

文章编号: 0258-7025(2006)03-0298-05

## 高功率双包层光纤激光器的受激拉曼散射

陈吉欣<sup>1,2</sup>, 隋展<sup>2</sup>, 陈福深<sup>1</sup>, 刘志强<sup>3</sup>, 李明中<sup>2</sup>, 王建军<sup>2</sup>, 罗亦鸣<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 电子科技大学通信与信息工程学院光纤重点实验室, 四川 成都 610054;  
(<sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, <sup>3</sup> 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 受激拉曼散射(SRS)会限制光纤激光器功率的提高。利用光纤激光器的功率传输方程,理论分析了高功率掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器中的受激拉曼散射效应,得到了纤芯直径、光纤长度、掺杂浓度以及抽运方式对光纤激光器特性的影响。通过分析,得到了增大纤芯直径、减小光纤长度、降低掺杂浓度以及合理的抽运方式可以有效地减小拉曼散射的影响。利用已有的实验结果对理论模型进行了对比,证明了理论模型的正确性。所得的结果对设计实现高功率双包层光纤激光器提供了理论依据。

**关键词** 激光技术;受激拉曼散射;高功率;双包层光纤;光纤激光器

**中图分类号** TN 248.1;O 437.3 **文献标识码** A

## Stimulated Raman Scattering in High Power Double Clad Fiber Laser

CHEN Ji-xin<sup>1,2</sup>, SUI-Zhan<sup>2</sup>, CHEN Fu-shen<sup>1</sup>, LIU Zhi-qiang<sup>3</sup>,

LI Ming-zhong<sup>2</sup>, WANG Jian-jun<sup>2</sup>, LUO Yi-ming<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical Fiber, School of Communication and Information Engineering,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China  
<sup>2</sup> Research Center of Laser Fusion, <sup>3</sup> Institute of Applied Electronics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Stimulated Raman scattering (SRS) can affect the power scaling of high power fiber laser. According to the power transfer equations, SRS effect in high power Yb<sup>3+</sup> doped double clad fiber laser is studied. The effect of core diameter, fiber length, doped concentration and pumping method on the characteristic of fiber laser is studied. The way for suppressing SRS, such as increasing core diameter, decreasing fiber length, reducing doped concentration and using reasonable pumping method, is discussed. The theoretical model is proved by the experimental result.

**Key words** laser technique; stimulated Raman scattering; high power; double clad fiber; fiber laser

### 1 引 言

双包层光纤激光器得到了很大的发展,输出功率不断提高<sup>[1~3]</sup>。目前,限制光纤激光器功率进一步提高的主要因素有热效应和非线性效应,如受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)<sup>[4]</sup>等。这些非线性效应会把一部分激光功率转移到斯托克斯光上,影响激光功率的进一步提高。在高功率光纤激光器中,由于纤芯直径较大(20~40 μm),激光的谱

线较宽(>1 nm),受激布里渊散射的阈值远远高于受激拉曼散射<sup>[5]</sup>,因此,受激拉曼散射成为影响光纤激光器功率提高的主要非线性效应。

在普通通信光纤中,对拉曼光纤激光器和放大器的研究已经有很多报道<sup>[6~8]</sup>。但是,在掺稀土元素的光纤激光器和放大器中,对受激拉曼散射的研究报道很少。Liu等在输出功率为810 W的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器实验中指出了受激拉曼散射会影响激光输出功率的提高<sup>[9]</sup>。Y. Wang等从理论上

收稿日期:2005-09-01;收到修改稿日期:2005-11-29

基金项目:中国工程物理研究院双百人才基金(2004R0205)资助项目。

作者简介:陈吉欣(1977—),男,上海人,电子科技大学博士研究生,主要从事光纤激光器和放大器的研究。E-mail:jixinc@163.com

对千瓦级光纤激光器中的受激拉曼散射进行了分析,得到增大纤芯直径和减小光纤长度可以削弱受激拉曼散射<sup>[10]</sup>,这与普通光纤中得到的结论类似,但是,在分析中未考虑掺杂浓度和抽运方式的影响。

本文从速率方程出发,对高功率掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器中的受激拉曼散射效应进行了详细分析,并用已有的实验对理论模型进行了验证。

## 2 理论模型

图 1 为掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的结构示意图

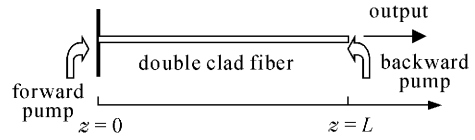


图 1 双包层光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic of double clad fiber laser

图。抽运光从左右两个端面注入,光纤长度为  $L$ , 光纤左端采用双色镜(对抽运光高反,对产生的激光高透),右端直接采用解理面作为输出耦合。

在稳态条件下,考虑一阶受激拉曼散射,光纤激光器的速率方程为

$$\frac{N_2}{N} = \frac{\frac{(P_p^+ + P_p^-)\sigma_{ap}\Gamma_p\lambda_p}{hcA} + \frac{(P_s^+ + P_s^-)\sigma_{as}\Gamma_s\lambda_s}{hcA} + \frac{(P_R^+ + P_R^-)\sigma_{aR}\Gamma_R\lambda_R}{hcA}}{\frac{(P_p^+ + P_p^-)(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p\lambda_p}{hcA} + \frac{1}{\tau} + \frac{(P_s^+ + P_s^-)(\sigma_{as} + \sigma_{es})\Gamma_s\lambda_s}{hcA} + \frac{(P_R^+ + P_R^-)(\sigma_{aR} + \sigma_{eR})\Gamma_R\lambda_R}{hcA}} \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2]P_p^\pm - \alpha_p P_p^\pm, \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm}{dz} = \Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2 - \sigma_{as}N]P_s^\pm - \alpha_s P_s^\pm - \frac{\lambda_R}{\lambda_s} \frac{g_R}{A_{eff}}(P_R^+ + P_R^-)P_s^\pm, \quad (3)$$

$$\pm \frac{dP_R^\pm}{dz} = \Gamma_R[(\sigma_{eR} + \sigma_{aR})N_2 - \sigma_{aR}N]P_R^\pm - \alpha_R P_R^\pm(z) + \frac{g_R}{A_{eff}}(P_s^+ + P_s^-)P_R^\pm, \quad (4)$$

式中  $P_p^\pm$ ,  $P_s^\pm$  和  $P_R^\pm$  分别为光纤中抽运光、激光和拉曼斯托克斯光的功率(±代表正向和反向);  $N_2$  为上能级 Yb<sup>3+</sup> 浓度,  $N$  为总的掺杂浓度;  $\Gamma_p$ ,  $\Gamma_s$  和  $\Gamma_R$  分别为抽运光、激光和斯托克斯光与纤芯的重叠因子,  $\Gamma_p$  由纤芯和内包层的面积比得出,  $\Gamma_s$  和  $\Gamma_R$  由光纤的模式理论得到;  $\sigma_{a(e)p}$ ,  $\sigma_{a(e)s}$  和  $\sigma_{a(e)R}$  分别为抽运光、激光和斯托克斯光的吸收和发射截面;  $\alpha_p$ ,  $\alpha_s$  和  $\alpha_R$  分别为抽运光、激光和斯托克斯光的散射损耗系数;  $\lambda_p$ ,  $\lambda_s$  和  $\lambda_R$  分别为抽运光、激光和斯托克斯光的波长;  $A$  为纤芯面积,  $A_{eff}$  为纤芯有效面积;  $g_R$  为拉曼增益系数;  $\tau$  为自发辐射寿命;  $h$  为普朗克常量;  $c$  为真空中的光速。

(1)式描述了上能级 Yb<sup>3+</sup> 浓度沿  $z$  方向的变化情况。可以看出,  $N_2(z)$  与光纤参数、掺杂浓度以及抽运光、激光和斯托克斯光的分布有关。(2), (3) 和 (4) 式分别给出了抽运光、激光和斯托克斯光功率沿  $z$  方向的变化特性。从 (3) 和 (4) 式可以看出, 激光功率和斯托克斯光功率相互影响, 由于受激拉曼散射, 激光会将一部分功率转移给斯托克斯光。

设  $P_{p0}^+$  和  $P_{p0}^-$  分别为正反向输入抽运光功率, 对于正向抽运,  $P_{p0}^+ \neq 0$ ,  $P_{p0}^- = 0$ ; 对于反向抽运,  $P_{p0}^- \neq$

$0$ ,  $P_{p0}^+ = 0$ ; 对于双向抽运,  $P_{p0}^+ = P_{p0}^- \neq 0$ 。

光纤激光器中的正反向激光和斯托克斯光功率可以通过边界条件联系

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), \quad (5)$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L), \quad (6)$$

$$P_R^+(0) = R_3 P_R^-(0), \quad (7)$$

$$P_R^-(L) = R_4 P_R^+(L), \quad (8)$$

式中  $R_1$  和  $R_2$  为前后腔镜对激光的反射率;  $R_3$  和  $R_4$  为前后腔镜对斯托克斯光的反射率。

$\lambda_p = 975$  nm,  $\lambda_s = 1065$  nm, 在锗石英光纤中基于  $440$  cm<sup>-1</sup> 频移的  $\lambda_R = 1117$  nm<sup>[5]</sup>。  $R_1 = 0.98$ 。前腔镜一般对长波长的斯托克斯光不起作用, 因此  $R_3 = 0.04$ 。输出的光纤解理面对激光和斯托克斯光的反射率分别为  $R_2 = 0.04$  和  $R_4 = 0.04$ 。光纤的内包层面积为  $7.068 \times 10^4$  μm<sup>2</sup>。  $\alpha_p = 3 \times 10^{-5}$  cm<sup>-1</sup>,  $\alpha_s = \alpha_R = 5 \times 10^{-5}$  cm<sup>-1</sup>。  $g_R = 0.92 \times 10^{-13}$  m/W<sup>[4]</sup>。  $N = 4 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>。抽运光、激光和斯托克斯光的吸收和发射截面可以从文献[11]中得到。

为了求解上面满足边界条件的微分方程组, 需要采用打靶法<sup>[12,13]</sup>。

### 3 计算结果及讨论

#### 3.1 纤芯直径对输出的影响

在正向抽运下,当光纤长度一定 ( $L = 15 \text{ m}$ )时,图 2 为不同纤芯直径下的输出特性。可以得出,随着抽运光功率增大到一定值时,光纤激光器中出现受激拉曼散射,输出激光功率开始减小,而斯托克斯光功率开始增大;当纤芯直径  $D_c = 20 \mu\text{m}$ 时,受激拉曼散射的阈值抽运光功率为 767 W,最大输出激光功率为 577 W;当  $D_c = 30 \mu\text{m}$ 时,受激拉曼散射的阈值抽运光功率为 1778 W,最大输出激光功率为 1204 W。因此,为了减小受激拉曼散射的影响,可以采用大直径纤芯的光纤。

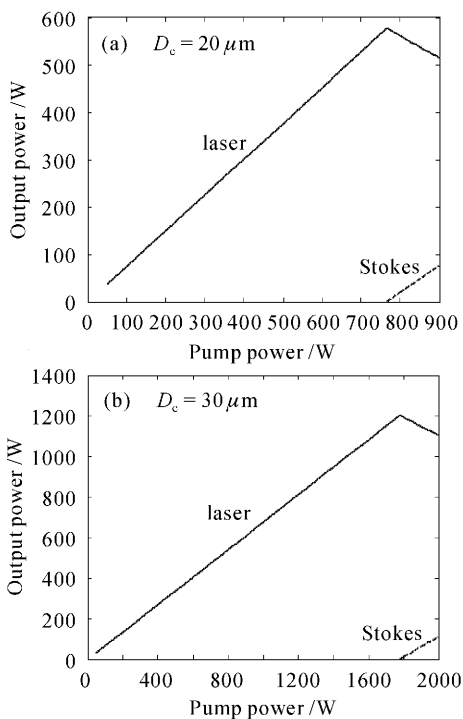


图 2 不同纤芯直径下的输出激光和斯托克斯光的功率特性

Fig. 2 Output laser and Stokes power for different core diameters

#### 3.2 光纤长度对输出的影响

在正向抽运下,当纤芯直径一定 ( $D_c = 20 \mu\text{m}$ )而光纤长度不同时,光纤激光器的输出特性如图 3 所示。当光纤长度  $L = 10 \text{ m}$ 时,受激拉曼散射的阈值抽运光功率为 1358 W,最大输出激光功率为 1038 W;当  $L = 30 \text{ m}$ 时,受激拉曼散射的阈值抽运光功率为 247 W,最大输出激光功率为 170 W。因此,通过减小光纤长度,可以得到较高的输出功率。

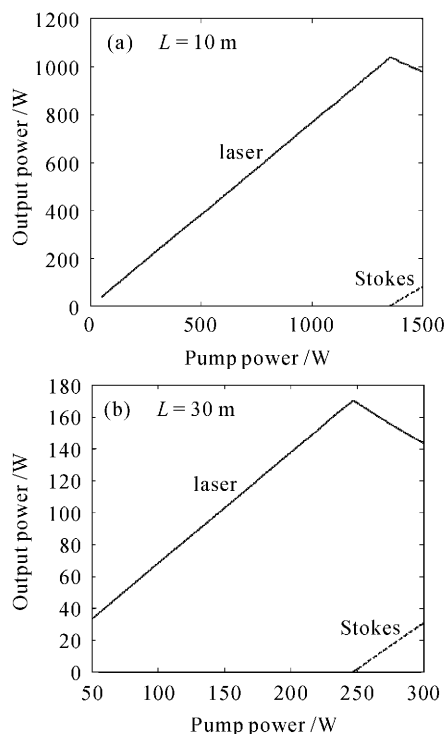


图 3 不同光纤长度下的输出激光和斯托克斯光的功率特性

Fig. 3 Output laser and Stokes power for different fiber lengths

#### 3.3 掺杂浓度对输出的影响

在正向抽运下,掺杂浓度与受激拉曼散射阈值抽运光功率和最大输出激光功率的关系如图 4 和图 5 所示。可以看出,随着掺杂浓度增大,受激拉曼散射的阈值抽运光功率减小,最大输出激光功率减小。当光纤的掺杂浓度较高时,光纤中的激光功率在长度很短时就可以达到较高的水平。于是,高掺杂浓度的光纤中,高功率的激光与光纤的作用距离较长,更容易出现受激拉曼散射。在实际的高功率双包层光纤激

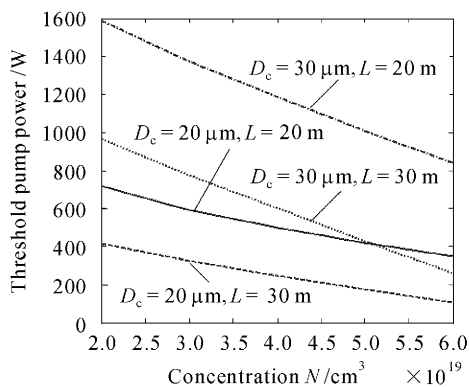


图 4 掺杂浓度与阈值抽运功率的关系

Fig. 4 Doped concentration versus threshold pump power

光器中,为了获得较高的输出激光功率,可以适当地选择低掺杂浓度的光纤。

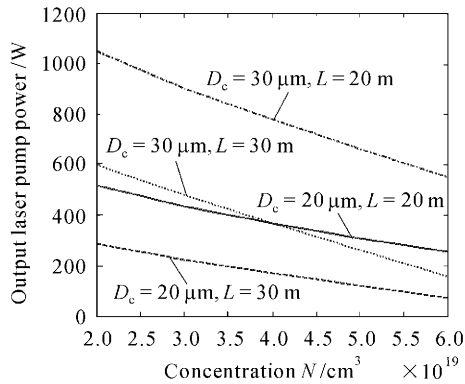


图 5 掺杂浓度与输出激光功率的关系

Fig. 5 Doped concentration versus output laser power

### 3.4 抽运方式对光纤激光器特性的影响

在掺杂浓度、纤芯半径和光纤长度一定时 ( $N = 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $D_c = 20 \text{ }\mu\text{m}$ 和  $L = 20 \text{ m}$ ),图 6 为正向抽运 ( $P_{p0}^+ = 1200 \text{ W}$ ),反向抽运 ( $P_{p0}^- = 1200 \text{ W}$ )和双向抽运 ( $P_{p0}^+ = P_{p0}^- = 600 \text{ W}$ )情况下,光纤激光器中的正反向激光和斯托克斯光功率的分布。可以看出,在三种抽运情况下,由于受激拉曼散射效应,在光纤中出现了斯托克斯光,一部分激光功率转移给了斯托克斯光;与其他两种情况相比,在正向抽运方式下,正向激光功率在  $z = 6 \text{ m}$ 后开始明显下降;反向抽运时,光纤中的斯托克斯光功率分布最小,增长最缓慢,而正向抽运时,光纤中的斯托克斯光功率分布最大,增长也最快。

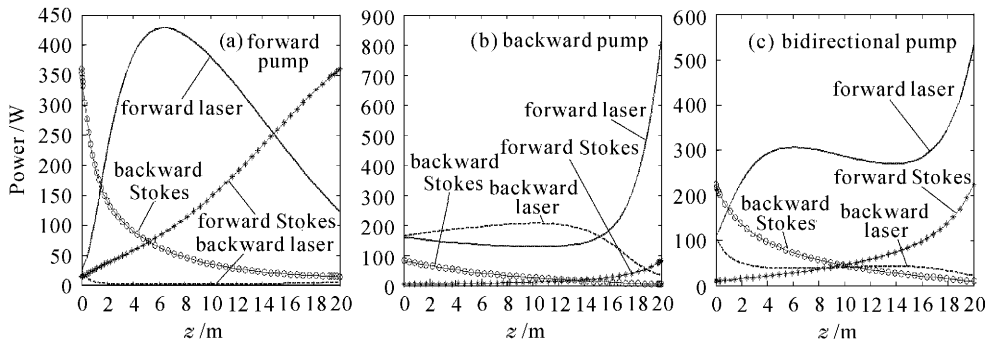


图 6 抽运光功率 1200 W 时光纤中的激光和斯托克斯光功率分布

Fig. 6 Power distribution of laser and Stokes in the fiber with pump power of 1200 W

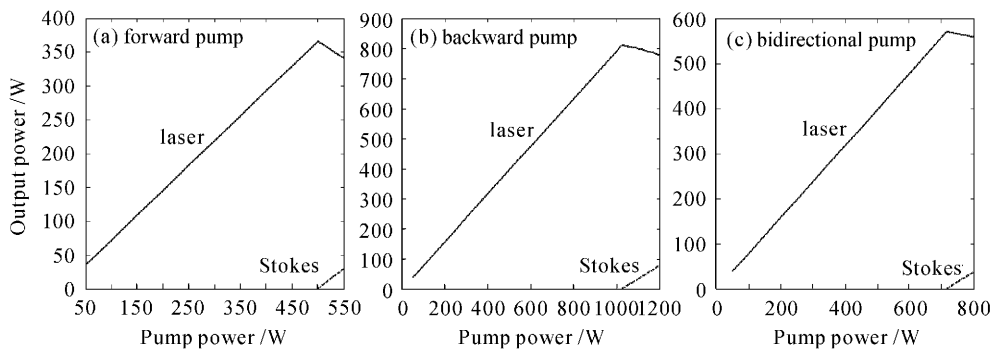


图 7 输出功率与抽运光功率的关系

Fig. 7 Relationship between output power and pump power

当抽运光功率变化时,光纤激光器的输出特性如图 7 所示。从图中可以看出,在三种抽运方式下,当抽运光功率较小时,不出现受激拉曼散射,激光功率随着抽运光功率增大而线性增大;当抽运光功率增大到一定值时,开始出现受激拉曼散射,激光功率开始随抽运光功率增加而下降;在三种抽运方式下,受激拉曼散射的阈值抽运光功率分别为 500 W, 1025 W 和

718 W,正向抽运的阈值最低,反向抽运的阈值最高;输出的最高激光功率分别为 366 W, 809 W 和 569 W,正向抽运的输出功率最低,反向抽运的输出功率最高。

在高功率的光纤激光器中,为了减小受激拉曼散射的影响,获得更高的输出激光功率,需要考虑抽运方式。一般来说,如果单端抽运不会引起光纤中的温

度过高,采用反向抽运方式较好;如果单端抽运光功率较高,为了有效减小光纤的热效应,采用双向抽运方式较好,虽然这种方式的输出激光功率不是最高。

## 4 实验对比

为了验证理论模型的正确性,对参考文献[14]中的实验进行了分析。实验采用光纤光栅作为两个腔镜,通过多模耦合器对光纤激光器进行双向抽运。实验中的参数为:  $D_c = 9 \mu\text{m}$ ,  $L = 60 \text{ m}$ ,  $\lambda_p = 915 \text{ nm}$ ,  $\lambda_s = 1086 \text{ nm}$ ,  $\lambda_R = 1140 \text{ nm}$ ,  $R_1 = 0.999$ ,  $R_2 = 0.05$ 。文献中的实验和理论分析的结果如图 8 所示。在实验中,由于受激拉曼散射,得到的最大激光功率为 135 W,这与我们理论分析的结果基本一致。

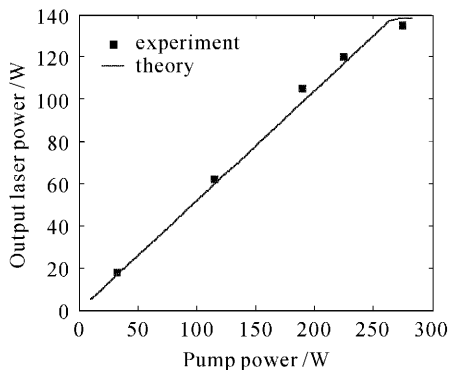


图 8 实验与理论分析结果对比

Fig. 8 Comparison between experiment and theory

## 5 结 论

理论分析了高功率掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器中的受激拉曼散射效应。分析表明,当抽运光功率较小时,光纤激光器中不会出现受激拉曼散射,激光功率随着抽运光功率增大而增大;当抽运光功率增大到一定值后,光纤中出现受激拉曼散射,一部分激光功率转移给了斯托克斯光,激光功率开始下降;采用纤芯直径较大、长度较短和低掺杂浓度的光纤可以有效抑制受激拉曼散射的影响,得到较高的输出激光功率;反向抽运时,受激拉曼散射的阈值抽运光功率和输出激光功率最高,而正向抽运时,受激拉曼散射的阈值抽运光功率和输出激光功率最低,双向抽运时,

受激拉曼散射的阈值抽运光功率和输出激光功率介于二者之间。因此,在高功率的双包层光纤激光器中,需要根据实际情况,合理地采用抽运方式。

致谢 感谢加拿大 McMaster 大学的 Wang Yong 博士在数值计算中给予的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fiber laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158~1160
- 2 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(25):6088~6092
- 3 Li Lijun, Fan Wande, Fu Shenggui *et al.*.  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber laser with frequency selecting by double-clad fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1):55~58  
李丽君, 范万德, 付圣贵等. 双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1):55~58
- 4 L. Zenteno. High-power double-clad fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(9):1435~1447
- 5 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1995
- 6 Chi Ronghua, Yun Peng, Su Hongxin *et al.*. Numerical simulation and analysis of cascaded Raman fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9):773~776  
迟荣华, 运鹏, 苏红新等. 两级串级拉曼全光纤激光器的数值模拟及分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9):773~776
- 7 S. D. Jackson. Theoretical characterization of Raman oscillation with intracavity pumping of fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(5):626~634
- 8 M. Rini, I. Cristiani, V. Degiorgio. Numerical modeling and optimization of cascaded cw Raman fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(10):1117~1122
- 9 C-H. Liu, B. Ehlers, F. Doerfel *et al.*. 810 W continuous-wave and single-transverse-mode fibre laser using 20  $\mu\text{m}$  core Yb-doped double-clad fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(23):1471~1472
- 10 Y. Wang, C-Q. Xu, H. Po. Analysis of Raman and thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **242**:487~502
- 11 R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7):1049~1056
- 12 Shen Linfang, Chen Dengpeng, Qian Jingren. The numerical modeling of erbium-doped superfluorescent fiber source [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2001, **18**(1):1~6  
沈林放, 陈登鹏, 钱景仁. 掺铒光纤超荧光光源的理论模拟[J]. *计算物理*, 2001, **18**(1):1~6
- 13 Liu Honglin, Zhang Zaixuan, Zhuang Songlin. Solving the propagation equation of bi-direction pumped fiber Raman amplifier with shooting method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(12):46~49  
刘红林, 张在宣, 庄松林. 用打靶法求解双向泵浦的拉曼放大器传输方程[J]. *光电工程*, 2004, **31**(12):46~49
- 14 N. S. Platonov, D. V. Gapontsev, V. P. Gapontsev *et al.*. 135 W CW fiber laser with perfect single mode output [C]. *CLEO*, 2002, May, 19~24