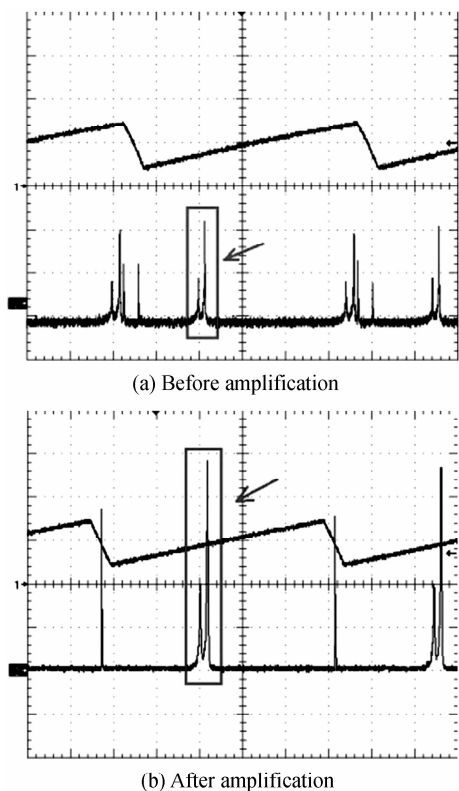


图 4 放大前后双频信号
Fig. 4 Dual-frequency signal before and after amplification

2.3 放大前后拍频测试

实验中, 设定声光调制器的射频频率为 150 MHz, 用 1 GHz 探测器接收放大前后输出光, 接入频谱仪监测频差信号. 图 5(a)、(b) 分别为放大前后的拍频信号, 频率均为 150 MHz, 证明放大器很好地保持了双频分量的频差.

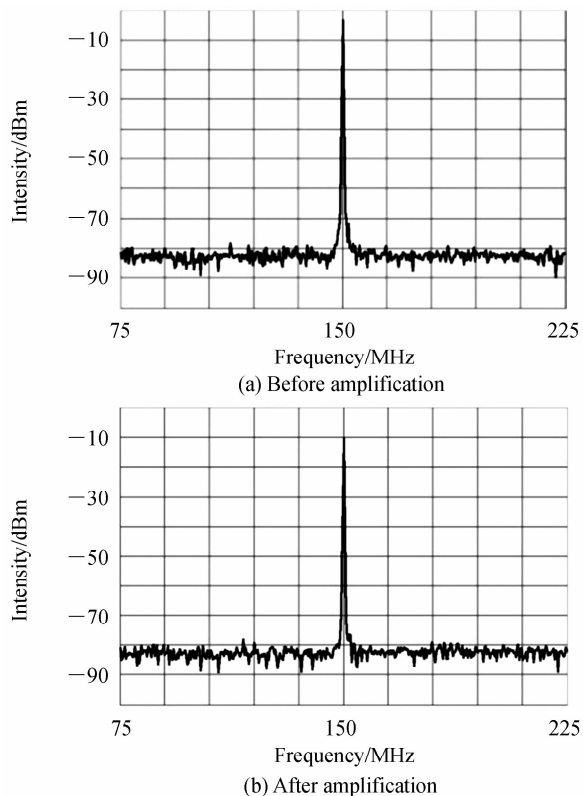


图 5 放大前后拍频信号频谱
Fig. 5 Spectra of beat signal before and after amplification

在声光调制器的射频频差设定为 150 MHz 的情况下, 频谱仪测量双频信号为 10.6 mW. 对此测量了拍频信号降至半高功率下对应的两个拍频频率, 分别为 142.0 MHz 和 159.5 MHz, 说明整体 MOPA 系统的 3 dB 带宽为 17.5 MHz.

2.4 放大前后调制深度比较

从光拍频理论可知, 拍频信号的调制深度与两个频率光的信号功率比及两个频率光的偏振态有关. 对此, 调节两路信号功率一致, 调节双频分路的偏振控制器使偏振情况达到最优, 用 3 GHz 光纤接入探测器接收双频光, 接入示波器得到放大前后拍频波形图, 如图 6. 调制深度为

$$d_M = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}} \quad (1)$$

式中, V_{\max} 为调制信号电压最大值, V_{\min} 为调制信号电压最小值. 据此, 计算得出放大前拍频调制深度为 72.66%, 放大后拍频调制深度为 71.11%, 可见三级放大过程并没有明显降低调制深度, 微小差异可能由测量原因引起.

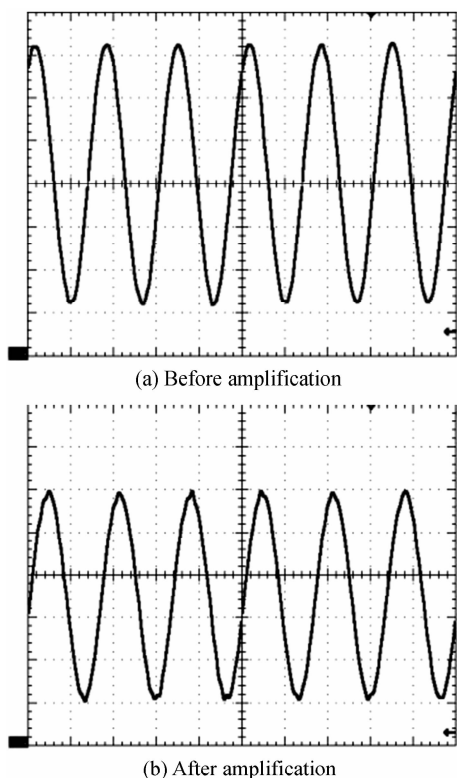


图 6 放大前后拍频波形

Fig. 6 Oscillograms of beat signal before and after amplification

2.5 放大前后相位噪声及信噪比比较

用频谱仪分别记录了放大前后的相位噪声值,发现二者基本无异,图 7 为放大后拍频信号相位噪声随偏离载频变化曲线.可以测得偏离 20 kHz 处相位噪声为 -79.94 dBc/Hz, 偏离越远,相位噪声越小,大于 600 kHz 处,相位噪声稳定于 -107.50 dBc/Hz. 其中, 260 kHz 处相位噪声很高,分析其正好为单块非平面环形腔弛豫振荡噪声频率^[16].

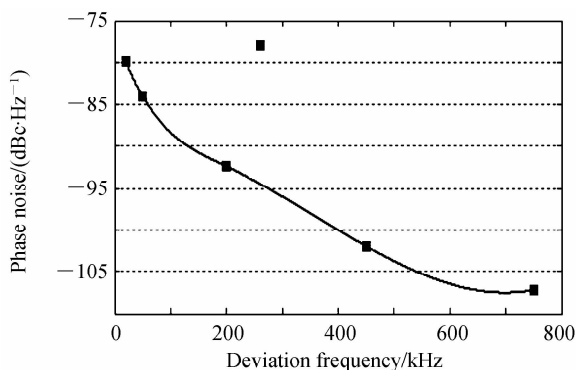


图 7 拍频信号相位噪声随偏离载频的变化

Fig. 7 Phase noise of beat signal versus carrier frequency deviation

实验用频谱仪记录了放大前后拍频频谱,如图 8. 中心峰值频率均为 150 MHz,放大前后背景噪声都近似为 -103 dBm. 测得放大前后拍频信号分别为 -25 dBm 及 -23 dBm,信噪比分别为 78 dB 及 80 dB,放大后信噪比稍微有所改善但不明显.

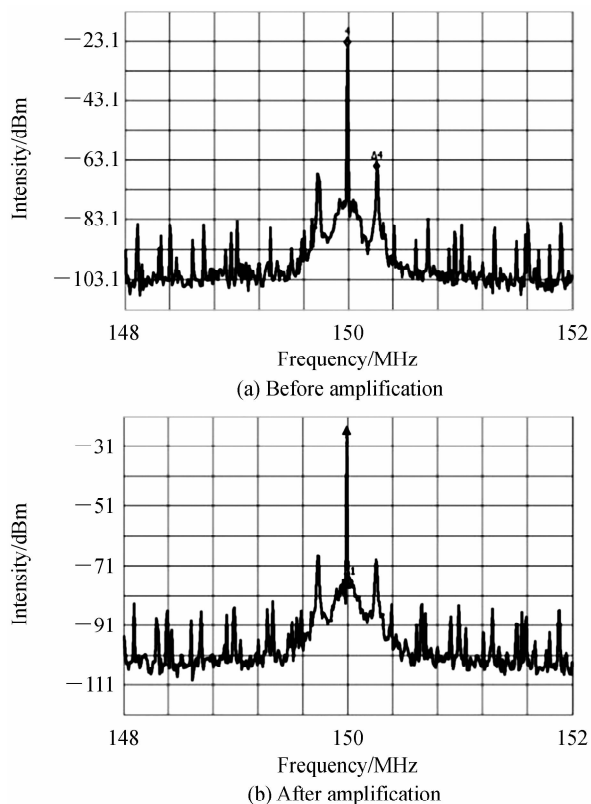


图 8 放大前后拍频信号及相位噪声

Fig. 8 Beat signal and phase noise before and after amplification

2.6 放大前后双频激光光束质量测试

分别对放大前后双频激光的光束质量 M^2 进行测试,结果如图 9. 双频种子光经单模光纤输出,接近基模高斯光束,经测试,光束质量 $M^2 = 1.13$. 放大的双频激光由大芯径多模光纤输出,光纤的波导结构决定其光束质量会变差. 实验中,对多模光纤缠绕放置可以有效抑制高阶模,提高光束质量. 另外,放大过程中加入包层功率剥除器,也可改善光束质量,最终放大光的光束质量 $M^2 = 1.30$.

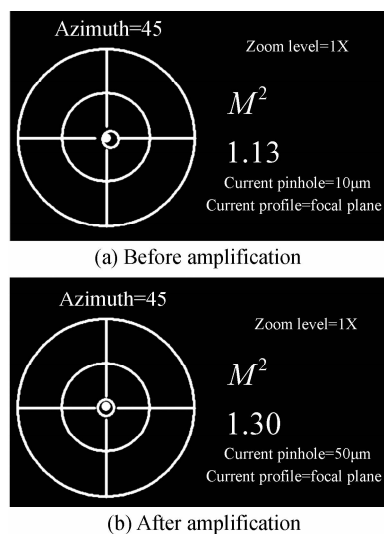


图 9 放大前后双频激光光束质量

Fig. 9 Beam quality of dual-frequency laser before and after amplification

4 结论

设计了基于三级 MOPA 结构的双频激光放大系统. 单频种子光分为两路, 其中一路被声光调制器移频, 合束后获得稳定的双频种子光. 接入三级 MOPA 放大系统, 20 mW 的双频光可放大至 50.3 W, 其光束质量 $M^2=1.30$. 放大前后双频光功率比没有明显变化, 150 MHz 频差、调制深度、相位噪声及信噪比都能得到很好地保持. 设计的双频激光源及全光纤放大系统可为将来远距离光载微波雷达等探测系统提供很好的光源及实验基础.

参考文献

- [1] MORVAN L, LAI N D, DOLFI D, *et al.* Building blocks for a two-frequency laser lidar-radar: A preliminary study[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(27): 5702-5712.
- [2] PILLET G, MORVAN L, DOLFI D, *et al.* Wideband dual-frequency lidar-radar for simultaneous velocity and high-resolution range profile measurements[C]. SPIE, 2009, 7323: 73230z.
- [3] PILLET G, MORVAN L, DOLFI D, *et al.* Self-stabilization of the beat note of a 1.5 μm dual-frequency laser. Applications to optoelectronic microwave oscillators[C]. IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics., 2008;291-294.
- [4] GUDELEV V G, MASHKO V V, NIKEENKO N K, *et al.* Diode-pumped cw tunable two-frequency YAG: Nd³⁺ laser with coupled resonators[J]. *Applied Physics B*, 2003, **76**(3):249-252.
- [5] FANG F Z, NGOI B K A. Two-frequency laser measuring technique with high axis velocity[C]. SPIE, 1998, **3407**:454-457.
- [6] MURASAWA K, HIDAKA T. Electrically tunable and dual-wavelength semiconductor laser with a liquid crystal display [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, **48**(2): 022202.
- [7] JEONG Y, NILSSON J, SAHU J K, *et al.* Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**(3): 546-551.
- [8] MATTHIAS H, MAIK F, PATRICK K, *et al.* Single-frequency master-oscillator photonic crystal fiber amplifier with 148 W output power[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(23): 11071-11076.
- [9] ZHANG Xiao, SONG Yan-rong, YU Zhen-hua, *et al.* Characteristics of ytterbium-doped double-cladding pulsed fiber amplifiers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1287-1291.
张晓, 宋晏蓉, 于振华, 等. 掺镱双包层脉冲光纤放大器的特性研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9):1287-1291.
- [10] LIU Xiao-juan, FU Sheng-gui, GUO Li-ping, *et al.* MOPA structured 1120nm Yb-doped all fiber amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906001.
刘晓娟, 付圣贵, 郭立萍, 等. 基于 MOPA 结构的 1120 nm 掺 Yb 光纤放大器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0906001.
- [11] DING Ya-qian, QI Yun-feng, LIU Yuan, *et al.* Study on polarization maintaining fiber power amplification characteristic of dual-wavelength fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **03**(03):6-11.
丁亚茜, 漆云凤, 刘源, 等. 双波长光纤激光器的保偏光纤功率放大特性研究[J]. *中国激光*, 2014, **03**(03):6-11.
- [12] LENG J, WANG X, XIAO H, *et al.* Suppressing the stimulated Brillouin scattering in high power fiber amplifiers by dual-single-frequency amplification [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, **9**(7):532-536.
- [13] WANG X, LENG J, XIAO H, *et al.* Simultaneous spectrum and coherent combining by active phasing dual two-tone all-fiber MOPA chains[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(8):1338-40.
- [14] DAJANI I, ZERINGUE C, SHAY T M. Investigation of nonlinear effects in multitone-driven narrow-linewidth high-power amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(2):406-414.
- [15] WANG Xin, YANG Su-hui, SUN Wen-feng, *et al.* Laser diode pumped high-slope-efficiency monolithic unidirectional single frequency ring laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(2):149-152.
王欣, 杨苏辉, 孙文峰, 等. 激光二极管抽运单块高斜度效率环形腔单频固体激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):149-152.
- [16] CHEN Ying, YANG Su-hui, ZHAO Chang-ming, *et al.* Research on the intensity noise suppression of LD pumped 1 064 nm single frequency solid-state laser[C]. Proceedings of the Twentieth National Symposium on Laser Science, 2012: 87-87.
陈颖, 杨苏辉, 赵长明, 等. LD 泵浦的 1 064 nm 单频固体激光器强度噪声抑制研究[C]. 第二十届全国激光学术会议论文集, 2012:87-87.