

前向拉曼兼容光纤激光器的优化设计

高 洋 郭少锋 冷进勇 王文亮 舒柏宏

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 高功率全光纤结构激光系统中, 后向受激拉曼散射光会被合束器等器件吸收, 产生热量并对器件造成破坏, 成为限制功率提升的因素之一。提出前向拉曼兼容光纤激光器概念, 通过注入辅助种子光抑制后向光来提高输出功率。建立了含有受激拉曼散射效应(SRS)的主振荡功率放大(MOPA)结构数值模型, 模拟分析了后向光的特性, 且比较了注入不同功率、不同波长辅助种子光对输出总功率的影响。计算结果表明, 当注入辅助种子光在特定波长特定功率时, 系统输出功率可提升一倍以上。

关键词 激光器; 光纤激光器; 受激拉曼散射; 热效应; 辅助种子

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s102008

Optimization Design of Forward Raman Compatible Fiber Lasers

Gao Yang Guo Shaofeng Leng Jinyong Wang Wenliang Shu Bohong

*College of Optoelectric Science and Engineering, National University
of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract In high power all fiber laser systems, the backward stimulated Raman Stokes light will be absorbed in combiners and converted into heat finally, which can cause damage to devices and restrain output power. Forward Raman compatible fiber laser concept is put forward to suppress the backward Raman Stokes light by injecting an auxiliary seed. The model of master oscillator power amplifier (MOPA) with stimulated Raman scattering (SRS) effect is simulated and the characteristics of backward Raman Stokes light are discussed. The effects of different auxiliary seeds injections on the increase of output power are compared. Results of simulations have illustrated that the output power of the system can be increased by more than one time when the certain power and wavelength auxiliary seed are injected.

Key words lasers; fiber laser; stimulated Raman scattering; thermal effect; auxiliary seed

OCIS codes 140.3510; 140.6810; 140.3520; 290.5910

1 引 言

光纤激光器具有光束质量好、转换效率高、结构紧凑等优点, 在激光雷达, 光纤传感、工业加工和军事等方面具有广泛应用^[1-2]。近年来, 随着抽运光源亮度的提升和双包层制造工艺的发展, 光纤激光器的输出功率不断提高。而受激拉曼散射(SRS)效应成为限制连续光纤激光器输出功率进一步提升的主要因素之一, SRS效应既产生前向受激拉曼散射光, 也会产生后向受激拉曼散射光。前向受激拉曼散射光不仅恶化光谱还会造成激光器的效率下降, 而后向受激拉曼散射光会被合束器等器件吸收, 对系统安全造成威胁。

SRS效应可以通过使用大模场面积(LMA)光纤降低信号光功率密度实现抑制, 但是纤芯面积过大会由于空间烧孔效应引起模式不稳定性, 造成光束质量下降。一些特殊结构光纤通过增加拉曼波长的损耗来抑制拉曼光传输, 如 W-型光纤^[3], 滤波光纤^[4], 全固态光子带隙光纤^[5]和双孔辅助光纤^[6], 但这些光纤对工艺水平要求较高, 且光纤对拉曼光损耗较低, 通常在 1 dB/m 以下。使用长周期光栅^[7]有望成为抑制拉曼光的最佳方式,

收稿日期: 2015-02-15; **收到修改稿日期:** 2015-03-15

作者简介: 高 洋(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事大功率光纤激光器方面的研究。E-mail: cciagao@163.com

导师简介: 舒柏宏(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事大气光学及光束控制方面的研究。E-mail: shu_bh@tom.com

* **通信联系人。** E-mail: guosf2002@hotmail.com

但长周期光栅温度稳定性差。据作者所知,还未见到长周期光栅在大功率、高温条件下实验的报道。

在一些工业加工场合,无须对激光器输出光谱严格要求,同时前向拉曼光和信号光在同一根光纤传播,不会影响输出光光束质量,因此前向拉曼光功率可以作为总功率的一部分输出。而后向拉曼散射光会被合束器等器件吸收并产生热量,甚至对器件造成破坏,成为限制功率提升的主要表现。如果在激光器的输出中允许前向拉曼光的存在,且控制后向拉曼光功率在一定范围,则激光器总的输出功率有望得到大幅提升,这种激光器称之为前向拉曼兼容光纤激光器。

前向拉曼兼容光纤激光器可以采用注入辅助种子光的方式实现。通过降低前向信号光的功率,实现对后向拉曼光的抑制,可以大幅提升激光器的输出功率。本文结合速率方程和拉曼耦合方程,建立了抽运光、信号光、拉曼散射光和注入辅助种子光共存的速率方程,数值模拟了注入不同辅助种子光时对后向光的影响,并在设定一定后向光功率上限时,对注入不同辅助种子光取得的最大输出功率进行了对比讨论。

2 理论模型

对含有辅助种子光和不含辅助种子光注入的两种主振荡功率放大(MOPA)结构进行了数值模拟,仿真结构如图1所示。其中,MOPA结构采用振荡器加一级放大器模型,振荡器与放大器之间不存在级间隔离,在仿真过程中不考虑级间连接损耗和端面反射作用。

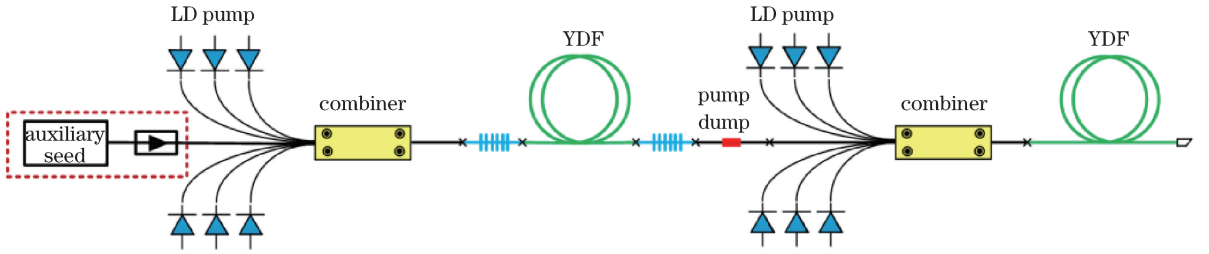


图1 含辅助种子光的MOPA结构

Fig.1 Structure of MOPA system with injecting auxiliary seed

为了模拟注入辅助种子光对后向光及输出功率的影响,结合光纤激光器速率方程和拉曼耦合方程^[8-9],建立了含有辅助种子光注入的前向拉曼兼容光纤激光器结构稳态模型,如下所示:

$$\begin{aligned}
 \frac{N_2(z)}{N} &= \left\{ \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p\lambda_p + [P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_s\lambda_s}{hcA} + \frac{[P_R^+(z) + P_R^-(z)]\sigma_{aR}\Gamma_R\lambda_R + [P_{au}^+(z) + P_{au}^-(z)]\sigma_{aau}\Gamma_{au}\lambda_{au}}{hcA} \right\} / \\
 &\quad \left\{ \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p\lambda_p + \frac{1}{\tau} + [P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_{as} + \sigma_{es})\Gamma_s\lambda_s}{hcA} + \frac{[P_R^+(z) + P_R^-(z)](\sigma_{aR} + \sigma_{eR})\Gamma_R\lambda_R + [P_{au}^+(z) + P_{au}^-(z)](\sigma_{aau} + \sigma_{eau})\Gamma_{au}\lambda_{au}}{hcA} \right\}, \\
 \frac{dP_p^+(z)}{dz} &= \Gamma_p [(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z) - \sigma_{ap}N]P_p^+(z) - \alpha_p P_p^+(z), \\
 \pm \frac{dP_s^+(z)}{dz} &= \Gamma_s [(\sigma_{as} + \sigma_{es})N_2(z) - \sigma_{as}N]P_s^+(z) - \alpha_s P_s^+(z) - \frac{\lambda_R}{\lambda_s} \frac{g_R}{A_{eff}} [P_R^+(z) + P_R^-(z)]P_s^+(z) \\
 &\quad - \frac{\lambda_{au}}{\lambda_s} \frac{g_{au}}{A_{eff}} [P_{au}^+(z) + P_{au}^-(z)]P_s^+(z) + 2\sigma_{es}N_2(z) \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \Delta\lambda_s \\
 \pm \frac{dP_R^+(z)}{dz} &= \Gamma_R [(\sigma_{aR} + \sigma_{eR})N_2(z) - \sigma_{aR}N]P_R^+(z) - \alpha_R P_R^+(z) + \frac{g_R}{A_{eff}} [P_s^+(z) + P_s^-(z)]P_R^+(z) \\
 &\quad + 2\sigma_{eR}N_2(z) \frac{hc^2}{\lambda_R^3} \Delta\lambda_R + S_{RS}P_R^-(z, t) \\
 \pm \frac{dP_{au}^+(z)}{dz} &= \Gamma_{au} [(\sigma_{aau} + \sigma_{eau})N_2(z) - \sigma_{aau}N]P_{au}^+(z) - \alpha_{au} P_{au}^+(z)
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$+ \frac{g_{\text{au}}}{A_{\text{eff}}} [P_s^+(z) + P_s^-(z)] P_{\text{au}}^+(z) + 2\sigma_{\text{eau}} N_2(z) \frac{hc^2}{\lambda_{\text{au}}^3} \Delta\lambda_{\text{au}} + S_{\text{RS}} P_{\text{au}}^-(z, t),$$

式中,上标+、-分别表示前向和后向,下标 p,s,R,au 分别表示为抽运光、信号光、拉曼散射光和辅助种子光, P 表示功率, Γ 表示填充因子, α 是损耗系数, λ 表示波长, σ_a 、 σ_e 分别为吸收、发射截面。 S_{RS} 为瑞利散射系数, τ 为 Yb^{3+} 上能级平均寿命, N_2 为上能级 Yb^{3+} 浓度, N 为 Yb^{3+} 离子掺杂浓度, A 为纤芯面积, A_{eff} 为纤芯有效作用面积, h 为普朗克常数, c 为光速, $\Delta\lambda$ 为自发辐射谱线宽度。

3 数值仿真与结果讨论

以下对大功率光纤激光器中 SRS 效应进行了模拟研究,分析了后向受激拉曼散射光的特性;对含有辅助种子光注入的前向拉曼兼容光纤激光器进行了优化,比较了注入不同功率、不同波长辅助种子光时对系统后向拉曼散射光以及对最大输出功率的影响。在仿真参数中,振荡器和放大器分别采用 20 m 和 25 m 纤芯为 20 μm ,包层为 400 μm 的光纤,振荡器抽运功率固定为 1 kW,其他仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真所用参数

Table 1 Parameters in the simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
N	$1.2 \times 10^{25} / \text{m}^3$	λ_s	1080 nm
τ	0.8 ms	λ_R	1134 nm
Γ_s 、 Γ_R 、 Γ_{au}	0.8	$\Delta\lambda_s$	2 nm
Γ_p	0.0025	$\Delta\lambda_R$	5 nm
α_p	3.1 dB/km	$\Delta\lambda_{\text{au}}$	5 nm
α_s 、 α_R 、 α_{au}	2.3 dB/km	g_R	$0.53 \times 10^{-13} \text{ m/W}$
λ_p	975 nm	S_{RS}	$1.2 \times 10^{-7} / \text{m}^{[10]}$

3.1 大功率光纤激光器中 SRS 研究

在连续光纤激光器中,通常定义当系统达到拉曼阈值时前向拉曼光功率达到信号光输出功率的 1%^[11],此时进一步增加抽运光功率,信号光功率会出现下降。利用上述仿真参数,在不含辅助种子光注入的 MOPA 结构仿真系统中,系统在放大器抽运功率为 3515 W 时达到拉曼阈值,并取得 3820 W 的信号光功率输出,抽运光和信号光功率分布如图 2 (a) 所示。由于在高功率光纤激光系统中,没有承受很高功率的隔离器可以使用,不能对拉曼散射光进行级间隔离,因此前、后向拉曼光功率在前级积累到一定程度后,在下一级得到放大,如图 2 (b) 所示。在系统中,由于放大器中信号光功率分布大于振荡器中信号光功率分布,因此,前向拉曼散射光取得较大增益和较高输出功率。

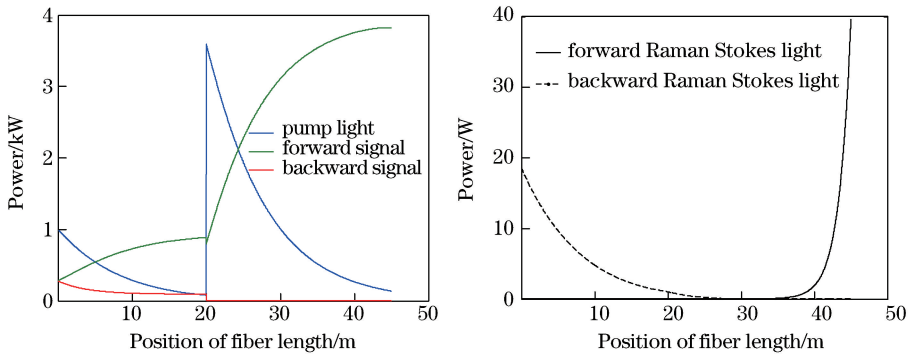


图 2 SRS 阈值处各功率分布。(a) 信号光和抽运光;(b)受激拉曼散射光

Fig. 2 Power distributions at SRS threshold. (a) Signal and pump light; (b) stimulated Raman Stokes light

3.2 前向拉曼兼容光纤激光器分析

在前向拉曼兼容光纤激光器中,系统输出功率随放大器抽运功率变化如图 3 所示。由于拉曼光功率作为有效功率输出,因此系统总输出功率随放大器抽运功率增加而增大,而系统效率仅因量子亏损降低 5%。图 4 为后向拉曼光功率随放大器抽运功率的变化情况,由图可知当系统达到拉曼阈值后,后向拉曼光急剧增

长。后向光会被合束器等器件吸收并产生热量,当热量积累到一定程度,会对器件造成破坏。因此,在前向拉曼兼容光纤激光器中,后向光功率成为限制功率提升的主要因素。

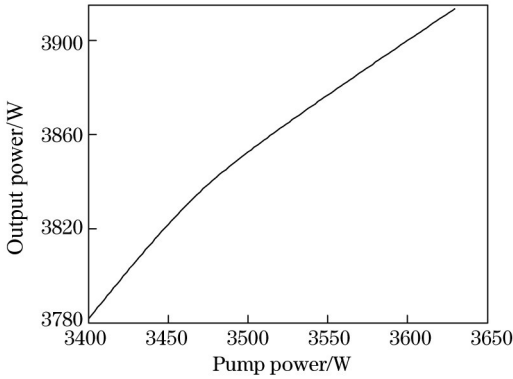


图 3 总输出功率随放大器抽运功率变化

Fig. 3 Total output power varies with amplifier pump power

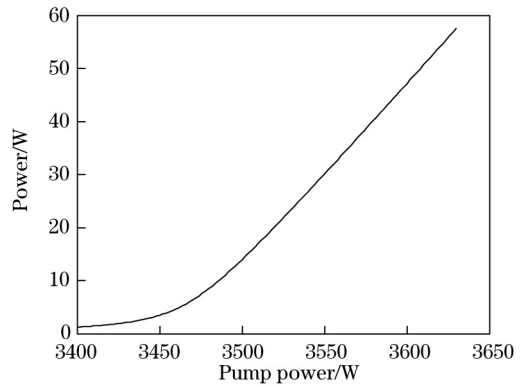


图 4 后向拉曼光功率随放大器抽运功率变化

Fig. 4 Backward Raman Stokes power varies with amplifier pump power

3.3 前向拉曼兼容光纤激光器的优化

3.3.1 注入辅助种子光对后向光的影响

当系统达到其拉曼阈值后,抑制信号光能量向后向拉曼光转移,则能量主要从激光器前端输出,不会对系统安全产生影响。在前向拉曼兼容激光器前端注入一定辅助拉曼种子光,系统在较短光纤内即达到拉曼阈值,此后前向拉曼光急剧增长并充分消耗信号光能量,使得后向拉曼光的增益降低,起到抑制后向光的效果。如图 5(a)所示,当系统注入功率为 1 W,波长为 1134 nm 的辅助种子光时,其在 25 m 光纤附近即达到拉曼阈值,此后信号光能量迅速向前向拉曼光转移,信号光功率分布大大降低。系统注入辅助种子光后,后向光功率变化如图 5(b)所示。由图可知系统注入辅助种子光后,后向光输出功率由 18.61 W 降低为 15.62 W,后向光功率受到抑制。仿真过程中已考虑二级受激拉曼散射光,当系统注入此辅助种子光时,后向二级拉曼光功率为 10 μ W 量级,此时后向光的成分主要是波长为 1134 nm 的受激拉曼散射光。

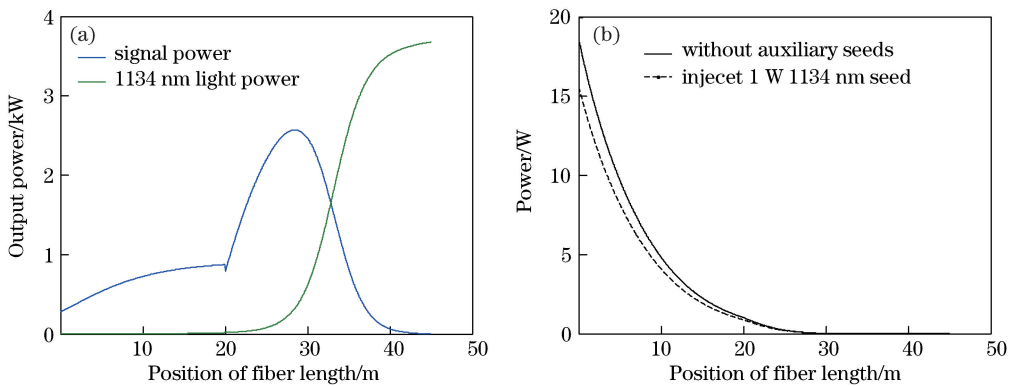


图 5 注入 1 W, 1134 nm 光对系统影响。(a) 信号光; (b) 后向拉曼光

Fig. 5 Effect of injecting 1 W, 1134 nm seed to system. (a) Signal; (b) backward Stokes light

由上述结果可知,当系统注入上述辅助种子光后,降低了 1080 nm 信号光功率分布,但后向光功率并没有大幅降低。其主要是因为高功率的前向拉曼光由于瑞利散射提高了后向拉曼种子光的功率,其对增益的降低进行了一定补偿,所以,后向光功率并没有得到充分抑制。由此可以看出,要对系统中后向拉曼光进行抑制,一方面要降低信号光功率分布,另一方面要控制前向辅助光功率不能太高。下面比较了注入不同功率、不同波长辅助种子光时系统后向光功率变化,不同波长辅助种子光的拉曼增益系数如图 6 所示。在放大器抽运功率为 3515 W 条件下,注入不同功率、不同波长辅助种子光后系统后向光功率大小如图 7 所示。在仿真过程中,前、后向光的成分中分别考虑了信号光、辅助光、辅助光的拉曼光、信号光的 1134 nm 拉曼光及其 1188 nm 二级拉曼光。

由图 7 可知,在放大器抽运功率不变条件下,其后向光功率随辅助种子光注入功率的提高而减小。注入辅助种子光功率越高,系统则在更短的光纤内达到拉曼阈值,从而使得信号光对前向辅助光的转移更加充分,因此后向光的增益更低,功率更小。当注入辅助种子光功率为 4 W 时,注入 1120 nm 辅助种子光产生的后向光功率最小;其次是注入 1116 nm 的辅助光;当注入 1134 nm 的辅助种子光时,后向光功率最高。当系统注入 1120 nm 的辅助种子光时,1134 nm 拉曼光完全受到抑制,且 1120 nm 辅助光由于拉曼增益系数低,信号光能量对其转移少,瑞利散射提供的后向种子光功率较小,因此其后向光功率最低。而 1116 nm 辅助光拉曼增益系数很低,系统注入较低功率的 1116 nm 辅助种子光不能对 1134 nm 拉曼光起到很好抑制作用,后向光成分中主要为 1134 nm 拉曼光;只有提高注入功率才能降低后向 1134 nm 拉曼光的功率。对于系统注入 1134 nm 及其附近辅助种子光的情况,由于拉曼增益系相对较高,使得信号光能量全部转移到辅助光中,造成瑞利散射作用产生的后向种子光功率高,所以系统的后向光功率较高。

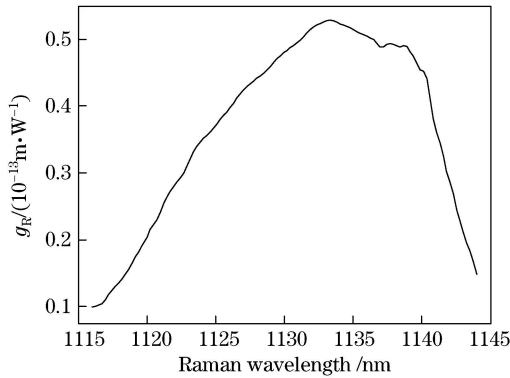


图 6 拉曼增益系数

Fig. 6 Raman gain coefficient

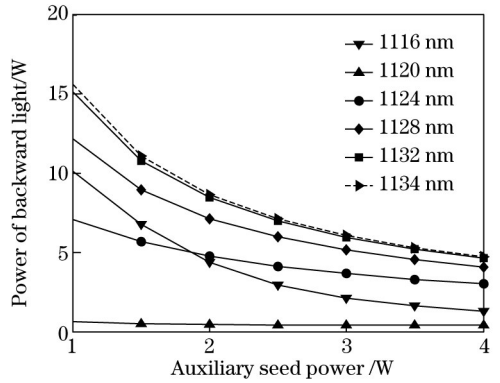


图 7 注入不同辅助种子光后向光功率比较

Fig. 7 Comparison of backward light power at different auxiliary seeds

3.3.2 注入不同辅助种子光所取得的最高输出功率

由于器件工艺的影响,设定系统能承受的最高后向光功率为 20 W。注入不同功率、不同波长辅助种子光时,系统得到的最大输出功率如图 8 所示。由图可知,当系统注入 9 W、1120 nm 辅助种子光时取得的最大输出功率为 8016 W,相对于未注入种子光时最大输出功率 3860 W,前向兼容拉曼激光器的功率能使输出功率提高了 108 %。当系统注入较短波长辅助光时,其对 1134 nm 拉曼光的抑制作用较低,因此后向 1134 nm 光是抑制其功率提升的主要因素。而对于系统注入 1134 nm 波长及其附近辅助种子光,前向拉曼光在较短光纤内就能达到拉曼阈值,前向辅助光急剧增长,其在较长光纤内更易产生二级拉曼光,所以后向二级拉曼光成为限制最大输出功率的因素。当系统注入 1120 nm 波长辅助种子光时,其拉曼增益系数相对 1116 nm 波长辅助光高,相

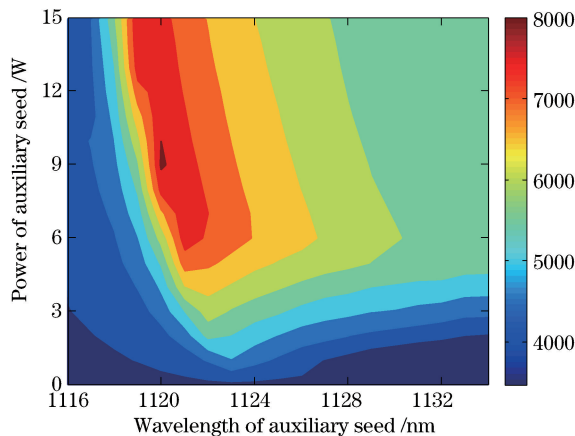


图 8 注入不同功率、不同辅助种子光时系统最大功率

Fig. 8 Maximum output power at different auxiliary seeds with different powers

对于 1134 nm 波长辅助光较低,其既可以比较好地抑制 1134 nm 拉曼光,又不会过早出现二级拉曼光,因此系统可得到最高的输出功率。随着抽运功率的提高,1120 nm 辅助光的拉曼光将成为限制输出功率提升的主要因素。

4 结 论

研究了不含隔离器的高功率光纤激光系统中后向拉曼光的特性。提出前向拉曼兼容光纤激光器的概念,通过注入辅助种子光来抑制后向光功率,从而提高总功率输出。结果表明,在本系统中注入 1120 nm 辅助种子光对后向光的抑制效果最好,同时在注入 9 W、1120 nm 辅助种子光时前向拉曼兼容激光器得到最大输出功率,相对于未注入辅助种子光系统,输出功率提升了 108 %。该模拟结果对于研究后向受激拉曼散射光和提升系统输出功率具有一定的实际指导意义。

参 考 文 献

- 1 Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. JOSA B, 2010, 27(11): B63—B92.
- 2 Zervas M N, Codemard C. A. High power fiber lasers: A review[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2014, 20(5): 219—241.
- 3 Kim J, Dupriez P, Codemard C, *et al.*. Suppression of stimulated Raman scattering in a high power Yb-doped fiber amplifier using a W-type core with fundamental mode cut-off[J]. Opt Express, 2006, 14(12): 5103—5113.
- 4 Fini J M, Mermelstein M D, Yan M F, *et al.*. Distributed suppression of stimulated Raman scattering in an Yb-doped filter-fiber amplifier[J]. Opt Lett, 2006, 31(17): 2550—2552.
- 5 Taru T, Hou J, Knight J C. Raman gain suppression in all-solid photonic bandgap fiber[C]. 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication (ECOC), 2007, 1:2.
- 6 Zenteno L, Wang J, Walton D, *et al.*. Suppression of Raman gain in single-transverse-mode dual-hole-assisted fiber[J]. Opt Express, 2005, 13(22): 8921—8926.
- 7 Nodop D, Jauregui C, Jansen F, *et al.*. Suppression of stimulated Raman scattering employing long period gratings in double-clad fiber amplifiers[J]. Opt Lett, 2010, 35(17): 2982—2984.
- 8 Shirakawa A, Codemard C A, Ji J, *et al.*. High-brightness 210 μ J pulsed raman fiber source[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2008, CTuL1.
- 9 Wang Y. Stimulated Raman scattering in high-power double-clad fiber lasers and power amplifiers[J]. Optical Engineering, 2005, 44(11): 114202.
- 10 Oron R, Hardy A A. Rayleigh backscattering and amplified spontaneous emission in high-power ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. JOSA B, 1999, 16(5): 695—701.
- 11 Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. Derivation of Raman threshold formulas for CW double-clad fiber amplifiers[J]. Opt Express, 2009, 17(10): 8476—8490.

栏目编辑: 韩 峰