

梯度掺杂增益光纤 SBS 效应抑制的理论研究

周子超 王小林* 粟荣涛 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 受激布里渊散射(SBS)效应是限制连续单频光纤激光最大输出功率的主要因素。为抑制增益光纤的SBS效应,通过改变增益光纤的掺杂浓度提出了一种展宽增益光纤的布里渊增益谱,降低布里渊增益系数,从而提高激光输出功率的方法。基于速率方程、热传导和布里渊增益谱计算模型,在增益光纤最高温度基本相同的情况下,对传统恒定掺杂和梯度掺杂方式下增益光纤中的热分布、激光器的输出功率和布里渊增益谱进行了数值模拟。结果表明:相比传统恒定掺杂光纤,设计的梯度掺杂增益光纤将布里渊增益谱展宽了1.2倍,布里渊增益系数降低了41%,SBS阈值功率提高了1.7倍,有效抑制了光纤的SBS效应;降低了增益光纤的熔点温度,提高了光纤激光器的稳定性。

关键词 光纤光学; 梯度掺杂; 受激布里渊散射; 温度分布

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi:10.3788/LOP53.070604

Theoretical Study on SBS Effect Suppression of Gradient Doping Gain Fibers

Zhou Zichao Wang Xiaolin Su Rongtao Zhang Hanwei Zhou Pu Xu Xiaojun

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense

Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Stimulated Brillouin scattering (SBS) effect is the main factor limiting the maximum output power of the continuous single frequency fiber laser. In order to suppress SBS effect in the gain fiber, a method is proposed which can broaden Brillouin gain spectrum, reduce Brillouin gain coefficient of the gain fiber, and thus improve the output power of the fiber laser by changing the doping concentration of the gain fiber. Based on the rate equation, thermal conduction and Brillouin gain spectrum calculation models, the thermal distribution of the gain fiber, the output power of laser and Brillouin gain spectrum are simulated under the conditions of constant and gradient doping when the maximum temperatures of the gain fibers are basically the same. Results show that, compared with the conventional constant doping fibers, the designed gradient doping gain fiber can broaden Brillouin gain spectrum by 1.2 times, reduce Brillouin gain coefficient by 41% and increase the SBS threshold power by 1.7 times, which suppresses the optical SBS effect effectively. The fusion point temperature of the gain fiber is reduced, and the stability of the fiber laser is improved.

Key words fiber optics; gradient doping; stimulated Brillouin scattering; temperature distribution

OCIS codes 060.2280; 190.5890; 290.5830

1 引言

高功率单频光纤激光在相干合成、引力波探测、激光雷达与成像和非线性频率转换等领域有着广泛的应

收稿日期: 2016-03-09; 收到修改稿日期: 2016-03-24; 网络出版日期: 2016-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(61505260)

作者简介: 周子超(1992—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: zhouzichao@nudt.edu.cn

导师简介: 许晓军(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事气动光学、自适应光学和光纤/固体激光器相干合成等方面的研究。E-mail: xuxj@21cn.com

* 通信联系人。E-mail: chinawxllin@163.com

用前景^[1-6]。连续单频光纤激光器的最大输出功率主要受限于光纤中的受激布里渊散射(SBS)效应^[1,7]。传统抑制 SBS 效应的方法主要包括增大纤芯直径和缩短光纤长度^[8]等,为了获得良好的光束质量,增大纤芯直径的同时需要减小光纤的数值孔径,而应用传统的光纤制造工艺很难将光纤的数值孔径降到 0.04 以下。为了使抽运光能够在光纤中被充分吸收,缩短光纤长度的同时需要增大增益光纤稀土离子的掺杂浓度,掺杂浓度的提高会导致增益光纤中的热效应急剧增强,影响光纤激光器输出功率的进一步提高。将种子光进行相位和强度调制能够抑制光纤中的 SBS 效应^[9-10],但调制后的种子光频谱发生了明显的展宽,不利于单频激光的输出。光子晶体光纤^[11-12]能够使光纤的数值孔径降到 0.03 以下,但该类光纤对弯曲特别敏感,用此种光纤搭建的光纤激光器体积庞大、不易封装且易受环境的干扰。

本文设计了一种稀土离子掺杂浓度沿光纤纵向渐变的增益光纤来抑制 SBS 效应。根据速率方程和热传导理论,增益光纤中的热分布和光纤中的掺杂浓度、抽运光吸收系数、抽运光强度和制冷情况密切相关^[13]。梯度掺杂可以改变增益光纤中的温度分布,而 SBS 效应中斯托克斯光的频移量和光纤中的温度直接相关^[14]。增益光纤中的布里渊增益谱为不同位置处布里渊增益谱的叠加^[15],因此,选择合适的掺杂方式有望展宽增益光纤中的布里渊增益谱,降低增益光纤中的 SBS 效应。基于此,本文在传统恒定掺杂光纤的基础上,设计了一种稀土离子掺杂浓度沿光纤纵向梯度分布的增益光纤,在保持增益光纤最高温度基本相同的条件下,对恒定和梯度掺杂方式下增益光纤中的热分布、输出功率和布里渊增益谱进行了数值模拟,以期能够展宽增益光纤内部的布里渊增益谱,降低 SBS 效应,为高功率光纤激光器增益光纤的制作提供参考。需要指出的是,利用现有的激光加热基座法^[16-17](LHPG)、纳米粒子直接掺杂技术^[18-19](DND)等,有望实现纵向梯度掺杂渐变的增益光纤。

2 理论模型

2.1 速率方程理论模型

只考虑前向抽运、抽运光和信号光都为单个波长的情况下,光纤激光器的速率方程组可以简化为^[20-22]

$$\frac{dP_p^+(z)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{ap} N_0(z) - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z)] P_p^+(z) - \alpha_p P_p^+(z), \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{dz} = \Gamma_p [\sigma_{ap} N_0(z) - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z)] P_p^-(z) + \alpha_p P_p^-(z), \quad (2)$$

$$\frac{dP_s^+(z)}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{es} + \sigma_{as}) N_2(z) - \sigma_{as} N_0(z)] P_s^+(z) + 2\Gamma_s \sigma_{es} N_2(z) P_s^0 - \alpha_s P_s^+(z), \quad (3)$$

$$\frac{dP_s^-(z)}{dz} = -\Gamma_s [(\sigma_{es} + \sigma_{as}) N_2(z) - \sigma_{as} N_0(z)] P_s^-(z) - 2\Gamma_s \sigma_{es} N_2(z) P_s^0 - \alpha_s P_s^-(z), \quad (4)$$

$$\frac{N_2(z)}{N_0(z)} = \frac{\Gamma_p \sigma_{ap} [P_p^+(z) + P_p^-(z)] \lambda_p + \Gamma_s \sigma_{as} [P_s^+(z) + P_s^-(z)] \lambda_s}{\Gamma_p [P_p^+(z) + P_p^-(z)] (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \lambda_p + \frac{\hbar f c A_{\text{eff}}}{\tau} + \Gamma_s [P_s^+(z) + P_s^-(z)] (\sigma_{as} + \sigma_{es}) \lambda_s}, \quad (5)$$

式中 $N_0(z)$ 为总的掺杂离子浓度; N_2 为激发态掺杂离子浓度; λ_p 、 λ_s 分别为抽运光、信号光的波长; P_p^+ 、 P_p^- 分别为抽运光正、反向功率; P_s^+ 、 P_s^- 分别为信号光正、反向功率; σ_{ap} 、 σ_{ep} 分别为抽运光的吸收和发射截面; σ_{as} 、 σ_{es} 分别为信号光的吸收和发射截面; α_p 、 α_s 分别为抽运光、信号光的损耗系数; Γ_p 、 Γ_s 分别为抽运光和信号光的光场模式与掺杂离子区域的重叠因子; P_s^0 为放大自发辐射功率,可表示为

$$P_s^0 = \frac{\hbar c^2}{\lambda_s^3}, \quad (6)$$

其中 c 为光速, $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s; \hbar 为普朗克常数, $\hbar = 6.62606896 \times 10^{-34}$ J/s; A_{eff} 为有效模式面积,可表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy} = \frac{\left(\iint I(x, y) dx dy \right)^2}{\iint I^2(x, y) dx dy}. \quad (7)$$

温度对掺镱光纤中稀土离子吸收和发射截面的影响并不大^[23-24],因此本仿真中没有考虑温度对增益的影响。在进行 Matlab 仿真时,对上述微分方程组进行离散化,用差分法求解上述偏微分方程组,根据边界条件,代入初始条件,即可求得功率沿光纤位置的分布曲线,并求得光纤激光器的输出功率。

2.2 增益光纤温度分布理论模型

根据热传导方程和边界条件,双包层光纤纤芯的温度可表示为^[25]

$$T_0(0, z) = T_c(r_3, z) + \frac{Q(z)r_1^2}{2hr_3} + \frac{Q(z)r_1^2}{4\kappa_1} + \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right), \quad (8)$$

式中 h 为增益光纤的换热系数; r 为极坐标半径; κ_1 为纤芯导热系数; κ_2 为内包层导热系数; κ_3 为外包层导热系数; T_c 为环境制冷温度一般情况下,光纤内热源表达式可表示为^[26]

$$Q(r, z) = \left(\frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_s}\right) [\sigma_{ap} N_0(r, z) - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(r, z, t)] \frac{P_p(r, z)}{A_p} + \alpha_s(r) I_s(r, z), \quad (9)$$

式中 α_s 为信号光线性吸收系数, A_p 为包层面积; P_p 为抽运光功率; I_s 为信号光功率密度。将(9)式代入(8)式中,即可求得光纤中纤芯的温度分布。

2.3 增益光纤布里渊增益谱理论模型

在光纤中,有效的 SBS 增益谱为增益光纤不同位置处增益谱的积分^[27]

$$G(\nu) = \int_0^L g_B(\nu, z) dz = g_0 \int_0^L \frac{1}{1 + \left\{ \left[\nu - \nu_B\left(\frac{z}{L}\right) \right] / \left(\frac{\Delta\nu_B}{2} \right) \right\}^2} dz, \quad (10)$$

在 $\nu = \nu_B$ 处,布里渊增益峰值为

$$g_0 = g_B(\nu_B) = \frac{8\pi^2 \gamma_e^2 T_B}{n_p \lambda^2 \rho_0 c v_A}, \quad (11)$$

式中 γ_e 为石英的电致伸缩常数, ρ_0 为石英的密度, v_A 为声速, T_B 为声子寿命, n_p 为介质折射率, $g_B(\nu, z)$ 为在位置 z 、频率 ν 处的 SBS 增益, $\nu_B\left(\frac{z}{L}\right)$ 为 z 处的布里渊频移, $\Delta\nu_B$ 为布里渊增益带宽, L 为光纤长度。布里渊频移与温度的对应关系为

$$\nu_B = \nu_0 + C_T T_0, \quad (12)$$

其中 T_0 为纤芯中心温度, C_T 为光谱温度系数,

$$\nu_0 = 2n_p v_A / \lambda_s. \quad (13)$$

根据(11)、(13)式,通过改变光纤长度位置 z 处的温度,就能改变光纤中的布里渊增益谱。

若布里渊增益谱为洛伦兹线型,则光纤中的 SBS 阈值功率可以进行估算,即

$$P_{th} = \frac{21A_{eff}}{g_B(\nu)L_{eff}}, \quad (14)$$

式中 $g_B(\nu)$ 为布里渊增益峰值, L_{eff} 为光纤的有效长度, P_{th} 为 SBS 的阈值功率。通过(14)式,可以对增益光纤中的 SBS 阈值进行估算。

3 恒定掺杂和梯度掺杂下布里渊增益谱的数值仿真

详细分析了恒定掺杂方式和梯度掺杂方式下光纤激光器输出功率、增益光纤中的温度分布以及布里渊增益谱。仿真分析了恒定掺杂方式下的输出功率、温度分布以及布里渊增益谱,恒定掺杂是传统增益光纤中镱离子的掺杂方式,传统掺镱光纤对 976 nm 抽运光吸收系数的典型值为 1.26 dB/m,其对应的镱离子掺杂浓度为 $7.0334 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$,故将此值作为恒定掺杂方式下镱离子的掺杂浓度。仿真分析了梯度掺杂方式下的输出功率、温度分布以及布里渊增益谱。梯度掺杂的方式有多种,为了有效展宽增益光纤中的布里渊增益谱,降低布里渊增益系数,实现对 SBS 效应的抑制,通过对梯度掺杂的方式进行优化,选择了一种余弦掺杂与指数掺杂相结合的掺杂方式。

仿真中参数如下:光纤放大器采用前向抽运方式,增益光纤长度 $L = 15 \text{ m}$,环境温度 $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$,掺杂光纤的纤芯直径 D_c 和包层直径 D 分别为 $20 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $400 \text{ }\mu\text{m}$ (通常记为 $20/400 \text{ }\mu\text{m}$),光谱温度系数 C_T 为

2 MHz/°C, 信号光功率 $P_s = 1$ W, 抽运光波长 $\lambda_p = 976$ nm, 信号光的波长 $\lambda_s = 1064$ nm, 石英的电致伸缩常数 $\gamma_e = 0.902$, 声速 $v_A = 5960$ m/s, 数值孔径 $NA = 0.06$, 石英的密度 $\rho_0 = 2210$ kg/m³, 声子寿命 $\tau_B = 5$ ns, 介质折射率 $n_p = 1.46$; 在自然对流情况下^[28], 增益光纤的换热系数 $h = 10$ W/(m² · K); 普通增益光纤涂覆层长时间稳定的许可温度为 80 °C, 本仿真中增益光纤的换热系数较小, 为了实现激光器长时间的稳定工作, 仿真时使增益光纤的中心温度不超过 80 °C, 因此选择恒定掺杂时的抽运功率 $P_p = 30$ W, 梯度掺杂时的抽运功率 $P_p = 50$ W。

3.1 恒定掺杂光纤仿真结果

仿真了传统恒定掺杂光纤内部抽运光、信号光的功率分布、温度分布和布里渊增益谱。以商用纤芯直径和包层直径分别为 20 μ m 和 400 μ m 的非保偏掺杂光纤为例, 其掺杂浓度大致为

$$y = 7.0334 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}, 0 < z < 15 \text{ m}. \quad (15)$$

传统恒定掺杂光纤中, 镱离子掺杂浓度沿光纤纵向分布、信号光与抽运光功率随位置的变化、增益光纤温度分布和布里渊增益谱的仿真结果如图 1 所示。图 1(a) 为镱离子掺杂浓度沿光纤的纵向分布图, 表明镱离子掺杂浓度沿光纤纵向不变。图 1(b) 为光纤中信号光、抽运光功率沿增益光纤位置的变化图, 结果表明: 由于增益光纤中镱离子的掺杂浓度不变, 信号光的功率沿光纤纵向不断提高, 增长的速率不断减小, 最终输出信号光的功率为 24.3 W, 抽运效率为 0.8。图 1(c) 为增益光纤中心温度随位置的变化图, 结果表明: 增益光纤中的温度沿纵向不断降低, 最高温度点在 $z = 0$ 处, 此处光纤中心温度为 79 °C。在实验中, 位置 $z = 0$ 处实际上为增益光纤与信号光输入光纤的熔接点, 由于熔接损耗的存在, 最高温度的熔接点一般是整个激光器系统中最为脆弱的位置。实验中往往是熔点的温度特性限制了激光器的最高输出功率。图 1(d) 为恒定掺杂时激光器内的布里渊增益谱分布图, 结果表明: 其中心布里渊频移为 16.186 GHz, 布里渊增益谱的半峰全宽为 51 MHz, 布里渊增益谱的最大增益系数为 4.6132×10^{-10} m²/W, SBS 的阈值功率为 20 W。

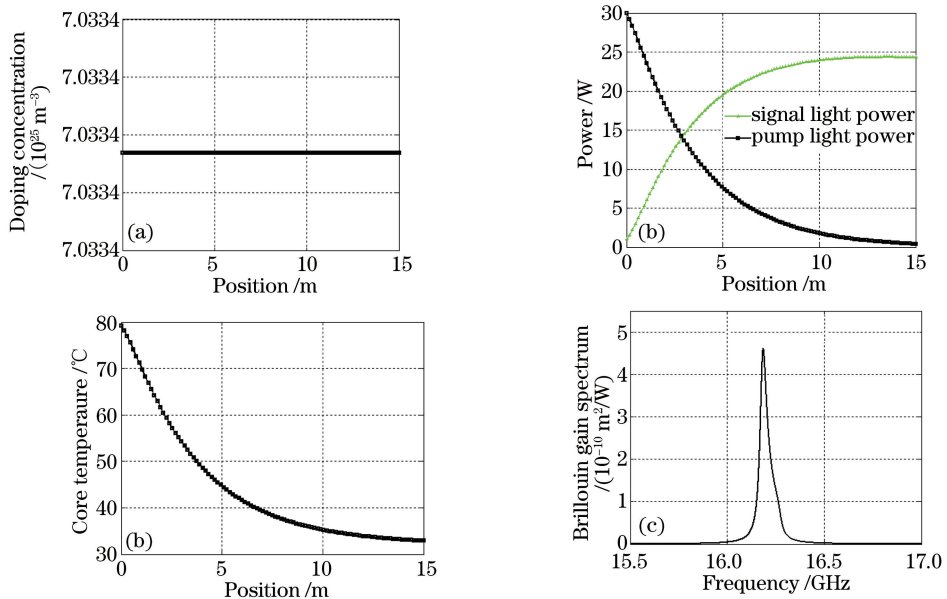


图 1 恒定掺杂时 (a) 镱离子掺杂浓度沿纵向分布图、(b) 信号光、抽运光功率随位置变化图、(c) 增益光纤中心温度沿纵向分布图和 (d) 布里渊增益谱分布图

Fig. 1 (a) Longitudinal distribution of ytterbium ion doping concentration, (b) signal and pump laser powers versus position, (c) longitudinal distribution of gain fiber core temperature and (d) distribution of Brillouin gain spectrum in the case of constant doping

3.2 梯度掺杂光纤仿真结果

为了实现增益光纤中布里渊增益谱的有效展宽, 降低其最大增益系数, 从而抑制增益光纤的 SBS 效应, 设计并仿真了梯度掺杂增益光纤内部抽运光、信号光的功率分布、温度分布和布里渊增益谱。梯度掺杂方式有多种, 研究发现增益光纤的周期性温度分布有利于光纤布里渊增益谱的展宽。为了实现增益光纤的周期

性温度分布,采用稀土离子掺杂浓度为指数和余弦分布相结合的方式仿真分析,稀土离子掺杂浓度沿光纤纵向分布为

$$y = N_0 \left[\cos\left(8\pi \frac{z}{L}\right) + 1 \right] \left(100 \frac{z-L}{L} + 0.1\right), 0 < z < 15 \text{ m}, \quad (16)$$

式中 $N_0 = 2.11 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, N_0 为常数; z 为沿光纤纵向的位置, $L = 15 \text{ m}$ 。在该梯度掺杂的情况下,镱离子掺杂浓度随增益光纤位置的变化曲线如图 2(a)所示;图 2(b)~(d)分别为信号光与抽运光功率随位置的变化、增益光纤温度分布和布里渊增益谱的仿真结果图。其中图 2(b)表明:由于增益光纤中镱离子的掺杂浓度沿光纤纵向周期性分布,信号光的功率沿光纤纵向呈现周期性增长的趋势,最终输出信号光的功率为 40.5 W,抽运效率为 0.81。图 2(c)表明:增益光纤中的温度沿光纤纵向周期性分布,其熔接点处($z=0$)光纤中心温度为 25.3 °C,在 $z=1.95 \text{ m}$ 处增益光纤中心的温度为 79 °C,此时温度达到最高。图 2(d)表明:其中心布里渊频移为 16.221 GHz,布里渊增益谱的半峰全宽为 114 MHz,布里渊增益谱的最大增益系数为 $2.7183 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{W}$,SBS 的阈值功率为 34 W。和传统恒定掺杂光纤相比,该梯度掺杂布里渊增益谱的半峰全宽展宽为恒定掺杂时的 2.2 倍,布里渊增益谱的最大增益系数降低了 41%,SBS 的阈值提高了 1.7 倍,有效抑制了其内部 SBS 效应的产生。

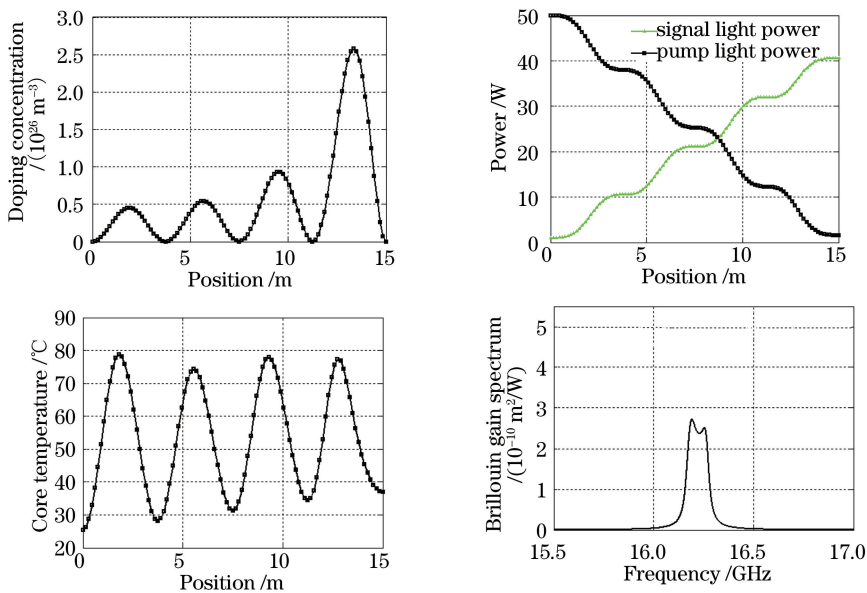


图 2 梯度掺杂时(a)镱离子掺杂浓度沿纵向分布图、(b)信号光、抽运光功率随位置变化图、(c)增益光纤中心温度沿纵向分布图和(d)布里渊增益谱分布图

Fig. 2 (a) Longitudinal distribution of ytterbium ion doping concentration, (b) signal and pump laser powers versus position, (c) longitudinal distribution of gain fiber core temperature and (d) distribution of Brillouin gain spectrum in the case of gradient doping

4 分析与讨论

数值计算表明:通过改变增益光纤中掺杂浓度的分布,在保持增益光纤最高温度基本不变的情况下,可以展宽增益光纤中的布里渊增益谱,提高光纤中的 SBS 阈值,降低增益光纤中的 SBS 效应。同时,可以降低光纤中的熔点温度,提高光纤激光器的稳定性,有利于光纤激光器功率的进一步提升。梯度掺杂和恒定掺杂方式下光纤的温度、输出功率、布里渊增益谱的最大增益系数和 SBS 阈值如表 1 所示。由表 1 可知,和传统的恒定掺杂光纤相比,设计的梯度掺杂分布使增益光纤熔点处的温度由 79 °C 降低到 25.3 °C,熔点温度大大降低,提高了熔点和光纤激光器的稳定性;布里渊增益谱的最大增益系数由 $4.6132 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{W}$ 降低到 $2.7183 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{W}$,降低了 41%;增益光纤中的 SBS 阈值功率由 20 W 提高到 34 W,提高了 1.7 倍,有效抑制了光纤中的 SBS 效应。因此,在增益光纤最高温度基本相同的情况下,设计合适的增益光纤掺杂浓度

分布可以优化光纤中的温度分布,抑制光纤中的 SBS 效应,同时可以降低光纤中的熔点温度,是提高光纤激光器输出功率切实可行的办法。

表 1 增益光纤恒定掺杂与梯度掺杂下的仿真结果对比

Table 1 Comparison of simulation results of gain fibers with constant doping and gradient doping

Doping method	Output power /W	Maximum temperature / $^{\circ}\text{C}$	Fusion point temperature / $^{\circ}\text{C}$	Maximum gain coefficient /($10^{-10} \text{ m}^2/\text{W}$)	SBS threshold /W
Constant doping	24.3	79	79	4.6132	20
Gradient doping	40.5	79	25.3	2.7183	34

5 结 论

SBS 效应是限制高功率连续单频光纤激光功率提升的主要因素。提出了通过对增益光纤的梯度掺杂优化高功率激光器增益光纤中的温度分布,从而展宽增益光纤的布里渊增益谱、抑制光纤激光器的 SBS 效应,提高单频光纤激光器输出功率的方法。设计了一种合适的梯度掺杂增益光纤,详细研究了该梯度掺杂方式与传统恒定掺杂方式下光纤激光器的输出功率、温度分布、布里渊增益谱及 SBS 阈值功率。研究发现:在增益光纤最高温度基本相同的前提下设计合适的增益光纤掺杂浓度分布,可以使增益光纤中的温度呈周期性分布,展宽激光器中的布里渊增益谱,降低其最大增益系数,提高 SBS 的阈值功率,抑制 SBS 效应的产生;梯度掺杂还可以降低光纤的熔点温度、提高光纤熔接点与激光器的稳定性,是提高光纤激光器输出功率切实可行的办法。需要指出的是,利用现有的 DND、LHPG 等方法有望实现增益光纤内部的梯度掺杂。该研究结果可以为高功率光纤激光器中增益光纤的设计提供一定的参考。

参 考 文 献

- Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 546-551.
- Liem A, Limpert J, Zellmer H, *et al.*. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier [J]. Optics Letters, 2003, 28(17): 1537-1539.
- Shi W, Fang Q, Zhu X, *et al.*. Fiber lasers and their applications[J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6554-6568.
- Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, *et al.*. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power[J]. Optics Letters, 2005, 30(5): 459-461.
- Jeong Y, Sahu J K, Soh D B S, *et al.*. High-power tunable single-frequency single-mode erbium: Ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source[J]. Optics Letters, 2005, 30(22): 2997-2999.
- Pulford B, Ehrenreich T, Holten R, *et al.*. 400-W near diffraction-limited single-frequency all-solid photonic bandgap fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2015, 40(10): 2297-2300.
- Kovalev V I, Harrison R G. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high-power single-frequency fiber amplifiers [J]. Optics Letters, 2006, 31(2): 161-163.
- Wang X L, Zhou P, Xiao H, *et al.*. 310 W single-frequency all-fiber laser in master oscillator power amplification configuration[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(8): 591-595.
- Ran Yang, Wang Xiaolin, Lü Haibin, *et al.*. Novel suppression method study for stimulated Brillouin scattering by simultaneous phase and intensity modulation in fiber amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805003.
冉 阳, 王小林, 吕海斌, 等. 种子相位和强度同时调制抑制光纤激光放大器 SBS 的新方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805003.
- Ran Yang, Wang Xiaolin, Su Rongtao, *et al.*. Research progress of stimulated Brillouin scattering suppression in narrow linewidth fiber amplifiers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 040003.
冉 阳, 王小林, 粟荣涛, 等. 窄线宽光纤放大器中受激布里渊散射抑制研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040003.
- Stiller B, Min W L, Delqué M, *et al.*. Suppression of SBS in a photonic crystal fiber with periodically-varied core diameter[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011: OMO5.

- 12 Poletti F, Furusawa K, Yusoff Z, *et al.*. Nonlinear tapered holey fibers with high stimulated Brillouin scattering threshold and controlled dispersion[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(9): 2185-2194.
- 13 Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Theoretical study of thermal effect in Yb-doped double-clad high power fiber laser [J]. *Journal of Lasers*, 2007, 31(5): 544-547.
陈子伦, 侯静, 姜宗福. 高功率掺镱双包层光纤激光器热效应理论研究[J]. *激光技术*, 2007, 31(5): 544-547.
- 14 Lei Z, Shuzhen C, Chi L, *et al.*. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5456-5462.
- 15 Liu A. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient[J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 977-984.
- 16 Laversenne L, Goutaudier C, Guyot Y, *et al.*. Growth of rare earth (RE) doped concentration gradient crystal fibers and analysis of dynamical processes of laser resonant transitions in RE-doped Y_2O_3 (RE=Yb³⁺, Er³⁺, Ho³⁺) [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2002, 341(s1-s2): 214-219.
- 17 Boulon G, Laversenne L, Goutaudier C, *et al.*. Radiative and non-radiative energy transfers in Yb³⁺-doped sesquioxide and garnet laser crystals from a combinatorial approach based on gradient concentration fibers [J]. *Journal of Luminescence*, 2003, 102-103: 417-425.
- 18 Tammela S, Söderlund M, Koponen J, *et al.*. The potential of direct nanoparticle deposition for the next generation of optical fibers[C]. *SPIE*, 2006, 6116: 61160G.
- 19 Liao Suying, Gong Mali. New development of nonlinearity management in high power fiber lasers and amplifiers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(6): 27-33.
廖素英, 巩马理. 高功率光纤激光器和放大器的非线性效应管理新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(6): 27-33.
- 20 Kelson I, Hardy A. Strongly pumped fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(9): 1570-1577.
- 21 Kelson I, Hardy A. Optimization of strongly pumped fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 891-897.
- 22 Wang Xiaolin, Tao Rumao, Zhang Hanwei, *et al.*. 1 kilowatt single-end pumped all-fiber laser oscillator with good beam quality and high stability[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105001.
王小林, 陶汝茂, 张汉伟, 等. 1 kW 单端抽运、高光束质量、高稳定性全光纤激光振荡器[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105001.
- 23 Vazquez-Zuniga L A, Chung S, Jeong Y. Thermal characteristics of an ytterbium-doped fiber amplifier operating at 1060 and 1080 nm [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(2): 22502-22505.
- 24 Xu Hongjie, Du Saihui. Temperature dependence of absorption and emission cross sections in erbium-doped fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 100601.
徐宏杰, 杜赛辉. 掺铒光纤吸收截面和发射截面温度特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 100601.
- 25 Brown D C, Hoffman H J. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(2): 207-217.
- 26 Smith A V, Smith J J. Steady-periodic method for modeling mode instability in fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2606-2623.
- 27 Hansryd J, Dross F, Westlund M, *et al.*. Increase of the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(11): 1691-1697.
- 28 Chen Zilun. The study of mutual injection locking method in fiber lasers and post-processing techniques of the PCFs [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
陈子伦. 光纤激光器的相互注入锁定和光子晶体光纤的后处理技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.