

高功率掺铥光纤放大器中受激布里渊散射效应研究

张 美^{1,2} 延凤平^{1,2} 刘 硕^{1,2} 尹 智^{1,2}

¹北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044

²北京交通大学光波技术研究所,北京 100044

摘要 近年来随着对单频光纤激光器和放大器研究的不断深入,得到了越来越高的输出功率,由于单频光纤激光器、放大器的输出功率在很大程度上受限于受激布里渊散射(SBS)效应,故需要研究SBS效应的影响因素和抑制方法。利用铥离子(Tm^{3+})的速率方程和SBS效应下双包层光纤放大器的速率方程,建立了单频光纤放大器的理论模型,计算得到了掺铥光纤放大器的能量分布和输出功率,并讨论了光纤长度、抽运功率、 Tm^{3+} 掺杂浓度、增益光纤内温度分布等因素对单频光纤放大器中SBS效应和输出功率的影响,总结了在提高放大器输出功率的同时有效抑制SBS效应的方法。自行搭建了全光纤掺铥光纤种子光源及放大器,高稳定性的全光纤掺铥激光种子光的中心波长为1941 nm,信噪比约为60 dB。当掺铥放大器的抽运功率达到2.15 W时,激光的输出功率可以达到0.766 W。

关键词 激光器;掺铥光纤激光器;掺铥光纤放大器;受激布里渊散射;石英基

中图分类号 TN722

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0405009

Research of Stimulated Brillouin Scattering Effect in High-Power Tm^{3+} -Doped Fiber Amplifiers

Zhang Mei^{1,2} Yan Fengping^{1,2} Liu Shuo^{1,2} Yin Zhi^{1,2}

¹Provincial Key Laboratory of All-Optical Networks and Modern Communication Network, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract With the development of study on single-frequency fiber laser and amplifier, higher output power can be received. Because stimulated Brillouin scattering (SBS) effect has a great constrain on output power of single-frequency fiber laser and amplifier, so the study of influence factor and suppression method of SBS is necessary. Based on the rate equations of thulium (Tm^{3+}) ions and double-cladding fiber amplifier with SBS, a theoretical model of the single-frequency fiber amplifier is created, and the energy distribution and output power of the Tm^{3+} -doped fiber amplifiers are calculated. Then the effects of fiber length, pump power, Tm^{3+} doped concentration on output power and SBS effect of the single-frequency fiber amplifiers are discussed. Finally, it can be concluded that how to improve the output power of the fiber amplifiers and effectively suppress the SBS effect at the same time. A all-fiber Tm^{3+} -doped fiber amplifier is presented. The center wavelength of the Tm^{3+} -doped fiber laser is 1941 nm. The signal to noise ratio is 60 dB. When the pump power of the Tm^{3+} -doped fiber amplifier is 2.15 W, the maximum output power is 0.766 W.

Key words lasers; thulium-doped fiber laser; thulium-doped fiber amplifier; stimulated Brillouin scattering; silica
OCIS codes 060.3510; 060.2320; 290.5900

1 引 言

高功率单频2 μm 波段的激光不仅在光谱学、气体感应、激光雷达、材料加工等方面有着广泛的应用和巨

收稿日期: 2014-11-19; 收到修改稿日期: 2014-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(61327006, 61275091)

作者简介: 张 美(1986—),女,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: 12120183@bjtu.edu.cn

导师简介: 延凤平(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn(通信联系人)

大的潜能,还因为其具有更高的光束质量,可用于相干合成^[1]。实现高功率激光输出的一个很好的方法是使用主振荡功率放大器(MOPA)^[2],光纤放大器凭借其更高的效率和更大的输出功率等优势逐渐渗透到各个领域。在高功率单频光纤放大器中,由于纤芯截面积小,传输功率高,很容易引起非线性效应,特别是受激布里渊散射(SBS)效应^[3],SBS效应将放大器中的部分信号光转换为斯托克斯(Stokes)光,从而影响了放大器的效率。SBS效应是目前影响单频光纤放大器输出功率的主要因素^[4]。

近年来对于2 μm波段激光的研究有不断的突破,不但采用Tm, Ho: YAlO₃晶体可以实现多种2 μm波段激光的连续及脉冲输出^[5],对于提高输出功率也有新的研究,2014年,石俊凯等^[6]采用全保偏双包层掺镱大模场面积光子晶体光纤(LMAPCF)的单级飞秒激光直接放大系统,运用非线性放大技术,获得平均功率为34 W的高功率飞秒脉冲。随着激光功率的不断提升,对影响输出功率的非线性效应研究也取得了很大进展。2011年,冷进勇^[3]研究了单频和多单频光纤放大器中的SBS效应,从理论和实验两个方面,分析了抑制SBS效应的方法,提出了采用在增益光纤上实施外界温控措施的方法可以有效抑制SBS效应。2014年林青等^[7]提出了半导体光放大器(SOA)中,非线性效应会受到群速度色散的影响,并得到了SOA中群速度色散与增益之间的关系,提出一种通过测量增益谱,得到群速度色散的简单易行的实验方法。以上都有助于光纤放大器的研究。

由于掺铒或掺镱光纤放大器发展比较成熟,对单频掺铒或掺镱光纤放大器中SBS效应有详细的理论分析和数值模拟^[8-9]。掺铒光纤放大器仍处于发展阶段,对单频掺铒放大器里面所涉及到的非线性效应还没有详细的分析。本文通过对单频掺铒光纤放大器中SBS效应的理论分析和数值模拟,总结出抑制SBS效应、提高输出功率的方法。实验尝试制作了一种全光纤的掺铒放大器。

2 掺铒光纤放大器的理论模型

图1为掺铒光纤中Tm³⁺的能级结构,Tm³⁺为四能级结构,各能级用*i*表示,*i*取值为0、1、2、3,分别对应³H₆能级、³H₄能级、³H₅能级和³F₄能级,*N*₀、*N*₁、*N*₂、*N*₃分别代表各能级的离子数浓度^[10]。

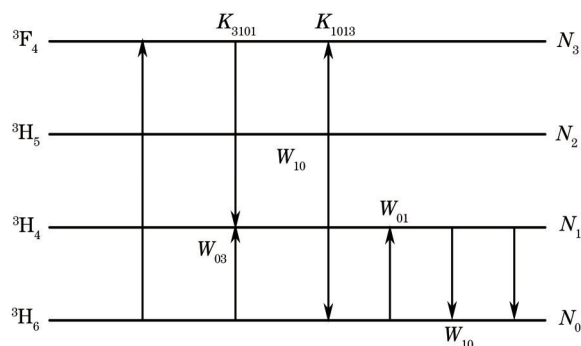


图1 Tm³⁺的能级结构

Fig.1 Energy levels of Tm³⁺ ion

根据Tm³⁺的能级结构,考虑³H₆到³H₄的交叉弛豫情况,描述掺铒双包层光纤放大器的速率方程组^[11]为

$$\frac{dN_0}{dt} = -(W_{01} + W_{03})N_0 + \frac{N_1}{\tau_1} + W_{10}N_1 + \frac{N_3}{\tau_3} - R_1, \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = W_{01}N_0 - \left(\frac{1}{\tau_1} + W_{10} \right) N_1 + 2R_1 + \beta_{31} \frac{N_3}{\tau_3}, \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{03}N_0 - \frac{1}{\tau_3} N_3 - R_1 \quad (3)$$

$$N = N_0 + N_1 + N_3, \quad (4)$$

式中 τ_i 为能级 *i* 的寿命; *N*₀、*N*₁、*N*₃ 分别代表 Tm³⁺ 各能级的离子数浓度,由于能级 2 的寿命极短,故在公式中忽略^[12], *N* 为总的离子数浓度,*R*₁ 为交叉弛豫因子,*W*₀₃、*W*₁₀、*W*₀₁ 分别为基态抽运吸收系数、激光受激发射系数和激光受激吸收系数,它们可表示为^[11]

$$R_1 = k_{3101} N_3 N_0 - k_{1013} N_1^2, \quad (5)$$

$$\begin{cases} W_{03} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA_{\text{eff}}} \sigma_{\alpha}(\lambda_p) [P_f(z) + P_r(z)] \\ W_{10} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA_{\text{eff}}} \sigma_c(\lambda_s) S_f(z) \\ W_{01} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA_{\text{eff}}} \sigma_{\alpha}(\lambda_s) S_f(z) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 k_{ijkl} 表示能级 i 到能级 j 和能级 k 到能级 l 的能量转移过程。 $\sigma_c(\lambda_p)$ 、 $\sigma_{\alpha}(\lambda_p)$ 、 $\sigma_c(\lambda_s)$ 、 $\sigma_{\alpha}(\lambda_s)$ 分别为抽运光的发射和吸收截面、激光的发射和吸收截面， λ_p 、 λ_s 分别为抽运光和信号光的波长， Γ_p 、 Γ_s 为抽运光和信号光的重叠因子， h 为普朗克常量， c 为光速， A_{eff} 为有效纤芯面积； S_f 为信号光功率， $P_f(z)$ 、 $P_r(z)$ 为考虑布里渊光线宽情况下的前、后向抽运光功率，可分别表示为^[3,10]

$$\begin{cases} \frac{dP_f}{dz} = \Gamma_p [\sigma_c(\lambda_p) N_1 - \sigma_{\alpha}(\lambda_p) N_0] P_f - \alpha_p P_f \\ \frac{dP_r}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_c(\lambda_p) N_1 - \sigma_{\alpha}(\lambda_p) N_0] P_r + \alpha_p P_r \\ \frac{dS_f}{dz} = \Gamma_s [\sigma_c(\lambda_s) N_1 - \sigma_{\alpha}(\lambda_s) N_0] S_f - \alpha_s S_f - \frac{S_f}{A_{\text{eff}}} \sum_i g_{\text{sbsi}} P_{\text{sbsi}} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 α_p 、 α_s 分别对应抽运光和激光的损耗系数， P_{sbsi} 、 g_{sbsi} 分别为布里渊散射频率 ν_{sbsi} 处的 Stokes 光功率和 SBS 增益系数，可表示为^[3]

$$\frac{dP_{\text{sbsi}}}{dz} = -\Gamma_s [\sigma_c(\lambda_s) N_1 - \sigma_{\alpha}(\lambda_s) N_0] S_f + \alpha_s S_f - \frac{g_{\text{sbsi}}}{A_{\text{eff}}} P_{\text{sbsi}} S_f, \quad (8)$$

$$g_{\text{sbsi}} = g_0 \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{[\nu_{\text{sbsi}} - (\nu_0 + \Delta\nu_0)]^2 + (\Delta\nu_B/2)^2}, \quad (9)$$

式中 g_0 为布里渊散射峰值增益， $\Delta\nu_B$ 为 SBS 线宽，取值为 58 MHz， ν_0 为后向布里渊频移， $\Delta\nu_0$ 为布里渊中心频移的改变，可表示为^[3]

$$\Delta\nu_0 = C_T \Delta T, \quad (10)$$

式中 $\Delta\nu_0$ 与光纤内的温度分布 $\Delta T(z)$ 成正比，其中 C_T 为温度系数， $\Delta T(z)$ 可表示为^[3]

$$\Delta T(z) = \frac{\alpha\eta [P_f(z) + P_r(z)]}{4\kappa\pi} \left[1 + 2 \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{2\kappa}{Hb} \right], \quad (11)$$

式中 a 、 b 分别为光纤纤芯半径和内包层半径， α 为抽运光吸收系数， η 为抽运功率转化成热的比例， κ 为导热系数， H 为换热系数。

上述的窄线宽光纤放大器速率方程组的边界条件^[8]为

$$\begin{cases} S_f(0) = P_{s0} \\ P_f(0) = P_f \\ P_r(L) = P_r \\ P_{\text{sbsi}}(L) = P_n \end{cases}, \quad (12)$$

式中 $S_f(0)$ 、 $P_f(0)$ 、 $P_r(L)$ 、 $P_{\text{sbsi}}(L)$ 依次表示输入的信号光种子功率、正向抽运光功率、反向抽运光功率和 SBS 光功率， L 为光纤长度。其中 P_{s0} 为种子光功率， P_n 为自发布里渊散射功率， $P_n = h\nu_B \Delta\nu_{\text{sbsi}}$ ， $\Delta\nu_{\text{sbsi}}$ 为散射线宽， ν_B 为 Stokes 的频率。

在数值求解方面，结合了龙格-库塔法和牛顿法。Matlab 中 BVP4C 函数经常用于大功率光纤放大器的仿真中，其函数的优点是使用简单，不足之处是如果猜测值和真实值差距较大，会导致计算时间增长。如果采用牛顿迭代法，允许猜测值和真实值有一定范围的误差。采用两者结合的方法，改进了算法，有效地弥补了使用 BVP4C 函数带来的问题，缩短计算时间，提高了计算精度。

计算中用到的各参数取值^[3,10]如表 1 所示。

表1 数值模型中各参量的取值

Table 1 Values of the parameters used in the numerical modeling

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|--|-------|---|-------|
| $c/(10^8 \text{ m/s})$ | 3.0 | $a/\mu\text{m}$ | 2 |
| $N/(10^{25} \text{ m}^{-3})$ | 4.0 | $b/\mu\text{m}$ | 200 |
| L/m | 20 | $g_0/(10^{-11} \text{ m/W})$ | 4.0 |
| $h/(10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})$ | 6.63 | $k_{3101}/(10^{-23} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1})$ | 3 |
| $A_{\text{eff}}/(10^{-11} \text{ m}^2)$ | 1.39 | $k_{1013}/(10^{-24} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ | 2.4 |
| $\sigma_a(\lambda_p)/(10^{-25} \text{ m}^2)$ | 5.0 | α_p | 0.04 |
| $\sigma_a(\lambda_s)/(10^{-26} \text{ m}^2)$ | 1 | α_s | 0.04 |
| $\sigma_e(\lambda_s)/(10^{-25} \text{ m}^2)$ | 3.4 | $\kappa/[W/(m^2\cdot K)]$ | 1.38 |
| Γ_p | 0.89 | $H/[W/(m^2\cdot K)]$ | 30 |
| Γ_s | 0.75 | α/m^{-1} | 0.24 |
| $\tau_1/\mu\text{s}$ | 334.7 | η | 0.04 |
| $\tau_2/\mu\text{s}$ | 0.007 | $C_1/(\text{MHz/K})$ | 2 |
| $\tau_3/\mu\text{s}$ | 14.2 | λ_p/nm | 793 |
| v_B/GHz | 34.7 | λ_s/nm | 1943 |
| v_0/GHz | 16.3 | $\Delta v_B/\text{MHz}$ | 58 |

3 掺铋光纤放大器内SBS影响因素讨论

采用前向抽运方式,抽运功率为100 W,信号光种子功率为5 W,光纤长度 L 为20 m, Tm^{3+} 掺杂离子浓度 N 为 $4\times 10^{25} \text{ m}^{-3}$,抽运光、信号光、Stokes功率和纤芯内温度沿光纤的分布如图2所示。由图可知随着抽运光不断被吸收,前向激光功率值不断增加,到20 m时达到顶峰,此时 $Z=L$ 端,激光输出功率为23.59 W;Stokes光反向呈指数增长,在 $Z=0$ 端达到最大,约为0.8 W。

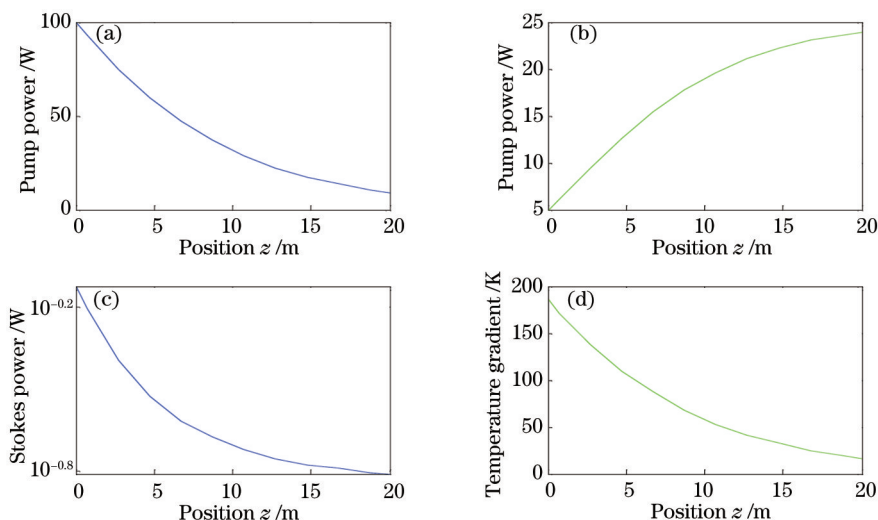


图2 光纤中(a)抽运光、(b)信号光、(c)Stokes功率、(d)纤芯温度沿光纤的分布

Fig.2 Distributions of (a) pump power, (b) signal power, (c)Stokes power and (d) temperature gradient along the fiber

3.1 抽运功率的影响

图3为信号光种子功率为5 W,光纤长度为20 m时放大器的输出功率和Stokes功率随抽运功率的变化趋势图。随着抽运功率的增长,放大器输出功率和Stokes功率都呈现上升趋势。虽然较高的抽运功率可获得更高的输出功率,但为防止过高的Stokes功率影响放大器性能,应避免采用过高的抽运功率。

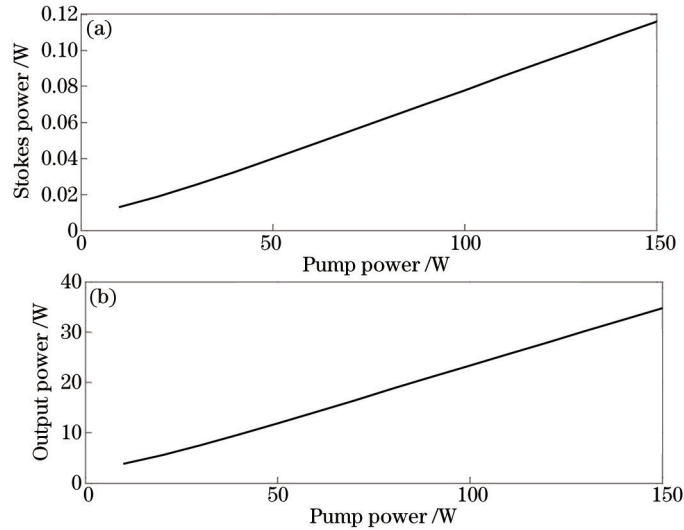


图3 (a)Stokes 功率和(b)放大器输出功率与抽运功率关系

Fig.3 Relationship between(a) Stokes power and (b) output power with pump power

3.2 光纤长度的影响

图4为抽运功率为100 W,信号光种子功率为5 W时放大器的输出功率和达到SBS阈值时放大器效率随光纤长度的变化,它们都呈现先上升后下降的趋势,所以就放大器输出功率和效率而言,光纤长度存在最佳值,约为27 m,此时放大器可获得约25 W的输出功率。根据放大器转换效率公式 $\eta = (P_{out} - P_{s0})/P_L$,可得此时放大器效率约为20%。其中 P_{s0} 为信号光种子功率, P_{out} 为放大器输出功率, P_L 为抽运光功率。

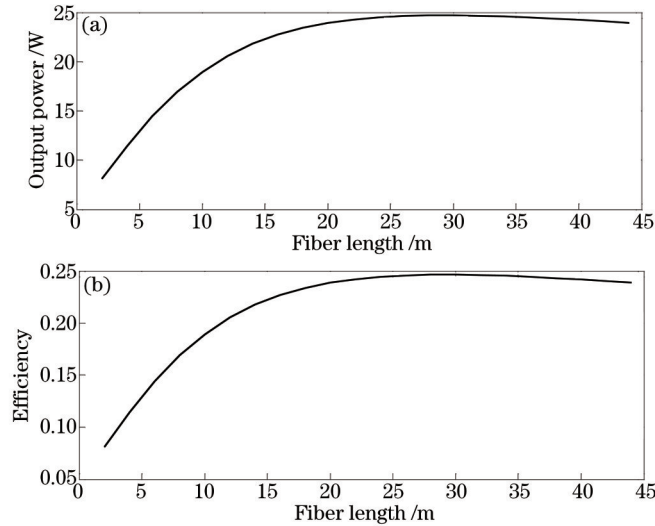


图4 (a)放大器输出功率和(b)达到SBS阈值时放大器效率与光纤长度关系

Fig.4 Relationship between fiber length with (a) output power and (b) efficiency of amplifier reaching SBS threshold

3.3 Tm^{3+} 离子浓度的影响

图5为不同 Tm^{3+} 掺杂浓度下,放大器的输出功率和达到SBS阈值时放大器效率随光纤长度的变化趋势。从图中可以看出, Tm^{3+} 掺杂浓度越大,放大器功率增长的越快,同时可以达到更大的最大输出功率,但是达到最大值后下降的也越快。这是因为, Tm^{3+} 浓度越大,抽运光吸收的越快,但是当浓度过大时就会导致 Tm^{3+} 形成团簇,增加了上能级的损耗,使输出功率达到峰值后下降的越快。

3.4 增益光纤自身温度分布的影响

由(11)式可知,增益光纤的换热系数 H 将直接影响光纤内的温度分布。图6为换热系数 H 分别为 $3 \times 10^{-3} W/(cm^2 \times K)$ 和 $1 \times 10^{-3} W/(cm^2 \times K)$ 时光纤内温度、Stokes 功率、信号输出功率沿光纤分布。如图所示,不同换热系数对光纤温度分布、Stokes 功率分布的影响主要体现在抽运光输入端,而在光纤末端影响较小。因为在

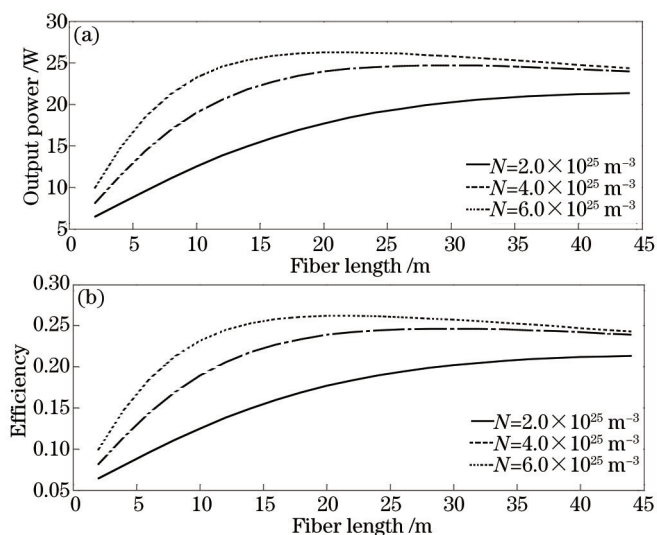


图5 不同离子浓度下(a)放大器输出功率和(b)达到SBS阈值时放大器效率与光纤长度关系

Fig.5 Under different Thulium doped concentrations, the relationship between fiber length with (a) output power and (b) efficiency of amplifier reaching SBS threshold

前向抽运放大器中,增益光纤末端为信号光的高功率区域,但此处由于换热系数不同带来的温度分布差异较小^[3]。由图可以看出,较小的换热系数可以降低 Stokes 功率,并有效抑制 SBS 效应。

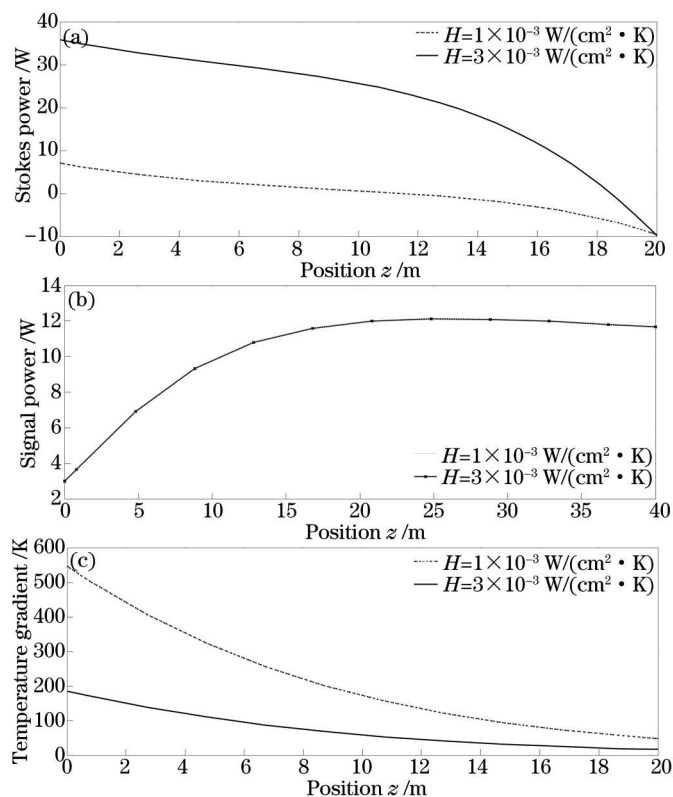


图6 换热系数对(a)Stokes功率、(b)信号光功率、(c)温度分布的影响

Fig.6 Effect of heat transfer coefficients on (a) Stokes power, (b) signal power, (c) temperature gradient

4 掺铥光纤放大器的实验研究

4.1 实验装置

图7为自行搭建的全光纤掺铥光纤种子光及放大器的实验装置图。放大器前端为自行搭建的全光纤环形腔激光器。掺铥光纤激光器的抽运源是最大输出功率为12 W的793 nm多模半导体激光器(LD),抽运光通

过(6+1)×1合束器(FC)进入到掺铥增益光纤,双包层掺铥增益光纤(Nufern)的长度为3 m,纤芯直径为10 μm,数值孔径为0.15,该双包层掺铥增益光纤在793 nm处抽运吸收效率为4.7 dB/m。环形器保持激光在激光腔中单向传输。偏振控制器(PC)用来调节激光腔里面的双折射,从而调节激光腔内的增益和激光波长的损耗,来获得稳定的激光输出。均匀光纤布拉格光栅(FBG)用作滤波器,激光从FBG的一段输出,经过隔离器进入到自制的掺铥光纤放大器中进行放大。图7中虚线框中为掺铥光纤放大器装置图。放大器采用正向抽运方式,抽运光通过(6+1)×1合束器耦合进5 m双包层掺铥增益光纤中,增益光纤后端熔入一段单模光纤进行抽运光剥离,输出端增加隔离器抑制端面反射对激光光束稳定性产生的影响。

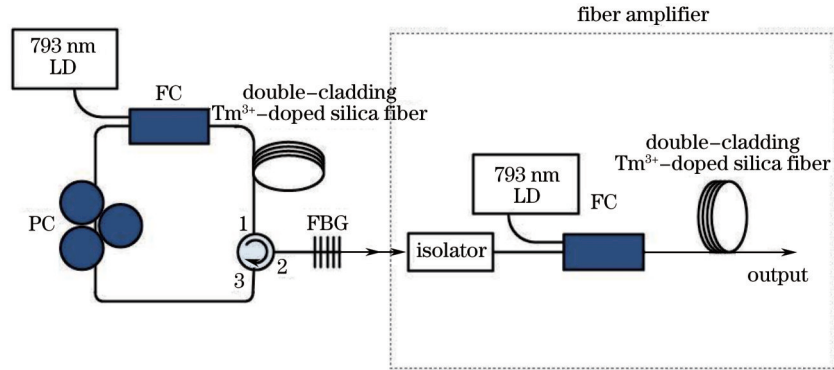


图7 双包层掺铥光纤放大器的实验装置图

Fig.7 Experimental setup of the proposed double-cladding Tm³⁺-doped fiber amplifier

4.2 实验结果

在实验中,973 nm 半导体激光器的抽运功率为2.20 W时,掺铥光纤激光器可以获得稳定的激光输出。图8为自行搭建的全光纤掺铥种子光的激光光谱图。图8采用分辨率为0.05 nm的光谱仪(YOKO-GAWA AQ6375, OSA)对激光的特性进行测量,激光的中心波长为1941 nm,对应所用光纤布拉格光栅滤波器的中心波长。搭建的掺铥光纤激光器所产生的激光具有较高的信噪比(SNR)约为60 dB。测试了所搭建的掺铥光纤激光器的稳定性,在50 min的测量时间中,每隔5 min对掺铥光纤激光器的光谱及激光功率进行记录,波长漂移量小于0.02 nm,激光峰值功率的变化小于1 dB。综上所述,自行搭建的全光纤掺铥光纤激光器具有高功率、高信噪比和高稳定性,适合用于做光纤放大器的种子光。

在放大实验中,固定掺铥光纤激光器抽运光的抽运功率为2.20 W,将所产生的激光通过隔离器接入到掺铥放大器中。掺铥光纤后端融接一段单模光纤进行抽运光的剥离,输出端增加隔离器抑制端面反射对激光光束稳定性产生的影响。图9为掺铥光纤放大器输出功率随抽运功率的变化。当抽运功率超过0.96 W之后,放大器的输出功率随抽运功率几乎呈现线性增加。如图9所示,当抽运功率增加到2.15 W时,激光的输出功率可以达到0.766 W。由于现阶段对放大器还处于的起步阶段,整套的水冷系统还在摸索阶段,出于保护实验设备的需要,没有继续增加抽运功率。

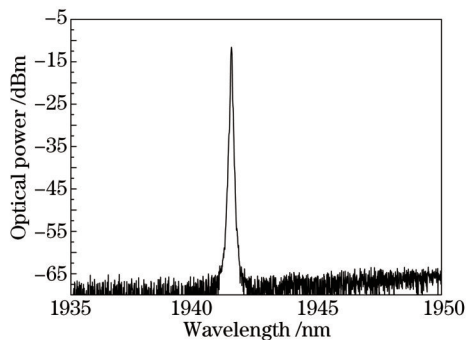


图8 全光纤掺铥光纤激光器种子光光谱

Fig.8 Spectrum of double-cladding Tm³⁺-doped fiber operation

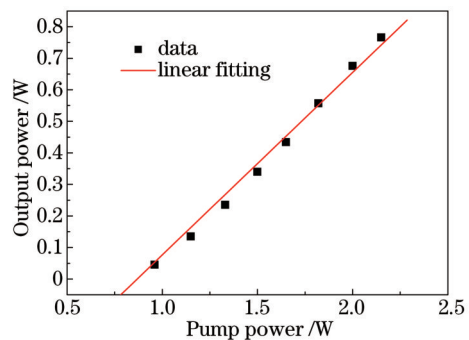


图9 输出功率随抽运功率的变化

Fig.9 Output power with the increase of pump power

5 结 论

采用数值方式分析了在前向抽运方式下,抽运功率、光纤长度、 Tm^{3+} 浓度、换热系数等参数对双包层单频光纤放大器性能的影响。分析表明,较高的抽运功率可获得较高的输出功率,但同时也提高了 Stokes 功率,所以可以在有限的范围内增加抽运功率。理论分析表明,采用 27 m 长度光纤获得 25 W 的放大器输出功率和 20% 放大器转换效率。增加 Tm^{3+} 掺杂浓度可以有效提高输出功率和放大器转换效率,但应考虑到过高的离子浓度带来的光纤损耗,可设置较小的换热系数来抑制 SBS 效应,但同时要采取冷却措施,避免高温分布影响放大器的性能。自行搭建的高稳定性的全光纤掺铥激光种子光的中心波长为 1941 nm,信噪比约为 60 dB。通过掺铥放大器进行功率放大可以得到输出功率 0.766 W。

参 考 文 献

- 1 Li Dajun, Du Geguo. The recent research progress of Tm^{3+} -doped fiber lasers[J]. Laser Technology, 2007, 31(5): 540-543.
黎大军, 杜戈果. 掺铥光纤激光器研究进展[J]. 激光技术, 2007, 31(5): 540-543.
- 2 Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102001.
刘江, 王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102001.
- 3 Leng Jinyong. Theoretical and Experimental Research on Narrow-Linewidth Fiber Amplifiers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
冷进勇. 窄线宽光纤放大器的理论和实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- 4 V I Kovalev, R G Harrison, J Nilsson, *et al.*. Analytic modeling of Brillouin gain in rare-earth doped fiber amplifiers with high-power single-frequency signals[C]. SPIE, 2005, 5709: 142-146.
- 5 Li Linjun, Zhang Zhiguo, Bai Yunfeng, *et al.*. Progress and prospect on Tm, Ho: YAlO_3 laser at 2 μm wavelength[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 070003.
李林军, 张治国, 白云峰, 等. 2 μm 波段 Tm, Ho: YAlO_3 激光器研究进展及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 070003.
- 6 Shi Junkai, Chai Lu, Zhao Xiaowei, *et al.*. Generation of 34 W high power femtosecond pulse by single-state direct amplification in an all-photonics-crystal-fiber laser system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202001.
石俊凯, 柴路, 赵晓薇, 等. 全光子晶体光纤单级直接放大产生 34 W 高功率飞秒脉冲[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202001.
- 7 Lin Qing, Jian Yangtian, Wang Ran, *et al.*. Dispersion properties of the semiconductor optical amplifiers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 070602.
林青, 简阳天, 王苒, 等. 半导体光放大器的色散特性[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 070602.
- 8 Wang Chuncan, Zhang Fan, Lu Yuchun, *et al.*. Study of stimulated Brillouin scattering effect in high-power single-frequency fiber amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(12): 1630-1635.
王春灿, 张帆, 陆玉春, 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.
- 9 M Hildebrandt, S Buesche, P Weßels, *et al.*. Brillouin scattering spectra in high-power single-frequency ytterbium doped fiber amplifiers[J]. Opt Express, 2008, 16(20): 15970-15979.
- 10 Li Dajun, Du Geguo, Yan Peiguang. Numerical analysis of Tm^{3+} doped silica fiber lasers pumped by LD[J]. J Appl Opt, 2007, 28(4): 439-444.
黎大军, 杜戈果, 闫培光. LD 泵浦掺铥(Tm^{3+})光纤激光器的数值分析[J]. 应用光学, 2007, 28(4): 439-444.
- 11 Dong Shufu, Chen Guofu, Zhao Shanghong, *et al.*. Theoretical study on the 1180 nm laser pumped Tm, Ho co-doped silica fiber laser[J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 138-141.
董淑福, 陈国夫, 赵尚弘, 等. 1180 nm 激光抽运 Tm, Ho 石英光纤激光器理论研究[J]. 激光技术, 2006, 30(2): 138-141.
- 12 S D Jackson, T A King. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers[J]. J Lightwave Technol, 1999, 17(5): 948-956.

栏目编辑: 王晓琰