

1030 nm 千瓦级掺镱光纤窄线宽激光放大器

孙殷宏^{1,2,3} 柯伟伟^{2,4} 冯昱骏^{1,2,5} 王岩山^{1,2} 彭万敬^{1,2} 马毅^{1,2*} 李腾龙^{1,2}
王小军^{2,4} 唐淳^{1,2} 张凯^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

³中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

⁴北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

⁵清华大学工程物理系, 北京 100084

摘要 基于掺镱光纤激光放大器理论模型, 分析了掺镱光纤激光放大器中心波长和增益光纤长度等因素对放大自发辐射(ASE)的影响。根据计算结果, 优化了 1030 nm 窄线宽光纤激光放大器设计参数。采用主振荡功率放大结构, 搭建了基于窄带种子源一级放大器的实验装置, 使用 25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ (纤芯直径/包层直径) 掺镱光纤实现了中心波长 1030 nm、3 dB 线宽 0.072 nm、最大功率 1.01 kW 的连续激光输出, 光-光转换效率为 81%, 1030 nm 激光功率占比大于 99%。由理论计算和实验结果可知, 经过合理的优化设计, 采用商用光纤可实现窄线宽 1030 nm 光纤激光器高功率、高效率、高信噪比输出。

关键词 激光器; 主振荡功率放大器; 掺镱光纤; 放大自发辐射; 信噪比

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0601003

1030 nm Kilowatt-Level Ytterbium-Doped Narrow Linewidth Fiber Amplifier

Sun Yinhong^{1,2,3} Ke Weiwei^{2,4} Feng Yujun^{1,2,5} Wang Yanshan^{1,2} Peng Wanjin^{1,2}
Ma Yi^{1,2} Li Tenglong^{1,2} Wang Xiaojun^{2,4} Tang Chun^{1,2} Zhang Kai^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

³Graduate Department, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

⁴Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China

⁵Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Based on the model of ytterbium-doped fiber amplifier and the effect of the central wavelength of the amplifier and the length of gain fiber on amplified spontaneous emission (ASE) is analyzed. According to the calculation results, the 1030 nm narrow linewidth fiber laser amplifier is optimized. Adopting the structure of master oscillator power amplifier (MOPA), a continuous wave (CW) laser with central wavelength of 1030 nm, 3 dB linewidth of 0.072 nm and maximum power of 1.01 kW is achieved with narrow band seed and one stage amplifier, in which 25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ (diameters of core/cladding) ytterbium-doped fiber is used as the gain fiber. The optical-to-optical conversion efficiency is 81%, and 1030 nm output power is more than 99% of total output power. The calculated and experimental results show that by reasonable optimization design, 1030 nm narrow linewidth CW

收稿日期: 2016-01-29; 收到修改稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 孙殷宏(1983—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事高功率光纤激光技术方面的研究。

E-mail: sunyinhong@caep.cn

导师简介: 唐淳(1967—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高能固体激光方面的研究。

E-mail: tangchun21@vip.sina.com

* 通信联系人。E-mail: rufinecn@caep.cn

fiber amplifier with high power, high efficiency and high signal noise ratio can be achieved.

Key words lasers; master oscillator power amplifier; ytterbium-doped fiber; amplified spontaneous emission; signal noise ratio

OCIS codes 140.3480; 140.3510; 140.3615

1 引 言

近年来,国内外高功率光纤激光光谱合成技术实现了重要突破,输出功率不断提升。2011年,德国 Fraunhofer 研究所的 Christian Wirth 等^[1]采用多层介质膜衍射(MLD)光栅获得了 8.2 kW 的高功率激光输出;2014年,洛马公司实现了 30 kW 高光束质量输出^[2]。国内,中国工程物理研究院应用电子学研究所于 2015 年实现了大于 5.0 kW 光谱合成的输出^[3]。为进一步提升光谱合成的输出功率,可在提升合成子束功率基础上增加可合成子束的数量,也就是拓展可合成激光的光谱范围。从近年的研究结果可知^[1-3],掺镱光纤在 1040~1080 nm 光谱范围内可以实现高效率、高功率输出,但在 1030 nm 甚至更短波长下的效果尚需进一步实验。1030 nm 激光器在其他很多领域也有应用:在激光雷达中常用的硅光电探测器中,1030 nm 波段比传统的 1064 nm 波段响应系数更高,故 1030 nm 非常适合作为光电雷达的光源^[4];通过频率变换,1030 nm 激光器还可实现高功率 515 nm 的可见光输出;1030 nm 的短波长激光器亦适用于医学领域。因此,如何利用掺镱光纤实现 1030 nm 激光的高效率成为新的研究热点。

由文献^[5]可知,由于掺镱光纤吸收和发射截面参数与波长相关,相较于掺镱光纤的传统波段(如 1060~1080 nm),要实现 1030 nm 窄线宽、高功率输出存在较大难度。虽然 2009 年 IPG 公司 1070 nm 光纤激光器已实现了 10 kW 输出^[6],但 1030 nm 激光器直到 2014 年才实现了千瓦级的窄线宽输出^[5]。

本文采用 25 μm 芯径掺镱光纤,采用窄带种子源一级放大的方法,通过理论分析放大器中放大自光辐射(ASE)与激光波长、光纤长度的关系,优化系统设计参数,实现 1030 nm 光纤激光器千瓦级窄线宽输出。

2 理论分析

2.1 理论模型

无论是光纤振荡器还是放大器,光纤内的光束功率 P 演化[抽运、激光、经过光谱划分的自放大大辐射(ASE)]均可描述为^[7]

$$\pm \frac{dP^\pm}{dz} = [(\alpha + g)N_2 - \alpha - l]P^\pm + gN_2 \cdot n_{se}h\nu\Delta\nu, \quad (1)$$

式中“+”对应正向传播光束,“-”对应反向传播光束; $\alpha = \Gamma\sigma_a n_0$ 和 $g = \Gamma\sigma_e n_0$ 分别为光束波长对应的吸收和发射系数; Γ 是光束和掺杂区的交叠因子,对于抽运来说 $\Gamma = (r_{co}/r_{cl})^2$, r_{co} 和 r_{cl} 分别是芯区和内包层半径,对于激光或 ASE 来说, Γ 由模场与掺杂区的交叠决定,通常是接近 1; σ_a 和 σ_e 分别是 Yb 离子的吸收和发射截面(如图 1 所示)。 n_0 是 Yb 掺杂粒子浓度; α_{976} 是 976 nm 对应的吸收系数,通常指光纤标称的抽运吸收系数; l 是光束的背景损耗(也可以包括必要的弯曲损耗); $N_2(z)$ 是光纤的反转分布; n_{se} 是自发辐射光子数,通常取 2; $h\nu\Delta\nu$ 是光束在 $\Delta\nu$ 频谱范围内的光子能量。在稳态下,光纤的反转分布 $N_2(z)$ 由给定光束的功率共同决定^[7]:

$$N_2 = \frac{\sum P\lambda\alpha}{\sum P\lambda(\alpha + g) + \frac{hcA_{co}n_0}{\tau}}, \quad (2)$$

其中 λ 是光束波长, h 和 c 是普朗克常数和真空光速, A_{co} 是光纤芯区面积, τ 是 Yb 离子上能级寿命(通常取 0.8 ms); \sum 是对所有光束求和(在方向上包括所有正、反向光束,在光束类型上包括所有抽运光、激光、ASE 光束)。

与上述方程配合的边界条件包括光束在光纤两侧的反射,即对给定光束,应满足^[7]

$$\begin{cases} P^+(0) = P_{in}^+ + r_{z=0}P^-(0) \\ P^-(L) = P_{in}^- + r_{z=L}P^+(L) \end{cases}, \quad (3)$$

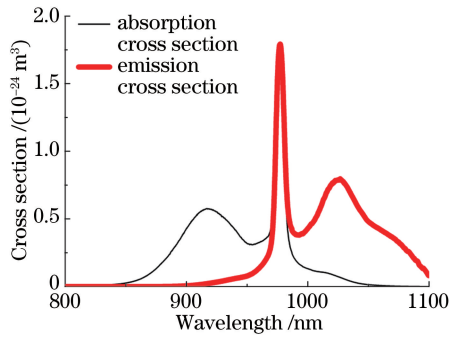


图 1 掺镱光纤不同中心波长的吸收和发射截面

Fig. 1 Spectra of absorption cross section and emission cross section of Yb-doped fiber

式中 P_{in}^+ 和 P_{in}^- 分别是外部正向和反向注入功率，主要用于描述抽运注入和放大器的激光、ASE 注入； $r_{z=0}$ 和 $r_{z=L}$ 是光纤两侧对特定光束的反射率，通常用于描述振荡器对激光的反射； L 是光纤长度。

2.2 数值计算

对振荡器和放大器的模拟，就是对上述多光束方程、反转方程和边界条件[(1)~(3)式]的联合求解，求出(1)式中光纤内的光束功率 P 。以种子源一级放大的主振荡功率放大(MOPA)结构为例，种子源注入功率为 20 W，放大器抽运源波长取 976 nm，最大抽运功率为 1.2 kW，增益光纤为 25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ (纤芯直径/包层直径，下同)，长度为 10 m，吸收系数为 1.80 dB，激光波长分别取 1030、1050、1070 nm，根据(1)~(3)式计算得到不同中心波长下放大器前向输出光谱 $P(L)$ 和反向输出激光 $P(0)$ 的光谱分布(如图 2 所示)。

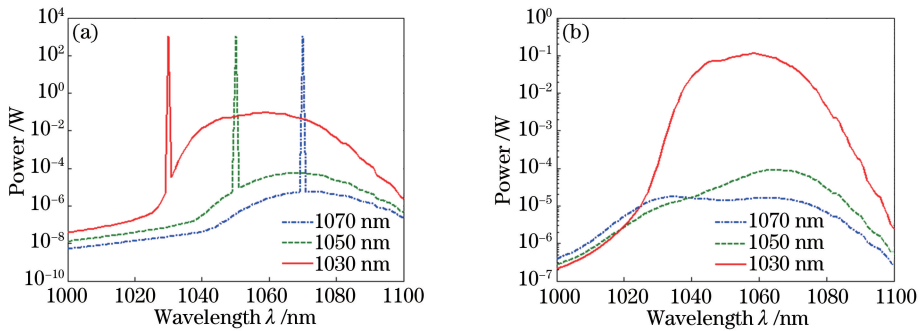


图 2 放大器(a)前向和(b)反向输出光谱分布

Fig. 2 (a) Forward and (b) backward output spectral distributions of amplifier

从图 2(a)可知，前向输出光谱中 1030 nm 的 ASE 抑制比约为 22 dB，通过对不同波长的积分计算可得，ASE 的总功率为 2.09 W，约占总输出功率的 2%；而 1050 nm 和 1070 nm 的 ASE 抑制比均大于 35 dB，其 ASE 功率可忽略不计。从图 2(b)可知，反向输出的激光均为 ASE，通过对不同波长的积分计算可得，1030 nm 放大器反向输出功率为 2.70 W，而 1050 nm 和 1070 nm 分别为 2.68 mW 和 918.18 μW 。综合图 2 (a)和图 2(b)可知，在 10 m 的增益光纤中，1030 nm 放大器前向和反向输出的 ASE 均较为显著，可诱导放

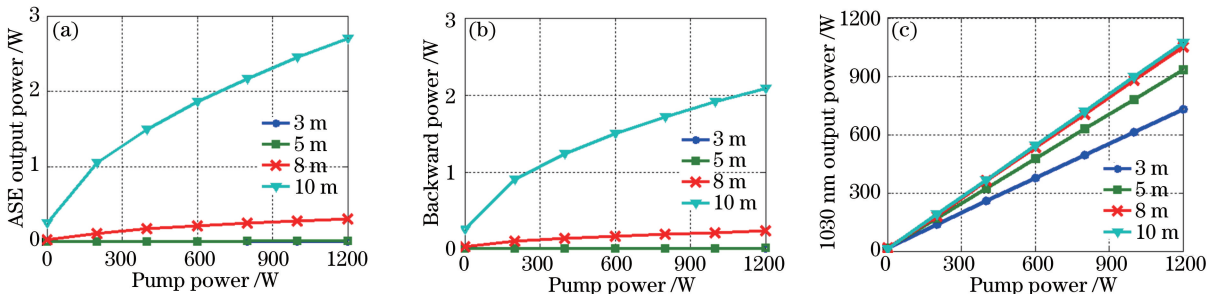


图 3 (a)ASE 功率、(b)反向回光功率和(c)1030 nm 激光功率随抽运功率的变化关系

Fig. 3 (a) ASE output power, (b) backward power, (c) 1030 nm output power versus pump power

大器产生自激振荡和自脉冲效应,从而影响激光器的可靠性。

为了抑制 1030 nm 放大器的 ASE,采取了优化增益光纤长度的方法。通过计算得到增益光纤在 3、5、8、10 m 条件下 1030 nm 放大器中前向 ASE 功率曲线、反向回光功率曲线和前向输出功率曲线(如图 3 所示)。从图 3(a)和图 3(b)可知,当增益光纤缩短至 5 m 以下时,前向的 ASE 和反向回光均受到有效抑制。从图 3(c)可知,当增益光纤缩短至 5 m 时,放大器光-光效率还保持在 10 m 增益光纤时的 80%左右,而当增益光纤缩短至 3 m 时,放大器光-光效率锐减至 10 m 增益光纤时的 60%。

通过以上分析可知,1030 nm 短波长放大器相较于长波长波段放大器,具有更为显著的 ASE。虽然可以通过缩短增益光纤的方法提高 ASE 的抑制比,但也会在一定程度上降低放大器的输出效率。所以,短波长激光放大器需要平衡 ASE 抑制比和输出效率。

3 实验结果分析与讨论

1030 nm 窄线宽光纤激光放大器采用窄带种子源一级放大的 MOPA 结构,实验原理如图 4 所示,图中 LD 为激光二极管,HR 为高反光栅,YDF 为掺镱光纤,LR 为低反光栅,CPS 为包层光剥离器,NBF 为窄带滤波器,MFA 为模场适配器,combiner 为合束器,LDs 为多管激光二极管,25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ YDF 为掺镱光纤,CPS 为包层光剥离器,QBH 为端帽。

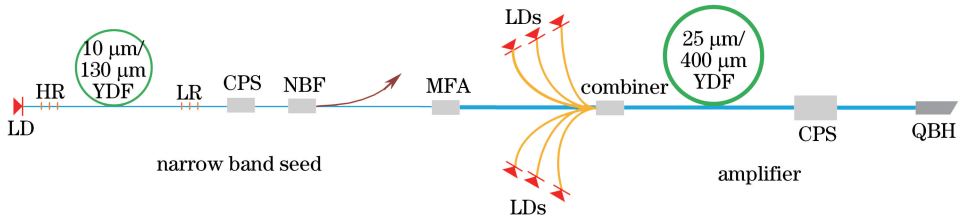


图 4 1030 nm 窄线宽光纤激光放大器实验原理示意图

Fig. 4 Experimental setup: 1030 nm narrow linewidth fiber amplifier

3.1 窄带种子源介绍

种子源为振荡器结构。光纤光栅(FBG)的中心波长为 1030 nm,高反光栅反射率为 99%,低反光栅反射率为 10%。增益光纤采用 10 $\mu\text{m}/130 \mu\text{m}$ 掺镱光纤(YDF),在 976 nm 处的吸收系数为 3.90 dB,数值孔径为 0.08。为了实现放大器窄线宽输出,种子源的线宽不宜太宽^[8],故种子源的功率不宜过高^[9]。为了进一步提高 1030 nm 种子源的信噪比,种子光需通过窄带滤波器后再进入放大器,滤波器中心波长为 1030 nm,滤除比 60 dB。滤波器含有一个导出臂,可导出放大器反向的 ASE 回光,从而提高放大器的稳定性。最终,当抽运功率为 28 W 时,种子源输出功率为 20 W,3 dB 线宽为 0.028 nm,且由图 5(a)、(b)可知,1030 nm 激光信噪比约为 40 dB。从结果可知,1030 nm 种子源实现了理想的光谱控制,几乎不存在 ASE 且线宽较窄。光谱仪在 1 μm 波段最高分辨精度为 0.02 nm,下同。

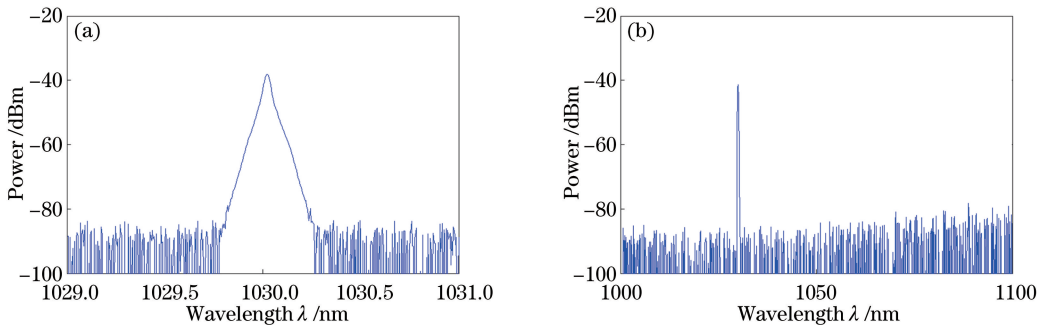


图 5 种子源输出激光光谱。(a) 1029~1031 nm 范围内光谱(分辨率: 0.02 nm);

(b) 1000~1100 nm 范围内光谱(分辨率: 1 nm)

Fig. 5 Output spectra of seed. (a) Spectrum from 1029 nm to 1031 nm (resolution: 0.02 nm);

(b) spectrum of from 1000 nm to 1100 nm (resolution: 1 nm)

3.2 放大器介绍

种子源激光通过 10~25 μm 模场适配器进入放大器。放大器配有 6 支输出功率约为 200 W 的激光二极管,中心波长 976 nm,输出尾纤为 200 μm /220 μm ,通过(6+1) \times 1 合束器耦合后注入增益光纤中。增益光纤采用商用的 25 μm /400 μm 掺镱光纤,数值孔径为 0.06,在 976 nm 处抽运吸收系数为 1.80 dB。1030 nm 激光通过包层光剥离器剥离剩余抽运光后,连接带传能光纤的端帽输出。通过第二节的理论分析,减小增益光纤长度可有效抑制放大过程中的 ASE,但实际系统中,为了保证放大器的效率,且受包层光剥离器剥离能力的限制,增益光纤不宜过短。

如图 6 所示,在激光器的放大过程中,随着抽运功率的增长,信号激光功率和回光功率的线性度均较好,这表明放大器的 ASE 得到了较好的抑制。最终,当放大器抽运功率为 1240 W 时,激光输出功率达到 1010 W,光-光效率约为 81%,回光功率约为 50 mW。从该结果可知,虽然放大器的增益光纤较短,影响了吸收效率,但由于 976~1030 nm 的量子亏损相比传统波长的小,最终 1030 nm 激光放大效率没有明显的下降。放大器的回光光谱如图 7 所示,主要表现为 ASE。

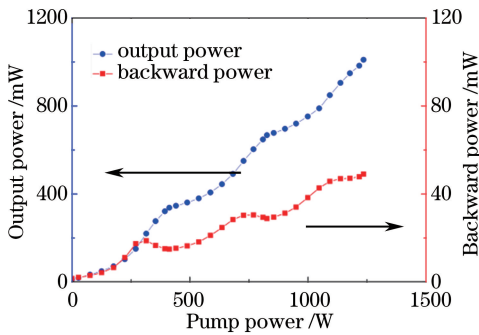


图 6 激光输出功率、放大器回光功率随抽运功率的变化

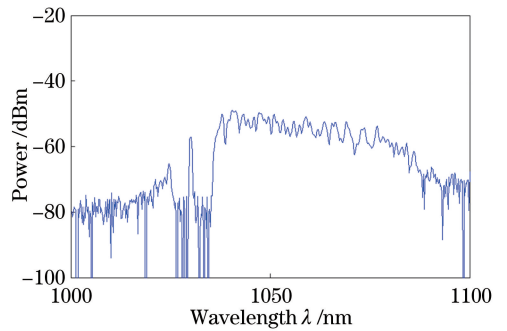


图 7 放大器回光光谱(分辨率:1 nm)

Fig. 6 Output power, backward power versus pump power

Fig. 7 Backward spectrum of amplifier (resolution: 1 nm)

图 8 为放大器 1010 W 功率时的输出光谱,从图 8(a)可看出,放大器输出激光 3 dB 线宽为 0.072 nm,光谱展宽现象并不是很严重,这是因为放大器采用了大芯径和较短的增益光纤,使得放大过程的四波混频效应得到了较好的抑制。从图 8(b)可看出,输出光谱中几乎没有 ASE,激光的信噪比约为 35 dB,通过计算,该光谱中的 1030 nm 激光功率占比大于 99%。由图 8(b)的光谱图可知,在中心波长约为 1010 nm 和 1045 nm 处存在激光,通过初步分析认为是因为模间的四波混频造成的。

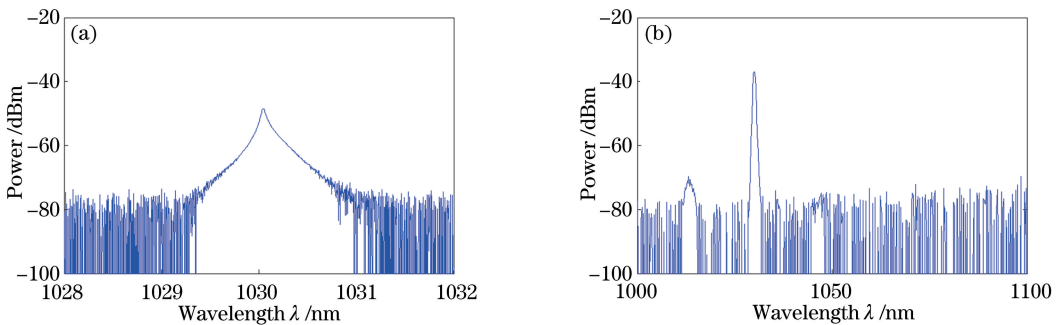


图 8 放大器输出激光光谱图。(a) 1028~1032 nm 范围内光谱(分辨率 0.02 nm);
(b) 1000~1100 nm 范围内光谱(分辨率 1 nm)

Fig. 8 Output spectra of amplifier. (a) Spectrum from 1028 nm to 1032 nm (resolution: 0.02 nm);
(b) spectrum from 1000 nm to 1100 nm (resolution: 1 nm)

3.3 小结与讨论

通过对以上放大器输出功率曲线、反向回光功率曲线以及前向输出光谱的分析可知,若进一步提高抽运功率,1030 nm 放大器仍然可以在保证较高信噪比的条件下实现更高功率的输出。同时,在实验中发现,即使放大器的各项参数得到优化,但如果系统的熔接质量较差,或者光纤的输出端面没有得到较好的处理,即

使在几十瓦输出的情况下都会使得 ASE 产生自激振荡,影响激光器的稳定性。所以,对于短波长放大器来说,系统搭建过程的细节处理也是非常重要的。

4 结 论

建立理论模型分析了光纤激光放大器中心波长和增益光纤长度等因素对 ASE 的影响。根据计算结果,优化了 1030 nm 窄线宽光纤激光放大器设计参数。搭建了基于窄带种子源一级放大器的实验装置,实现了中心波长 1030 nm、3 dB 线宽 0.072 nm、最大功率 1.01 kW 的连续激光输出,光-光转换效率为 81%,1030 nm 激光功率占比大于 99%。从放大器的输出光谱可知,该放大器尚未出现显著的 ASE,故后续可通过提高抽运功率、优化放大器的参数等方式进一步提升窄线宽 1030 nm 激光的输出功率。

参 考 文 献

- 1 Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.*. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(16): 3118-3120.
- 2 Lockheed Martin. Lockheed Martin demonstrates weapons grade high power fiber laser[EB/OL]. [2015-12-25] <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2014/january/140128-mst-lockheed-martin-demonstrates-weapons-grade-high-power-fiber-laser.html>.
- 3 Ma Yi, Yan Hong, Tian Fei, *et al.*. Common aperture spectral beam combination of fiber lasers with 5 kW power high-efficiency and high-quality output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4): 040101.
马毅,颜宏,田飞,等. 光纤激光共孔径光谱合成实现 5 kW 高效优质输出[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(4): 040101.
- 4 Zhou Cuiyun, Liu Yuan, Du Songtao, *et al.*. 1030 nm high repetition rate nanosecond pulse all fiber amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0802010.
周翠云,刘源,杜松涛,等. 1030 nm 高重复频率纳秒脉冲全光纤放大器[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0802010.
- 5 Huang Y, Edgecumbe J, Ding J W, *et al.*. Performance of kW class fiber amplifiers spanning a broad range of wavelengths: 1028~1100 nm[C]. *SPIE*, 2014, 8961: 89612K.
- 6 Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology[C]. 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009.
- 7 Gong M L, Yuan Y Y, Li C, *et al.*. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3236-3246.
- 8 Feng Y J, Wang X J, Ke W W, *et al.*. Numerical analysis to four-wave mixing induced spectral broadening in high power fiber lasers[C]. *SPIE*, 2015, 9255: 92550Q.
- 9 Huang Z H, Liang X B, Li C H, *et al.*. Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrowlinewidth multilongitudinal-mode oscillators[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 297-302.