

1 kW 单端抽运、高光束质量、高稳定性 全光纤激光振荡器

王小林 陶汝茂 张汉伟 周 朴 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 与光纤放大器相比, 光纤激光振荡器具有结构紧凑、稳定性好、模式不稳定性阈值高、光束质量优良等优点。对单端抽运的 1 kW 级全光纤激光振荡器进行了详细的理论和实验研究。建立了考虑光纤弯曲、模式耦合、抽运波长变化、包层光滤除的速率方程模型; 利用国产合束器, 搭建了单端抽运全光纤振荡器, 在抽运功率为 1.5 kW 时, 获得 1.04 kW 功率输出, 光光效率为 69%。对不同输出功率的光束质量进行测量, 光束质量 M^2 均小于 1.25。激光器稳定工作 1 h, 功率起伏小于 1%。

关键词 激光器; 振荡器; 单端抽运; 速率方程

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1105001

1 Kilowatt Single-End Pumped All-Fiber Laser Oscillator with Good Beam Quality and High Stability

Wang Xiaolin Tao Rumao Zhang Hanwei Zhou Pu Xu Xiaojun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Compared with fiber amplifier, fiber laser oscillator has the advantages of compact structure, good stability, high threshold of mode instability and good beam quality. Single-end pumped 1 kW all fiber laser oscillator is studied in detail theoretically and experimentally. Rate equation model which considers the fiber bending loss, mode coupling, changing pumping wave and cladding lights stripping is presented. Using a China made combiner, a single-end pumped all fiber laser oscillator is built. Laser power of 1.04 kW and optical to optical efficiency of 69% are obtained when the pump power reaches to 1.5 kW. The beam quality is measured and the results show that the M^2 factors are all less than 1.25 in different powers. With one hour steady laser operation, the power fluctuation is less than 1%.

Key words lasers; oscillator; single-end pumped; rate equation

OCIS codes 060.2320; 140.3460; 140.3510

1 引 言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构紧凑灵活等优点, 在工业加工等领域具有广泛的应用前景^[1]。目前, 基于全光纤结构的单模光纤激光输出功率已经达到了 10 kW^[2]。然而, 目前国际上 1.5 kW 以上的光纤激光器都是采用主振荡功率放大 (MOPA) 结构实现的^[3-4]。在 MOPA 结构光纤激光器中, 随着输出功率的提升,

近几年来发现的模式不稳定现象严重限制了光纤激光器的光束质量和输出功率^[5-11]。在大部分放大器中, 当激光器输出功率在数百瓦量级时, 出现模式不稳定性现象, 导致高阶模式占据了大部分功率, 使得激光光束质量严重下降^[5-6]。采用振荡器结构的高功率光纤激光器, 由于光纤光栅对高阶模和低阶模的反射中心波长不同^[12], 针对特定波长设计的振荡器对该波长的基模有较高的反射率, 对高阶模式

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-03-10

基金项目: 国防科技大学校科研项目 (JC12-17-03)、湖南省教育厅科学研究项目 (YB2013B003)

作者简介: 王小林 (1985—), 男, 讲师, 主要从事光纤激光器及相干合成等方面的研究。E-mail: wxllin@nudt.edu.cn

反射率较低。因此,振荡器能够一定程度抑制模式不稳定。此外,采用振荡器结构的高功率光纤激光器具有结构简单、稳定性好、成本低廉等优点。目前国际上已经推出能够承受 2 kW 抽运功率的光纤光栅^[13],国内深圳朗光科技有限公司等相关单位也已经研发出总抽运功率大于 1.5 kW 的抽运合束器。随着抽运合束器、光纤光栅承受功率的提升,光纤激光振荡器有望成为高光束质量光纤激光器的重要发展方向。

本文对单端抽运的 1 kW 全光纤激光振荡器进行了详细的理论和实验研究。建立了考虑光纤弯曲损耗、模式耦合、抽运波长变化、包层光滤除的速率方程模型;搭建了单端抽运千瓦级全光纤激光器,获得了近衍射极限($M^2 < 1.25$)的 1.04 kW 光纤激光输出,并连续稳定工作 1 h,功率起伏小于 1%。利用理论模型对实验结果进行分析,理论和实验吻合较好。激光器中各个关键熔接点和器件的温度都在 40 °C 以下,如果采用双端抽运结构或者提高抽运功率,有望进一步提高输出功率。

2 单端抽运全光纤振荡器结构

单端抽运 1 kW 全光纤激光振荡器的结构如图

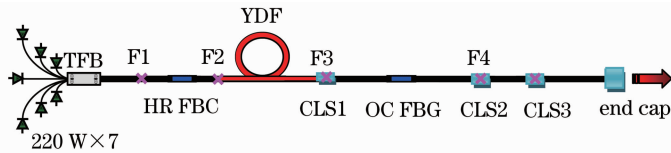


图 1 单端抽运光纤激光振荡器结构图

Fig. 1 Scheme of single-end pumped fiber laser oscillator

3 实验原理与结果分析

实验中,首先在合束器输出处测试了不同抽运功率时抽运光的光谱,如图 2 所示。从图中可知,随着输出功率的增加,抽运光抽运波长向长波方向偏移。由于 LD 数目较多,且各个 LD 的中心波长不同,致使在最高功率时,抽运光中心波长在 914.5 nm 左右,3 dB 线宽为 13.7 nm。如此宽的光谱,如果直接利用单一波长(如 915 nm)处的光纤参数进行理论仿真,会导致理论仿真和实验结果存在较大的误差;在利用 976 nm 的 LD 抽运的激光器中,由于掺杂光纤在 976 nm 吸收谱较窄(一般 3 dB 宽度小于 5 nm),这种误差更为明显。

在目前的光纤激光速率方程中,大都只考虑抽运光为单一波长^[14-17]。但是,正如图 2 测得的结果所示,由于半导体抽运激光器的工作波长随着工作

1 所示。激光谐振腔由高反射率光纤布拉格光栅(HR FBG,中心波长为 1079.90 nm,3 dB 带宽为 2.11 nm,反射率大于 99.9%)和低反射率光纤布拉格光栅(OC FBG,中心波长为 1079.83 nm,3 dB 带宽 1.03 nm,反射率约为 11%)共同组成。抽运源为中心波长为 915 nm 的 220 W 光纤耦合半导体激光器(LD),耦合输出光纤的纤芯/包层直径分别为 200 μm /220 μm 。抽运光经 7 \times 1 功率国产合束器(TFB)后进入 HR FBG,合束器的抽运光纤纤芯/包层直径为 200 μm /220 μm ,输出光纤纤芯/内包层直径为 20 μm /400 μm 。合束器输出的抽运光经过纤芯/包层直径为 20 μm /400 μm 的大模场双包层掺镱光纤(YDF),由 OC FBG 熔接带准直器(CO)的锥形石英端帽(QBH)后准直输出。实验中,掺杂光纤在 915 nm 的吸收系数为 0.4 dB/m,为了保证抽运光能够较为充分吸收,采用 45 m 的掺杂光纤作为增益介质。在 OC FBG 与输出端帽之间的传能光纤上,利用高折射率的紫外固化胶制作了 3 段包层光滤除(CLS)装置,滤除残留的抽运光和包层中的高阶激光模式。除了光纤端帽和准直器之外,所有器件都组装在特殊设计的水冷板上。

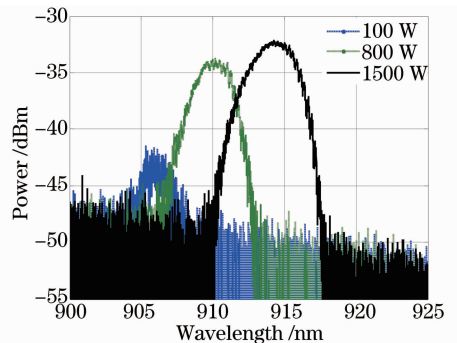


图 2 不同功率情况下抽运光谱特性

Fig. 2 Spectra of pump light in different powers

温度、抽运电流会发生变化,利用单一波长抽运的速率方程对激光器进行仿真,存在一定的误差。鉴于此,同时考虑抽运光的光谱特性、模式耦合与竞争^[14]和光纤弯曲损耗^[18]等因素,建立了较为全面的

掺镱光纤激光速率方程,并将其离散化为

$$N_2(z) = N\{\Gamma_p \sum_{m=1}^M \lambda_m^p \sigma_m^{\text{ap}}(\lambda_m^p) [P_m^{\text{p}+}(\lambda_m^p, z) + P_m^{\text{p}-}(\lambda_m^p, z)] + \Gamma_s \sum_{n=1}^N \lambda_n^s \sigma_n^{\text{as}}(\lambda_n^s) [P_{n,k}^{\text{s}+}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z) + P_{n,k}^{\text{s}-}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z)]\} / \{\Gamma_p \sum_{m=1}^M \lambda_m^p [\sigma_m^{\text{ap}}(\lambda_m^p) + \sigma_m^{\text{ep}}(\lambda_m^p)] [P_m^{\text{p}+}(\lambda_m^p, z) + P_m^{\text{p}-}(\lambda_m^p, z)] + (hcA_{\text{eff}}/\tau) + \Gamma_s \sum_{n=1}^N \lambda_n^s [\sigma_n^{\text{as}}(\lambda_n^s) + \sigma_n^{\text{es}}(\lambda_n^s)] [P_{n,k}^{\text{s}+}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z) + P_{n,k}^{\text{s}-}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z)]\}^{-1}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_m^{\text{p}\pm}(\lambda_m^p, z)}{dz} = \Gamma_p [\sigma_m^{\text{ep}}(\lambda_m^p) N_2(z) - \sigma_m^{\text{ap}}(\lambda_m^p) N_1(z)] P_m^{\text{p}\pm}(\lambda_m^p, z) - \alpha_m^{\text{p}}(\lambda_m^p) P_m^{\text{p}\pm}(\lambda_m^p, z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_{n,k}^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_n^{\text{es}}(\lambda_n^s) N_2(z) - \sigma_n^{\text{as}}(\lambda_n^s) N_1(z)] P_{n,k}^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z) - [\alpha_n^{\text{s}}(\lambda_n^s) + \alpha_n^{\text{s-RS}}(\lambda_n^s) + \alpha_k^{\text{bl}}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z)] P_{n,k}^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z) -$$

$$P_{n,k}^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, \text{LP}_j, z) \sum_{j \neq k}^K d_{kj} + \sum_{j \neq k}^K d_{kj} P_{n,j}^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, \text{LP}_j, z) + 2\Gamma_s \sigma_e(\lambda_n^s, \text{LP}_k) N_2(z) \frac{hc^2}{(\lambda_n^s)^3} \Delta\lambda^s, \quad (3)$$

$$N = N_1(z) + N_2(z), \quad (4)$$

式中 N 为掺杂光纤中掺杂离子浓度, N_1 和 N_2 分别为基态和激发态离子数, m, n 分别为抽运光和信号光的波长序数, k 为激光模式序数, z 为光纤长度方向坐标。 λ_m^p, λ_n^s 分别为第 m 个抽运光和第 n 个信号光波长, LP_k 为光纤支持的第 k 个模式。 $P_m^{\text{p}\pm}(\lambda_m^p, z)$ 为正向和反向抽运光功率, $P_{n,k}^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z)$ 分别为不同模式的正向和反向信号光功率。 $\sigma_m^{\text{ap}}, \sigma_m^{\text{ep}}$ 分别为抽运光的吸收、发射截面; $\sigma_n^{\text{as}}, \sigma_n^{\text{es}}$ 为信号光的吸收、发射截面。 $\alpha_n^{\text{s}}(\lambda_n^s), \alpha_n^{\text{s-RS}}(\lambda_n^s), \alpha_k^{\text{bl}}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z)$ 分别为信号光的吸收损耗、瑞利散射和弯曲损耗系数^[18]。 d_{kj} 为第 k, j 个模式之间的耦合系数^[14]。 Γ_p, Γ_s 为抽运光和信号光的填充因子^[19]。 A_{eff} 为纤芯有效面积, τ 为上能级寿命^[16]。 (3) 式中的 $\alpha_k^{\text{bl}}(\lambda_n^s, \text{LP}_k, z) P_{n,k}^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, z)$ 代表不同模式的弯曲损耗,

$$P_{n,k}^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, \text{LP}_j, z) \sum_{j \neq k}^K d_{kj} + \sum_{j \neq k}^K d_{kj} P_{n,j}^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, \text{LP}_j, z)$$

代表光纤支持的各个模式之间的耦合, $2\Gamma_s \sigma_e(\lambda_n^s, \text{LP}_k) N_2(z) \frac{hc^2}{(\lambda_n^s)^3} \Delta\lambda^s$ 代表信号光的放大自发辐射噪声(ASE)项。

为了简化考虑,认为不同波长的各个模式的吸收损耗、散射损耗系数等基本相同,但各个模式的弯曲损耗、填充因子不同。模型中,将被再吸收的激光(激光再吸收后一般以无相干性的 ASE 存在)和没有被吸收的抽运光都作为将要被滤除的包层光处理,这就可以对激光器中的包层光功率进行评估和仿真。

实验中,测试了激光器的输出功率、效率和被滤除的包层光功率数据,利用上面建立理论模型和实际测量的抽运光谱特性,并结合掺杂光纤生产厂商给出的相关参数,对激光器的相关特性进行仿真,仿真和实验结果如图 3 所示。图 3(a)为有无包层光滤除情况下,激光器输出功率特性,结果表明:在最大抽运功率为 1500 W 时,光纤激光输出 1040 W,光光转换效率为 69.3%;包层光滤除器共滤除了 160 W 残余抽运光与高阶信号光。图 3(b)是理论仿真与实验测得的不同抽运功率情况下输出功率的对比。由图可知,在最高抽运功率时,理论输出功率为 1074 W,实际输出功率为 1040 W,二者吻合较好。二者之间的差异主要是仿真中没有考虑熔接点导致的基模损耗等因素的影响。图 3(c)给出了理论仿真和实验测量到的激光器光光效率曲线,可以看到,在低功率时,二者存在一定的误差,但是高功率时,二者符合较好。图 3(d)给出了理论仿真和实验测量的不同抽运功率情况下被滤除的包层光功率,二者也吻合较好。

测试了激光器输出光谱特性,结果如图 4 所示。图 4(a)表明,由于进行了有效的包层光滤除,激光器输出光谱中不存在任何残留抽运光。图 4(b)给出了输出激光光谱的细节图,可以看出:由于四波混频、自相位调制等非线性效应的存在,随着激光输出功率增加,输出激光 3 dB 谱线宽度从 0.7 nm 展宽到 4 nm 左右。

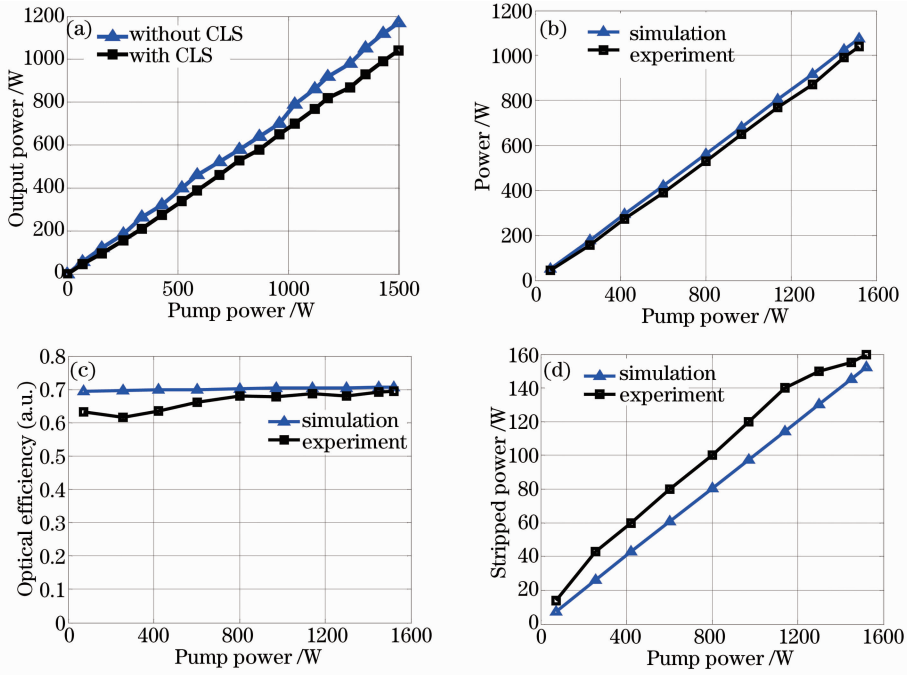


图 3 不同抽运功率情况下实验和仿真得到的激光器功率特性。(a) 包层光滤除前后功率；(b) 功率；(c) 效率；(d) 滤除的包层光功率

Fig. 3 Laser power characteristics in experiment and simulation at different pump powers. (a) Powers before and after CLS in experiment; (b) powers; (c) efficiencies; (d) stripped cladding lights powers

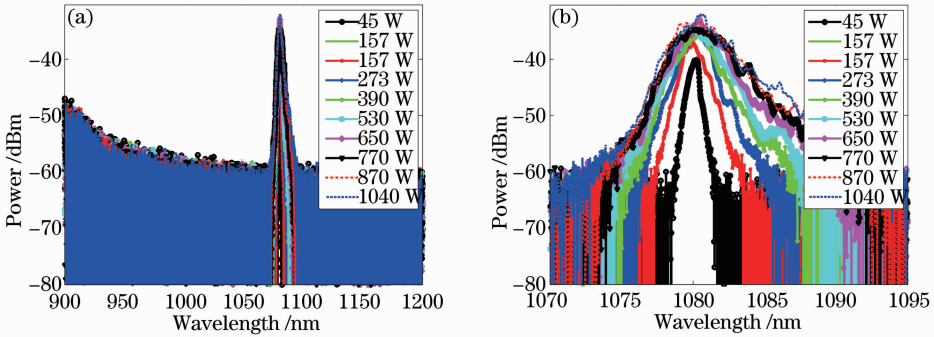


图 4 (a) 不同功率时激光器光谱特性；(b) 放大光谱图

Fig. 4 (a) Spectra of the fiber laser in different powers; (b) amplified spectra

测试了不同输出功率时的光束质量,结果如图 5(a)所示。由于实验采用的光纤仅支持两个模式,

实验中采用了光纤缠绕和包层光滤除的方式抑制高阶模式,激光器在不同输出功率时的光束质量 M^2

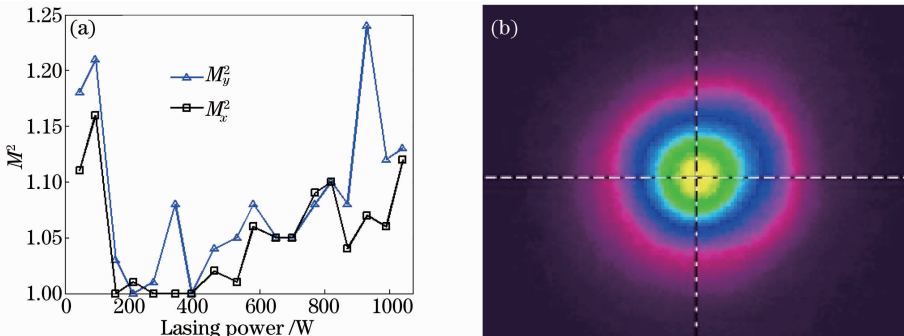
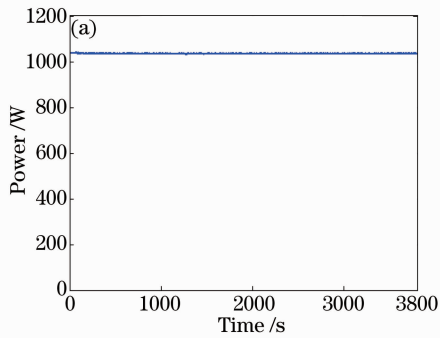


图 5 (a) 不同输出功率时的光束质量；(b) 最高输出功率时光斑形态

Fig. 5 (a) Beam qualities in different powers; (b) beam profile in the highest power

都小于 1.25。在最大输出功率时,光束质量 M^2 小于 1.15,得到了近衍射极限的激光输出。在最大输出功率 1040 W 时,激光光斑如图 5(b) 所示。从图 5(a) 中看到,随着输出功率提高,光束质量先提高再降低,主要是由于不同模式的增益竞争以及热效应导致的。在低功率时,由于模式增益竞争导致基模功率比例逐渐提高,使得光束质量提高;在较高功率时,由于热效应使得光纤纤芯折射率增加,对高阶模式的束缚能力增强,高阶模式功率比例提高,使得光束质量降低,这与文献[20-21]的实验结果类似。



为了验证激光器的稳定性,测试了激光器长时间工作的功率和温度特性,如图 6 所示。图 6(a) 为激光器在最高功率连续工作 1 h 的功率曲线,可以看出,激光器输出功率稳定,功率起伏小于 1%。在激光器中,除了 CLS 外,抽运光进入掺杂光纤的熔接点一般是最高温度点 T_{max} 。实验测量了高反射光栅与掺杂光纤熔点温度,如图 6(b) 所示。结果表明,在 1 h 的长时间工作过程中,该点温度小于 40 °C,且稳定不变。

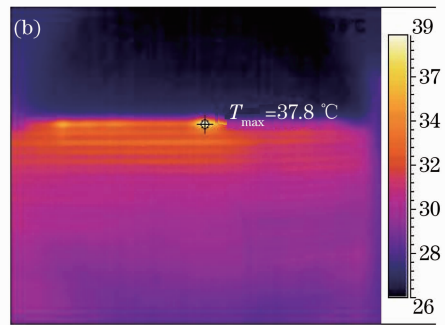


图 6 (a)激光器功率稳定性与(b)温度测试结果

Fig. 6 Measured results of (a) laser power stability and (b) temperature

此外,还测试了 CLS、合束器和其他熔点的温度。实验中,采用了 3 段 CLS,第一段 CLS 在输出功率大于 300 W 以后,温度稳定在 75 °C 左右。继续增加抽运功率,CLS 温度不会升高,只是需要滤除包层光的光纤长度增加。除了 CLS 温度在 75 °C,激光器中所有器件和熔点温度都在 40 °C 以下。因此,通过增加抽运功率,激光器的输出功率有望进一步提升。

4 结 论

基于振荡器结构构建了单端抽运 1 kW 全光纤激光器,在抽运功率为 1500 W 时,获得了近衍射极限($M^2 < 1.25$)的 1040 W 光纤激光输出。建立了考虑抽运光的光谱特性、模式耦合和光纤弯曲损耗等因素的速率方程,根据激光器结构和器件参数,进行了数值仿真,仿真结果与实验结果符合较好。对激光器进行了稳定性测试,在 1 h 的长时间不间断测试过程中,激光功率起伏小于 1%。在整个激光器系统中,除了包层光滤除部分温度在 75 °C 左右,其余所有器件和熔接点的温度都小于 40 °C。目前,相关公司已经推出 2 kW 的光纤光栅,通过增加抽运激光功率,有望获得 1.5~2 kW 的单端抽运光纤激光。由于激光振荡器结构能够一定程度上抑制模式

不稳定问题,因此,振荡器结构的光纤激光是中等功率光纤激光发展的重要方向之一。

参 考 文 献

- Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- Photonics I. IPG Photonics Successfully Tests World's First 10 Kilowatt Single-Mode Production Laser [EB/OL]. 2009, http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_10kW_SM_laser.pdf.
- Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. 1.5 kW near single-mode all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702001.
代守军, 何兵, 周军. 1.5 kW 近单模全光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702001.
- Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW ytterbium doped all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416001.
闫平, 肖起榕, 付晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416001.
- Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Opt Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- Jauregui C, Eidam T, Limpert J, *et al.*. Impact of modal interference on the beam quality of high-power fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2011, 19(4): 3258-3271.
- Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, *et al.*. Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers[J]. Opt Express, 2013, 21(2): 1944-1971.
- Haarlamert N, de Vries O, Liem A, *et al.*. Build up and decay of mode instability in a high power fiber amplifier [J]. Opt Express, 2012, 20(12): 13274-13283.
- Jauregui C, Eidam T, Otto H, *et al.*. Physical origin of mode

- instabilities in high-power fiber laser systems[J]. *Opt Express*, 2012, 20(12): 12912–12925.
- 10 Tao Rumao, Wang Xiaolin, Xiao Hu, *et al.*. Theoretical study of the threshold power of mode instability in high-power fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0114001.
陶汝茂, 王小林, 肖 虎, 等. 高功率光纤放大器中模式不稳定性阈值功率的理论研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0114001.
- 11 Tao Rumao, Zhou Pu, Xiao Hu, *et al.*. Progress of study on mode instability in high power fiber amplifiers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 020001.
陶汝茂, 周 朴, 肖 虎, 等. 高功率光纤激光中模式不稳定性现象研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 020001.
- 12 Mohammed W, Gu X. Fiber Bragg grating in large-mode-area fiber for high power fiber laser applications[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(28): 5297–5301.
- 13 Teraxion Inc.. PWS-HPR-Reflector for High-Power Fiber Lasers [EB/OL]. 2013, http://www.teraxion.com/images/stories/pdf/MKT-FTECH-PWS-HPR_201306-3.0.pdf.
- 14 Gong M, Yuan Y, Li C, *et al.*. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers[J]. *Opt Express*, 2007, 15(6): 3236–3246.
- 15 Kelson I, Hardy A. Optimization of strongly pumped fiber lasers [J]. *J Lightwave Technol*, 1999, 17(5): 891–897.
- 16 Yong W, Hong P. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification[J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(10): 2262–2270.
- 17 Kelson I, Hardy A A. Strongly pumped fiber lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, 34(9): 1570–1577.
- 18 Schermer R T, Cole J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2007, 43(10): 899–909.
- 19 O G Okhotnikov. *Fiber Lasers* [M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2012.
- 20 T Eidam, C Wirth, C Jauregui, *et al.*. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(14): 13218–13224.
- 21 C Wirth, T Schreiber, M Rekas, *et al.*. High-power linear-polarized narrow linewidth photonic crystal fiber amplifier[C]. *SPIE*, 2010, 7580: 75801.

栏目编辑: 王晓琰