

文章编号:1004-4213(2011)04-0509-5

# 掺镱光纤放大器中的热效应分析

杨春波,冷进勇,陆启生

(国防科技大学 光电科学与工程学院,长沙 410073)

**摘 要:**为了研究掺镱双包层单频光纤放大器中受激布里渊散射产生的规律,从含有受激布里渊散射的速率方程和热传导方程出发,对光纤放大器中的热效应问题进行了理论分析.讨论了泵浦功率、包层半径和换热系数对受激布里渊散射的影响,所得结论为实验研究单频光纤放大器中受激布里渊散射的变化规律提供了理论依据.

**关键词:**光纤放大器;温度;受激布里渊散射;换热系数

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114004.0509

## 0 引言

与传统的光纤激光器相比,大功率单频光纤激光光源具有衍射极限的光束质量,可用于相干光束合束.另外,单频激光光源还广泛应用于波长转换和高准确度的干涉测量,如引力波探测.由于高功率单频光纤激光光源线宽(一般在 kHz~MHz 数量级)要小于受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)增益带宽(一般为几十兆赫兹),且纤芯中较高的光功率密度和较长的相互作用长度等因素都预示光纤将不适合用作大功率单频激光光源的增益介质,原因是光纤中 SBS 会限制单频激光光源的输出功率的增大.而温度对 SBS 的增益有着重要的影响,

文献[1-4]主要讨论了光纤纵向温度梯度的影响,很少涉及光纤工作温度对光纤放大器的影响.本文通过求解光纤放大器中的速率方程和热传导方程,推导出光纤放大器中的温度分布表达式.在此基础上,模拟计算了光纤放大器中的温度分布特性,探索提高光纤放大器输出功率途径.

## 1 SBS 的速率方程

考虑信号光得到充分放大,即忽略自发放大散射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)的影响,掺镱( $\text{Yb}^{3+}$ )双包层光纤放大器中含有 SBS 的速率方程为<sup>[5]</sup>

$$\frac{dP_s}{dz} = N_0 \Gamma_s P_s \left[ \frac{N_2}{N_0} (\sigma_s^e + \sigma_s^a) - \sigma_s^a \right] - \alpha_s P_s - P_s \sum_i g_{\text{sbs}i} P_{\text{sbs}i} / A_{\text{eff}} \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^f}{dz} = N_0 \Gamma_p P_p^f \left[ \frac{N_2}{N_0} (\sigma_p^e + \sigma_p^a) - \sigma_p^a \right] - \alpha_p P_p^f \quad (2)$$

$$\frac{dP_p^b}{dz} = -N_0 \Gamma_p P_p^b \left[ \frac{N_2}{N_0} (\sigma_p^e + \sigma_p^a) - \sigma_p^a \right] - \alpha_p P_p^b \quad (3)$$

$$\frac{dP_{\text{sbs}i}}{dz} = -N_0 \Gamma_s P_{\text{sbs}i} \left[ \frac{N_2}{N_0} (\sigma_s^e + \sigma_s^a) - \sigma_s^a \right] + \alpha_s P_{\text{sbs}i} - g_{\text{sbs}i} P_s P_{\text{sbs}i} / A_{\text{eff}} \quad (4)$$

$$N_2 = N_0 \frac{\Gamma_s \sigma_s^a P_s \lambda_s + \Gamma_p \sigma_p^a P_p \lambda_p + \Gamma_s \sum_i \sigma_s^a P_{\text{sbs}i} \lambda_{\text{sbs}i}}{\Gamma_s (\sigma_s^a + \sigma_s^e) P_s \lambda_s + \Gamma_p (\sigma_p^a + \sigma_p^e) P_p \lambda_p + \Gamma_s \sum_i (\sigma_s^a + \sigma_s^e) P_{\text{sbs}i} \lambda_{\text{sbs}i} + \frac{hcA_{\text{eff}}}{\tau}} \quad (5)$$

式中,  $P_s$  为信号光功率,  $P_p^f$ 、 $P_p^b$  分别为前向和后向泵浦光功率,  $P_{\text{sbs}i}$  和  $g_{\text{sbs}i}$  分别对应于布里渊散射频率  $\nu_{\text{sbs}i}$  的功率和增益系数,  $z$  为沿光纤的位置坐标;  $\sigma_s^e$  为截面面积,  $A_{\text{eff}}$  为有效截面,  $\Gamma_s$  和  $\Gamma_p$  分别为信号光和

泵浦光场模与镱离子掺杂区域的重叠因子,  $\alpha_s$  和  $\alpha_p$  分别为信号光和泵浦光的背景损耗;  $N_0$  为镱离子的掺杂浓度,  $N_1$ 、 $N_2$  为下能级和上能级离子浓度, 且  $N_0 = N_1 + N_2$ ,  $\tau$  为上能级寿命. 边界条件如图 1.

第一作者:杨春波(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为高功率光纤激光器. Email:68490388@163.com

导师:陆启生(1942-),男,教授,主要研究方向为高能激光技术、激光与物质相互作用等. Email:luqsheng@public.cs.hn.cn

收稿日期:2010-08-10;修回日期:2010-10-15

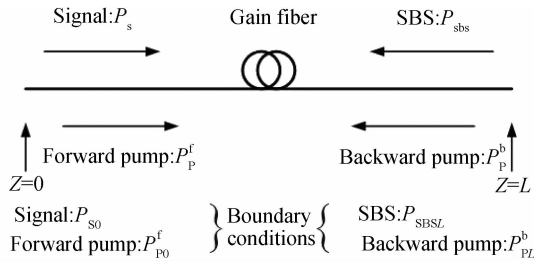


图1 边界条件

Fig. 1 Boundary conditions

在常用的双包层光纤中,纤芯的数值孔径远小于1,因此,包含有温升的SBS增益谱的表达式为<sup>[5-6]</sup>

$$g(v_{\text{sbsi}}) = g_0 \frac{(\Omega_{\text{sbs}}/2)^2}{(v_{\text{sbsi}} - (v_{\text{B}} + c_f \Delta T))^2 + (\Omega_{\text{sbs}}/2)^2} \quad (6)$$

式中: $g_0$ 为峰值增益, $g_0 = \frac{4\pi^2 \gamma^2}{nc\rho v_a \lambda_s^2 \Omega_{\text{sbs}}}$ ;  $\Omega_{\text{sbs}}$ 为线宽, $\Omega_{\text{sbs}}/2\pi = 74.39 - \delta T_1$ ;  $\delta_1 = 0.181 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ ,  $c_f$ 为温度系数, $v_{\text{B}} = 2nv_a/\lambda_s$ 为相对于种子光 $\lambda_s$ 的布里渊频移, $n$ 为折射率, $v_a$ 为声速;电致伸缩系数 $\gamma = 0.286 * (n^2 - 1)(n^2 + 2)$ ,密度 $\rho = \rho_0 [1 + 3\beta T]^{-1} \text{ kg}/\text{m}^3$ , $\rho_0 = 2180 \text{ kg}/\text{m}^3$ , $\beta = 5.5 \times 10^{-7}$ ;  $\Delta T = T - T_c$ ,  $T_c$ 为室温取 $20^\circ\text{C}$ ,即光纤温度.文献[1-4]中都把 $g_0$ 取为一个定值,而本文取其为温度的函数.

## 2 光纤中的温度分布

为了处理问题方便,认为纤芯和包层是同心圆.纤芯半径为 $a$ ,包层半径为 $b$ ,如图2.在柱坐标系中,稳态条件下的热传导方程为<sup>[7-8]</sup>

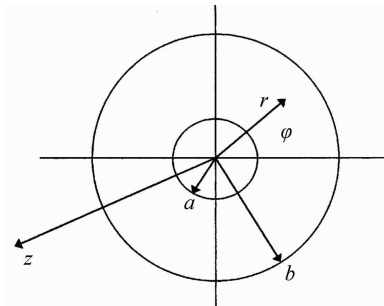


图2 光纤的横截面示意图

Fig. 2 Geometry of the modeled fiber

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = -\frac{Q(z)}{\kappa} \quad (7)$$

式中: $T(r, z)$ 为光纤中的温度分布, $\kappa$ 为热导率, $Q(z)$ 为热密度.

在纤芯中( $0 \leq r \leq a$ ),泵浦光被吸收存在热源,因此 $Q(z) \neq 0$ ;在包层中( $a \leq r \leq b$ ),不存在热源,因此 $Q(z) = 0$ .由于光线的长度比截面直径大得多,光纤端面的发热量远远小于侧面的热量,故可以忽略光纤纵向散热,那么式(7)可以改写为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_1(r, z)}{\partial r} \right] = -\frac{Q(z)}{\kappa} \quad (0 \leq r \leq a) \quad (8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_2(r, z)}{\partial r} \right] = 0 \quad (a \leq r \leq b) \quad (9)$$

若采用同向泵浦方式,泵浦光从左端面进入双包层光纤并在纤芯中被吸收,它的分布为

$$P(z) = P_0 \exp(-\alpha z) \quad (10)$$

式中: $P(z)$ 为 $z$ 处的泵浦光功率, $P_0$ 为入纤的泵浦光功率, $\alpha$ 为吸收系数.

若仅考虑量子亏损发热,那么纤芯中的热密度为

$$Q(z) = Q_0 \exp(-\alpha z) \quad (11)$$

根据边界条件求解式(8)、(9),可以得出温度分布为

$$T(r, z) = T_c + \left[ \frac{Q_0}{4\kappa} r^2 + \frac{Q_0 a^2}{4\kappa} + \frac{Q_0 a^2}{2\kappa} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{Q_0 a^2}{2Hb} \right] \exp(-\alpha z) \quad (0 \leq r \leq a) \quad (12)$$

$$T(r, z) = T_c + \left[ \frac{Q_0 a^2}{2\kappa} \ln\left(\frac{b}{r}\right) + \frac{Q_0 a^2}{2Hb} \right] \exp(-\alpha z) \quad (a \leq r \leq b) \quad (13)$$

纤芯中心的温度 $T_0$ 为

$$T_0 = T_c + \left[ \frac{Q_0 a^2}{4\kappa} + \frac{Q_0 a^2}{2\kappa} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{Q_0 a^2}{2Hb} \right] \exp(-\alpha z)$$

式中: $Q_0 = \frac{\alpha P_0}{\pi a^2} \eta$ ,  $P_0$ 为入纤的泵浦光功率, $\alpha$ 为吸收系数, $\eta = (\lambda_s - \lambda_p)/\lambda_s$ 为量子亏损, $\lambda_p$ 和 $\lambda_s$ 分别为泵浦光和信号光波长; $H$ 为换热系数; $T_c$ 为外界空气温度.

## 3 计算结果及讨论

利用光纤里的典型数据,由式(6)计算不同温度情况下SBS的增益谱,可以看出谱线随温度有较大的漂移.而且随温度的升高,增益谱的谱宽变窄,峰值增益变大,也就是说温度越高,SBS越容易得到放大,从而影响光纤放大器的输出功率的提高,如图3和4.

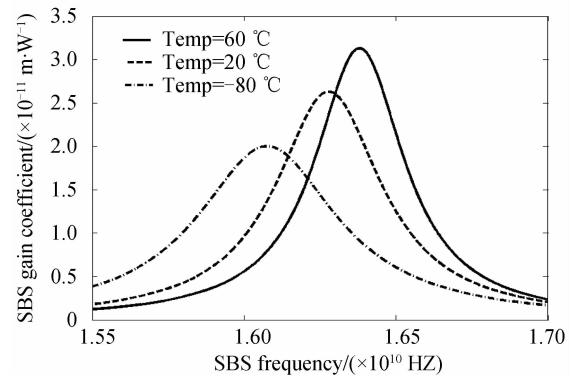


图3 不同温度下的增益谱

Fig. 3 Brillouin gain spectra at different temperatures

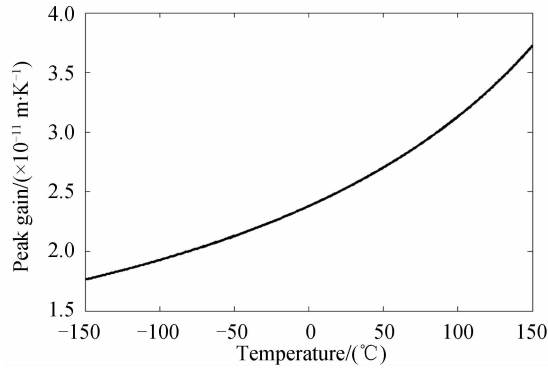


图4 SBS的峰值增益随温度的变化

Fig. 4 Peak gain as a function of temperature

使用修正的弛豫法解速率方程,该方法不需要给出初始猜测值,且收敛速度较快,具体解法这里不做详细的介绍.计算中使用到的参量见表1.

表1 模拟计算速率方程所用参量

Table 1 Simulation parameters for rate-equation model

Pump wavelength	$\lambda_p = 976 \text{ nm}$
Signal wavelength	$\lambda_s = 1\ 064 \text{ nm}$
Radius of core	$a = 10 \text{ }\mu\text{m}$
Radius of cladding	$b = 200 \text{ }\mu\text{m}$
The absorption cross-sections of pump light	$\sigma_p^a = 2.35 \times 10^{-24} \text{ m}^2$
The emission cross-sections of pump light	$\sigma_p^e = 2.17 \times 10^{-24} \text{ m}^2$
Pump background loss	$\alpha_p = 0.003 \text{ m}^{-1}$
Pump overlap factor	$\Gamma_p = 0.002\ 5$
The absorption cross-sections of signal light	$\sigma_s^a = 2.95 \times 10^{-27} \text{ m}^2$
The emission cross-sections of signal light	$\sigma_s^e = 2.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
Signal background loss	$\alpha_s = 0.005 \text{ m}^{-1}$
Signal overlap factor	$\Gamma_s = 0.88$
Pump absorption coefficient	$\alpha = 2 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$
The doping concentration	$N_0 = 7.84 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Upper level lifetime	$\tau = 0.8 \text{ ms}$
The effect section	$A_{\text{eff}} = 3.14 \times 10^{-10} \text{ m}^2$
Temperature slop coefficient	$c_t = 2.25 \text{ MHz} \cdot \text{K}^{-1}$
Heat transfer coefficient	$H = 3 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

假设输入信号光功率为1 W,光纤长度为8 m,本文分别模拟了 $T=60\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $T=-80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在不考虑沿光纤纵向温度差情况下,放大器输出功率、SBS光功率和泵浦功率之间的关系,如图5和图6.在 $T=60\text{ }^\circ\text{C}$ 时,泵浦功率达到81 W时就已经达到了

SBS阈值,而在 $T=-80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在114 W时才达到SBS阈值.可见控制光纤温度,使其工作在较低温度时,光纤放大器的输出功率将会得到提高.

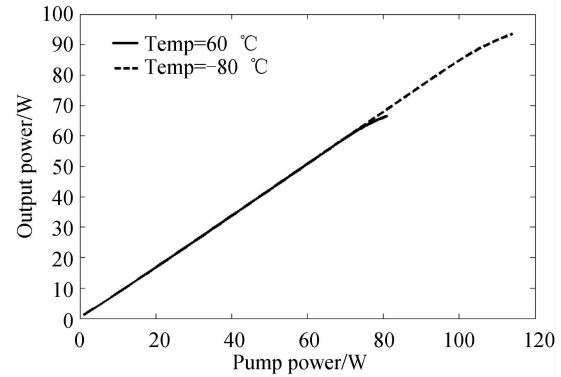


图5 放大器输出功率随泵浦功率变化图

Fig. 5 Output power as a function of pump power

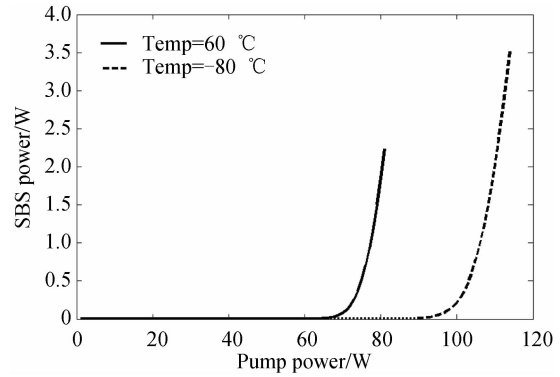


图6 SBS功率随泵浦功率变化图

Fig. 6 SBS power as a function of pump power

图5和图6为了更好的说明光纤工作温度对光纤放大器的影响,因而没有考虑纵向温度梯度.在考虑纵向温度梯度时,得到了图7和图8,在泵浦功率为155 W时,得到了125 W的输出.这为制作百瓦级光纤放大器提供了很好的依据.

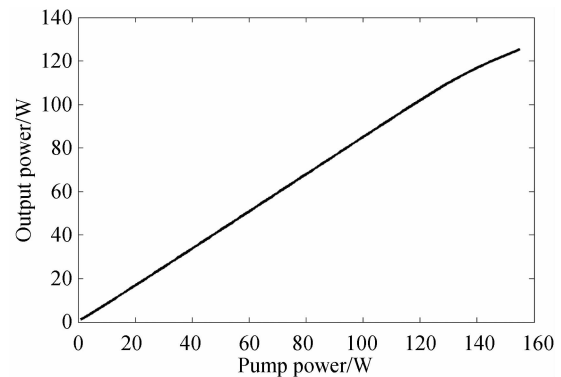


图7 考虑纵向温度梯度时放大器输出功率随泵浦功率变化图

Fig. 7 Output power as a function of pump power when the longitudinal temperature is considered

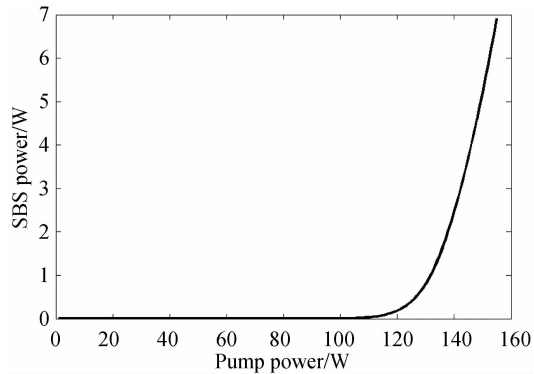


图 8 考虑纵向温度梯度时 SBS 功率随泵浦功率变化图  
Fig. 8 SBS power as a function of pump power when the longitudinal temperature is considered

利用式(12)和(13)模拟出温度的径向分布图(图 9), 图中所示温度为与外界温度的温差. 从图中可以看出温度沿径向的分布, 对半径  $r$  近似为对数关系. 温度梯度从中心到包层非常之小, 甚至小于纤芯区域的温度梯度. 对比图 9(a)和(b)发现当泵浦功率由 18 W 提高到 155 W 时, 中心温度提高了很多, 由 68 K 增加到了 586 K, 而光纤的外包层和涂覆层通常为有机聚合物, 无法承受过高的温度, 这种效应在大功率泵浦时会对光纤造成热损伤, 对提高放大器的输出功率是一种制约因素.

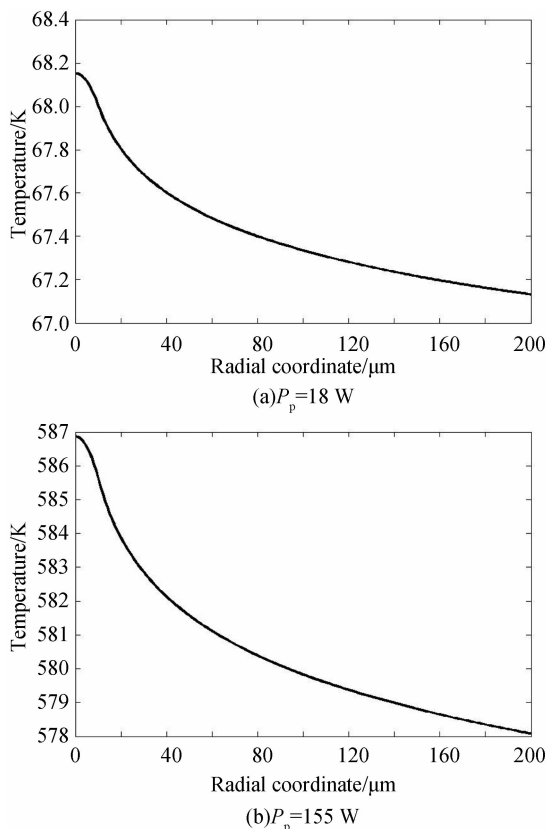


图 9 泵浦功率分别为 18 W 和 155 W 时的温度径向分布  
Fig. 9 Temperature in fiber as a function of radial coordinate for 18 W and 155 W of pump power

通过模拟相同纤芯半径, 不同包层半径时纤芯中心的温度分布可以得到图 10. 图 10(a)为中心温

度随泵浦功率的变化图, 不难看出小的包层半径会使中心温度变大, 这将导致 SBS 的增益变大, 线宽变窄, 更加容易产生 SBS, 而影响光纤放大器输出功率的提高. 在光纤放大器中选择包层半径较大的光纤有利于提高放大器输出功率.

同时还发现中心温度  $T_0$  对换热系数的变化也很敏感. 图 10(a)中所用的换热系数为  $3 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , 当换热系数变为  $6 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  时, 中心温度降低了很多, 如图 10(b). 这是由中心温度表达式中的  $Q_0 a^2 / 2Hb$  项所影响的. 提高换热系数可以使光纤中的温度更低, 在高功率光纤放大器中可以采用强制冷却的方法来散热, 如采用水冷, 风冷等方式.

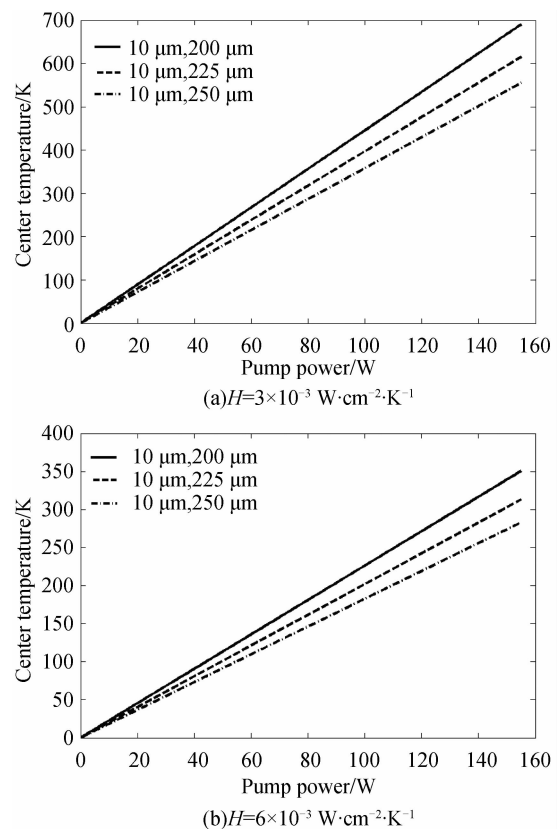


图 10 纤芯中心温度随泵浦功率变化  
Fig. 10 Fiber center temperature as a function of pump power

## 4 结论

从本文的理论计算和数值模拟中可以看到纤芯中心温度对光纤放大器的影响是相当明显的. 温度高时, 受激布里渊散射增益变大和线宽变窄, 更容易产生受激布里渊散射, 限制了光纤放大器的输出功率. 在其他条件相同的情况下, 使用外包层半径较大的光纤并采用适当措施提高系统的换热系数, 将会有效提高光纤放大器的输出功率.

### 参考文献

- [1] LIU An-ping. Novel SBS suppression scheme for high power

- fiber amplifier[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 6102R. 1-6102R. 9.
- [2] YAN Feng-ping, SHAN Ying, JIAN Shui-sheng. Study on threshold power of the fiber source for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, **A27**(9): 790-794.  
延凤平, 单英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺中光纤光源的阈值光功率研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9): 790-794.
- [3] GE Chuan-wen, ZHANG Wei-jun, GAO Xiao-ming. Illustrated description of narrow-band and broad-band stimulated Brillouin scattering process[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(8): 701-704.  
葛传文, 张为俊, 高晓明. 窄线宽与宽线宽受激布里渊散射过程的图示化描述[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 701-704.
- [4] WANG Chun-can, ZHANG Fan, JIAN Shui-sheng, *et al.* Study of stimulated Brillouin scattering effect in high-power single-frequency fiber amplifiers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(12): 1630-1635.  
王春灿, 张帆, 简水生, 等. 单频大功率光纤放大器中抑制受激布里渊散射的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1630-1635.
- [5] HILDEBRANDT M, BÜSCHE S, WESSELS P, *et al.* Brillouin scattering spectra in high-power single-frequency ytterbium doped fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(20): 15970-15979.
- [6] LIU An-ping. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(3): 977-984.
- [7] LIU Shun-hong, ZHOU Long-zao, WAN Peng-teng. Investigation on laser induced thermal stress bending[J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(3): 189-191.
- [8] ZOU Shi-kun, WANG Jian, WANG Hua-ming, *et al.* Fatigue growth rate of laser shock processed metal sheet[J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(3): 189-191.

## Thermal Effect Analysis for the Yb<sup>3+</sup>-doped Fiber Amplifier

YANG Chun-bo, LENG Jin-yong, LU Qi-sheng

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to study Stimulated Brillouin Scattering (SBS) in Yb<sup>3+</sup>-doped double clad single-frequency fiber amplifier, thermal effects of the fiber amplifier were analyzed theoretically, based on the rate equations and heat transfer equations. The impacts of the fiber temperature, which can broaden the SBS gain profile and suppress SBS, on the amplifier performances were discussed. The relationships between the SBS and pump power, signal power, heat transfer coefficient were simulated. The results of simulation provide theoretical guide to optimum design of high power single-frequency fiber amplifier.

**Key words:** Fiber amplifier; Temperature; Stimulated Brillouin Scattering(SBS); Heat transfer coefficient