

1 mJ 窄线宽掺镱脉冲光纤放大器

石锐^{1,2}, 丁欣^{1,2}, 刘简^{1,2}, 姜鹏波^{1,2}, 孙冰^{1,2}, 白云涛^{1,2}, 王靖博^{1,2}, 赵蕾^{1,2}, 张贵忠^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

- (1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所, 天津 300072;
2. 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 通过将固体激光器种子源与光纤放大技术相结合的方式, 报道了一个单脉冲能量约为 1 mJ, 同时窄线宽保持在约 0.1 nm 的大模场面积的掺镱脉冲光纤放大器。不同于传统固体种子源一级大芯径光纤放大结构, 所采用的两级掺镱双包层光纤(YDCF)放大结构空间耦合调节更简单。放大过程中采用了多种非线性效应抑制方法, 放大输出光中未出现明显的 SBS、SRS 等非线性效应, 信噪比超过 30 dB。放大后平均功率 10.07 W, 相比 0.38 W 的种子光提高了 14.23 dB。在 10 kHz 重复频率下, 单脉冲能量约 1 mJ, 输出光脉宽 50 ns, 放大输出光束质量 $M^2=3.72$ 。所实现的毫焦量级窄线宽脉冲光纤放大器可运用于激光遥感、激光测量及非线性频率变换等应用领域。

关键词: 脉冲放大; 掺镱光纤放大器; 固体激光器种子源; 窄线宽大能量

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S105001

1 mJ narrow linewidth Yb-doped pulsed fiber amplifier

Shi Rui^{1,2}, Ding Xin^{1,2}, Liu Jian^{1,2}, Jiang Pengbo^{1,2}, Sun Bing^{1,2}, Bai Yuntao^{1,2}, Wang Jingbo^{1,2}, Zhao Lei^{1,2}, Zhang Guizhong^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

- (1. Institute of Laser and Opto-electronics, School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: By combining a large mode area(LMA) Yb-doped double cladding fiber(YDCF) amplifier with a solid state seed laser, an fiber amplifier, whose single pulse power was about 1 mJ and narrow linewidth was about 0.1 nm, was reported. Different from the traditional one-stage fiber amplifier with solid state laser seed source, a two-stage large diameter fiber amplifier was used in the YDCF amplification system. The two-stage fiber amplifier was much simpler in the aspect of coupling the spatial seed light into the fiber. A variety of methods were used to suppress nonlinear effects during the amplification process. Obvious nonlinear effects such as SBS, SRS, were not observed in the output, with the SNR exceeding 30 dB. After YDCF amplification system, the output average power was amplified to 10.07 W. Compared to the power of seed, which was about 0.38 W, the output was increased by 14.23 dB. At the pulse repetition rate of 10 kHz, the pulse energy is about 1 mJ, with the pulse width of 50 ns. The

收稿日期: 2018-11-02; 修订日期: 2018-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(11674242, 11674243); 天津市自然科学基金(16YFZCGX00350)

作者简介: 石锐(1994-), 男, 硕士生, 主要从事光纤激光器方面的研究。Email: shirui123@tju.edu.cn

导师简介: 丁欣(1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事固体激光器方面的研究。Email: dingxin@tju.edu.cn

beam quality M^2 of the output laser is 3.72. The pulsed fiber amplifier with narrow linewidth and high pulse energy will be very useful in many practical applications, such as laser remote sensing, laser measurement and nonlinear frequency conversion and so on.

Key words: pulse amplification; YDCF amplifier; solid-state laser seed source; narrow linewidth and high energy

0 引言

1.06 μm 波段的高功率脉冲光纤激光器由结合脉冲能量转换器件的主振荡器和高功率光纤放大器构成,具有散热快、光束质量好、输出能量高、体积小等优点,结合非线性频率变换技术,可实现宽波长范围的激光输出,已逐渐发展成为高精度激光加工、激光雷达系统、激光医疗、频率变换等领域中的重要光源^[1-3]。作为上述系统的光源,脉冲光纤激光器的脉冲能量决定着系统的传输极限,脉冲宽度和线宽影响着系统的精度。所以,研究 1.06 μm 波段的大能量、纳秒、窄线宽脉冲光纤激光器具有重要的科研与应用价值。

在 1.06 μm 波段光纤放大器中,由于掺镱光纤增益谱宽广、无激发态吸收以及上能级粒子寿命较长等特点,使得掺镱光纤放大器具有独特的优势。主振荡器一般有调 Q 固体激光器、脉冲光纤激光器和直接脉冲调制驱动电源的半导体激光器。2006 年, Ye C. 等人^[4]利用声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器(线宽 0.1 nm)作为种子源,采用纤芯 21.6 μm 的 YDCF,将平均功率 5 W、重复频率 40 kHz、脉宽 40 ns 的 1 064 nm 种子光放大到 53 W、脉宽减小为 30 ns,单脉冲能量约 1.3 mJ,出现了受激布里渊散射(SBS)等非线性效应,输出光的线宽为 0.7 nm。2013 年,国防科技大学栗荣涛、王小林等人^[5]用腔外 EOM 对单频连续光纤种子源进行调制,三级光纤放大得到 280 W 平均功率输出,脉冲宽度 6 ns,重复频率 10 MHz,但单脉冲能量约 28 μJ 、峰值功率 4.6 kW。2014 年,天津大学史伟课题组^[6]利用任意脉冲发生器(AWG)直接调制半导体激光器驱动电源,结合五级光纤放大系统,获得了单脉冲能量 2.3 mJ 的激光输出,峰值功率 697 kW,重复频率 10 kHz,脉冲宽度 3.3 ns,但输出光线宽约 7 nm。由此可见,为实现 1.06 μm 波段的大能量、纳秒、窄线宽脉冲光纤激光器,以调 Q 固体激光

器作为种子源,在实现毫焦量级输出的同时,还能获得较窄线宽,具有一定的优势。但由于调 Q 固体激光器的线宽较窄,导致放大过程中光纤非线性效应的阈值较低^[7],如何抑制光纤中的非线性效应,特别是 SBS 效应,是光纤放大器实现窄线宽大能量脉冲输出的重点。

文中利用窄线宽($\Delta\lambda=0.1$ nm)的 Nd:YAG 调 Q 激光器作为种子源。选择保偏结构大模场 YDCF 作为二级放大器,相比于传统固体种子源一级大芯径光纤放大结构,空间耦合调节简单且效率较高。在 10 kHz 重复频率下,放大输出功率达 10.07 W,单脉冲能量约 1 mJ,1 064 nm 输出光线宽约 0.1 nm。放大过程中同时采用多种 SBS 效应抑制手段,如增益光纤选用大模场直径保偏光纤^[8]、选取较短长度的增益光纤、给予增益光纤一定程度的应力梯度^[9]等,放大后未观测到明显的非线性现象,信噪比超过 30 dB。实现的毫焦量级窄线宽脉冲光可以满足大多数激光遥感、雷达、非线性实验等应用的光源需求。

1 实验设计

种子源选用 1 064 nm 调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器,以获得窄线宽且光束质量良好的种子光。采用 808 nm 激光二极管(LD)作为泵浦源。Nd:YAG 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm,掺杂浓度 0.5 at%。谐振腔为 130 mm 的平平腔。采用声光调 Q 方式实现脉冲输出。

以固体激光器作为种子源的光纤放大器,一般是将种子光直接空间耦合进入一级大芯径光纤进行功率放大。由于空间光耦合进入光纤,对耦合器件调节精度及稳定度的要求较高,相应高精度耦合调整架成本较高,且为达到较高耦合效率,需精准稳定的调节方法^[10]。由于实验光纤调整架精度达不到空间耦合所需微米量级,文中选择在传统空间耦合一级光纤放大结构中增加一级预放大级。利用该预放大

级将耦合进光纤的部分信号光进行放大,同时选择 10/125 μm 小尺寸光纤保持种子光优良的光束质量。由于该预放大级主要用于弥补空间耦合操作困难及效率不足的问题,不需要提供过多增益,故截取较短光纤长度。选择较短长度的增益光纤也可以在一定程度上抑制光纤中 SBS 效应的产生。

光纤中 SBS 效应的阈值表达式^[11]如公式(1)所示,其中 L_e 为光纤长度, g_b 为布里渊增益系数, $\Delta\nu_p$ 为泵浦光线宽 (SBS 泵浦光即为 1 064 nm 种子光), $\Delta\nu_b$ 为布里渊增益带宽(约 57 MHz@1 064 nm), A_e 为光纤有效模场面积,其计算公式如公式(2), ω 为光束束腰半径。

$$P_{th} = \frac{21A_e}{g_b L_e} \left(1 + \frac{\Delta\nu_p}{\Delta\nu_b} \right) \quad (1)$$

$$A_e = \pi\omega^2 \quad (2)$$

根据上述公式,对于波长 1 064 nm 的种子光,查得 g_b 数值在 $3 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-11}$ 范围内^[9],当 L_e 取 3 m 时,线宽 0.1 nm(约 30 GHz)的种子光在 10 μm 纤芯尺寸的光纤中,激发 SBS 效应的阈值功率理论上约在 6~9 kW 范围内。脉冲光的峰值功率很容易超过该范围,故脉冲信号光在小尺寸光纤中较容易激发 SBS。为了尽量避免预放大级中出现 SBS,文中种子光脉宽选择较大数值,且小尺寸预放大级只用于小幅提高信号光功率,高增益由大芯径主功率放大级提供。

在选取主功率放大级增益光纤时,不仅要考虑实现光功率的高效放大,还需要特别注意高增益、高功率下光纤中容易产生的非线性效应,特别是 SBS 效应。在主功率放大级采取的多种非线性效应抑制手段如下:功率放大级光纤选取 30 μm 的大纤芯尺寸,对应的 A_e 较大,可以成倍提高光纤中非线性效应的阈值功率;在保障高效放大增益情况下,光纤选取较短长度,降低 L_e 以提高 SBS 阈值;另外,将 30/250 μm 增益光纤的前 30 cm 部分紧紧拉直地铺放在金属光学平台上,一方面及时缓解大功率泵浦光进入增益光纤时造成的瞬间热量过高的问题,另一方面,该拉直的部分在整个增益光纤上可以造成一定程度的应力差距,稍微起到抑制 SBS 的作用;此外,为了简化空间耦合操作,文中种子光选择了非偏振光源,但主功率增益光纤仍选择保偏光纤,因为保偏光纤本身的结构特性可以进一步提高 SBS 的阈值^[9]。

基于上述设计想法,实验装置示意图如图 1 所

示。Nd:YAG 激光器输出光通过一个短焦透镜耦合进(2+1)×1 合束器的信号输入端。在合束器的信号输入光纤前端,熔接一个自制的包层光剥离器(CLS),剥离进入光纤包层中的光,保证进入后续光纤放大系统中的光均在纤芯中传输。

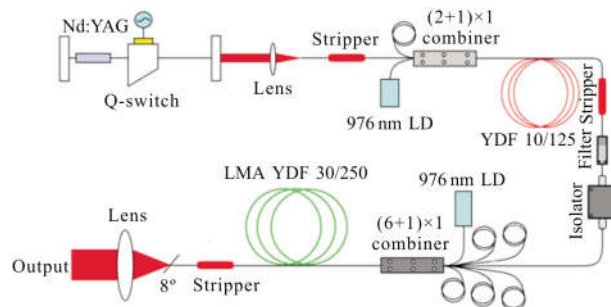


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Setup of the experiment

合束器后熔接预放大级 YDCF。纤芯 10 μm,内包层 125 μm,纤芯数值孔径 0.079,内包层数值孔径 0.46,对 976 nm 泵浦光的吸收系数为 4.95 dB/m,光纤长度 3 m。泵浦 LD 为一个最大功率 27 W 的 976 nm 多模 LD。预放大级后 CLS 用于去除剩余的泵浦光,后续熔接 1 064 nm 带通滤波器滤除 ASE,带宽 2 nm。之后增加一个隔离器保证信号光的单向传输。

主功率放大级的增益光纤是 30/250 μm 保偏结构 YDCF,纤芯数值孔径为 0.059,内包层数值孔径为 0.46,在 976 nm 处的吸收系数是 6 dB/m,光纤长度 2.5 m。泵浦 LD 为一个最高输出功率 27 W 的 976 nm 多模 LD。各级光纤放大级均采用同向泵浦,泵浦光与种子光同向传输能在很大程度上抑制 ASE 效应的出现,保证放大器的良好信噪比。在输出光纤的末端切出 8°角,防止端面反射,避免在 YDCF 放大级中产生自激振荡从而烧毁光纤。

2 实验结果及分析

调节实验装置,首先测量了 1 064 nm 调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器种子源的输出特性。输出功率与输入功率的关系如图 2 所示,13.5 W 808 nm 泵浦功率下最大输出功率达 4 W,不同输出功率,种子光的线宽、脉宽不同。脉宽较宽的种子光峰值功率较低,可以在一定程度上减少 SBS、SRS 等效应的产生^[9],故选择种子源脉冲宽度为 70 ns 的输出状态,此时输出

功率为 1 W, 重复频率为 10 kHz。

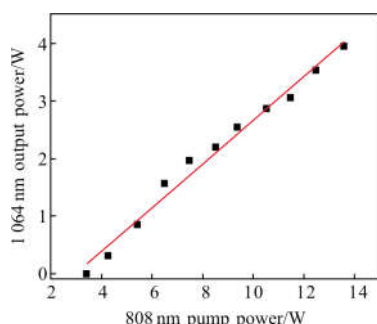


图 2 调 Q 激光器功率输出特性

Fig.2 Output power of the Q-switched laser

采用 90/10 刀口法测得此时种子源的光束质量 $M^2=1.12$, 如图 3 所示, 图中所插图片为输出光斑图像。利用光谱仪测得的种子光的线宽约为 0.1 nm, 如图 4 所示。

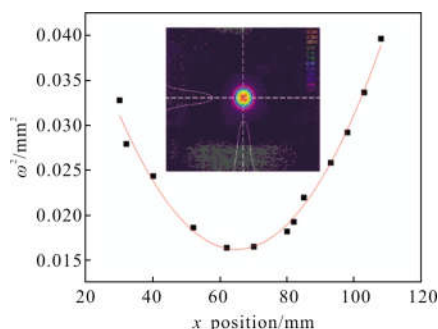


图 3 种子光的光斑图像

Fig.3 Light spot image of the seed light

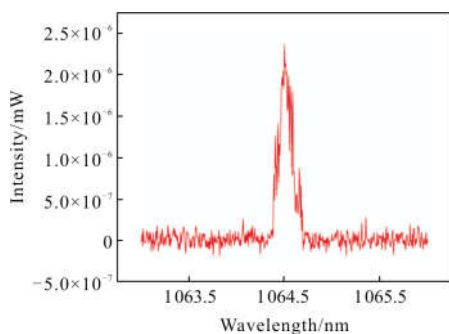


图 4 种子光输出光谱图

Fig.4 Output spectrum of the seed light

接着, 将上述光束质量优良的种子光, 利用短焦透镜耦合进合束器信号输入光纤。在熔接预放大级增益光纤之前, 调节光纤调整架, 在合束器输出端测

得 1064 nm 最大功率为 0.389 W。相比 1 W 种子光, 空间耦合效率约 38.9%。由于合束器输入光纤直径为 10 μm , 而实验所用的光纤调整架精度达不到几微米量级, 难以进一步微调提高耦合进入光纤中的功率。后续将利用一级 10/125 μm YDCF 预放大级来调节进入主功率放大级的功率, 弥补空间耦合效率的不足。

熔接预放大级后, 不开启泵浦 LD, 调节耦合器件, 将信号光通过预放大级(未工作)后的功率调到最大, 测得为 0.21 W, 相比未熔接预放大级前的 0.389 W 有所损耗。开启预放大级泵浦 LD, 当预放大级泵浦功率为 2.5 W 时, 在预放大级后测得信号光输出功率约 1.02 W, 输出光谱如图 5 所示, 图中可见有 1030 nm 附近 ASE 光, 其强度与 1064 nm 信号光之间相差超过 30 dB, 可忽略不计, 但为了避免该部分 ASE 光在高增益的主功率放大级中得到放大, 在预放大级后选择熔接一个带宽为 2 nm、中心波长为 1064 nm 的滤波器, 以滤除 ASE。

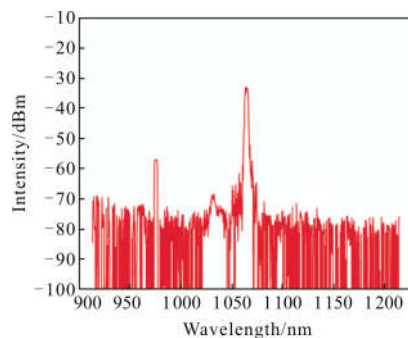


图 5 预放大级输出光谱图

Fig.5 Output spectrum of the pre-amplifier

熔接主功率放大级后, 不开启所有泵浦 LD, 同样调节耦合器件将信号光功率调到最大, 此时整个系统后信号光功率为 0.09 W。开启预放大级泵浦 LD, 给定功率 2.5 W, 不开启主功率放大级泵浦 LD, 测得信号光通过整个系统后输出功率为 0.56 W, 这是未工作的主功率放大级及相应器件对信号光的损耗较大造成的。开启主功率放大级泵浦 LD, 测得放大输出光功率与主功率放大级泵浦功率之间的关系如图 6 所示, 18 W 泵浦功率下, 输出功率达 10.07 W, 在重复频率 10 kHz 情况下, 单脉冲能量达 1 mJ, 斜线效率为 55.94%。

当系统输出功率为 10.07 W 时, 输出光谱如图 7

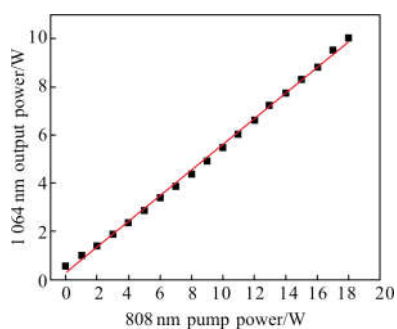


图 6 放大系统功率输出特性

Fig.6 Power output character of the amplifier system

所示,可以看到除了 1064 nm 信号光之外,还存在 976 nm 的泵浦光,两者之间的差距超过 20 dB,可认为输出光中剩余泵浦光极少。另外,输出端出现人眼可见的红光,由于正向泵浦时,在增益光纤输入端泵浦光功率较大、信号光功率较小,输入端过剩的泵浦光激发光纤中杂质离子(如 Tm、Pr 等)产生合作荧光效应发出红光^[2],该红光虽可见但功率极小,在输出光谱中与噪声同量级。在图 7 中未观测到明显的 SBS、SRS 等非线性效应,说明上述多种 SBS 抑制手段在一定程度上提高了 SBS 的阈值。但是,在光谱中 1120 nm 附近有一个小包络(无激射),与 1064 nm 信号光强度相差 30 dB,可忽略不计,但若进一步提高输出功率,SBS、SRS 等非线性效应将变明显,为了避免损坏光纤系统,故不继续提高功率。图 7 所插小图为放大后 1064 nm 附近线性光谱图,可看出放大后信号光线宽与种子光线宽(图 4 所示~0.1 nm)相差不多。

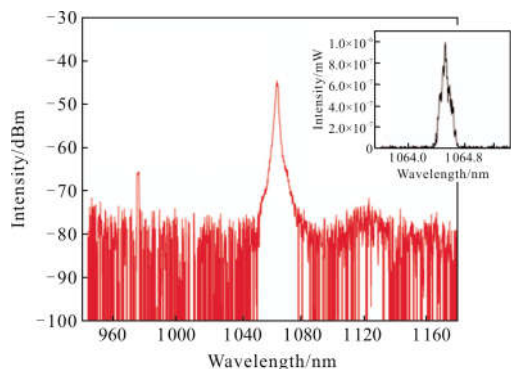


图 7 放大器输出光谱图

Fig.7 Output spectrum of the amplifier

图 8 为 1064 nm 信号光放大前后脉宽,种子光脉宽 70 ns,放大后脉宽 50 ns,输出光脉宽变窄是由

于纤芯中脉冲信号光发生自相位调制导致的脉宽压缩^[13-14]。利用 90/10 刀口法测得放大系统输出光束质量 $M^2=3.72$,如图 9 所示,由于简单通过弯曲增益光纤难以抑制 30 μm 大芯径 LMA 多模光纤中高阶模式的产生^[11],所以输出光的光束质量偏离衍射极限。

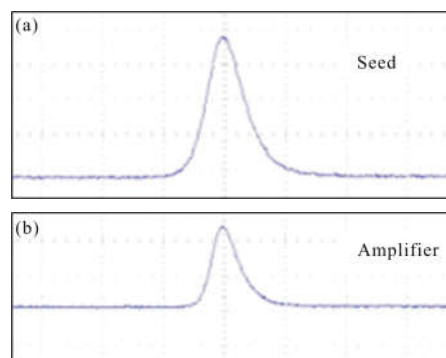


图 8 放大前后输出光脉宽

Fig.8 Pulse width of output light before and after amplification

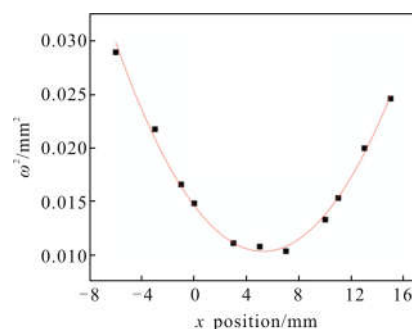


图 9 放大器输出光束质量 M^2

Fig.9 M^2 of the amplifier

3 结论

文中利用 Nd:YAG 声光调 Q 激光器作为种子源,保偏 YDCF 作为二级脉冲光纤放大器,将重复频率 10 kHz、平均功率 0.38 W、光束质量优良的 1064 nm 信号光,在信号光线宽较窄(也即是光纤非线性效应阈值较低)的情况下,放大到平均功率 10.07 W,单脉冲能量达 1 mJ,脉宽为 50 ns,同时放大输出光还保持了窄线宽(~0.1 nm)以及良好的信噪比(~30 dB)。相比于传统固体种子源一级大芯径光纤放大结构,采用的保偏 YDCF 二级脉冲光纤放大器,克服了空间耦合困难及效率不足的缺点,调节简单、转换效率高。放大过程中采取的多种非线性抑制手段,也使得输出光谱中没有观测到明显 SBS、SRS 等非线性效

应。最终实现的 1 mJ 窄线宽掺镱脉冲光纤放大器, 能够应用于许多非线性频率变换实验、激光遥感及雷达等研究领域。

参考文献:

- [1] Shi Wei, Fang Qiang, Li Jinhui, et al. High-performance fiber lasers for LIDARs [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0802001. (in Chinese)
史伟, 房强, 李锦辉, 等. 激光雷达用高性能光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 0802001.
- [2] Bai Yan, Yang Chunmei, Wu Zhe, et al. Microtopography experiment of laser ablation on surface of special-shaped solid wood [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10s): 123-128. (in Chinese)
白岩, 杨春梅, 吴哲, 等. 激光烧蚀实木异型表面的微观形貌实验 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 123-128.
- [3] Li Yizhe, Xue Bin, Zhao Yiyi. Development of wide field of view technology of synthetic aperture lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10s): 300-308. (in Chinese)
李一哲, 薛斌, 赵意意. 合成孔径激光雷达大视场技术综述 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 300-308.
- [4] Ye C, Gong M, Yan P, et al. Linearly polarized single transverse mode high energy multi-ten nanosecond fiber amplifier with 50W average power [J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7604.
- [5] Wang X, Zhou P, Su R, et al. A 280 W high average power, single-frequency all-fiber nanosecond pulsed laser [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(1): 015101.
- [6] Fang Q, Shi W, Fan J. 700 -kW -peak-power monolithic nanosecond pulsed fiber laser [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2014, 26(16): 1676-1678.
- [7] Zhao Xinghai, Gao Yang, Xu Meijian, et al. Power delivery characteristics of fibers for high-peak power pulse laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 444-448. (in Chinese)
赵兴海, 高杨, 徐美健, 等. 高峰值功率脉冲激光的光纤传输特性 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 444-448.
- [8] Wang C, Zhang Q, Mou C, et al. Spectral polarization spreading behaviors in stimulated Brillouin scattering of fibers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1-11.
- [9] Liu Guangbo, Yang Yifeng, Wang Jianhua, et al. Stimulated Brillouin scattering enhancement factor improvement in a 11.6-GHz-linewidth 1.5-kW Yb-doped fiber amplifier [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(7): 94-97.
- [10] Chen Xuekun, Zhang Lu, Wu Zhiyong, et al. Coupling efficiency of free-space laser coupling into single mode fiber and photonic crystal fiber [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 208-215. (in Chinese)
陈雪坤, 张璐, 吴志勇, 等. 空间激光与单模光纤和光子晶体光纤的耦合效率 [J]. 中国光学, 2013, 6(2): 208-215.
- [11] Liao Suying, Gong Mali. New progress of large mode area fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 455-462. (in Chinese)
廖素英, 巩马理. 大模场光纤研究的新进展 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 455-462.
- [12] Huang Xiaodong, Zhang Xiaomin, Wang Jianjun, et al. Stimulated Brillouin scattering in high-power fiber amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2124-2128. (in Chinese)
黄小东, 张小民, 王建军, 等. 高功率光纤放大器中的受激布里渊散射 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2124-2128.
- [13] Zhang H T, Zheng C, Yan P, et al. 13.9-mJ all fiber wide band ytterbium-doped fiber amplifier 13.9-mJ all fiber wide band ytterbium-doped fiber amplifier [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(10): 744-747.
- [14] Liu Liang, Cui Junwei, Li Wenjing, et al. Yb³⁺-doped double-clad quasi-continuous wave fiber laser pumped by laser diode [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 663-670. (in Chinese)
刘亮, 崔俊伟, 李文景, 等. LD 泵浦的准连续输出双包层掺镱光纤激光器 [J]. 中国光学, 2012, 5(6): 663-670.