

# 基于一种新型抽运耦合技术的光纤激光放大器

赵保银<sup>1,2</sup> 段开棕<sup>1</sup> 赵 卫<sup>1</sup> 张恩涛<sup>1</sup> 惠祥云<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 通过建立耦合模方程,对一种同时包含传输芯和增益芯的复合结构光纤中的模场耦合特性进行了理论分析,同时使用速率方程和热传导方程对基于这种复合结构光纤的激光放大器的增益特性和热分布进行了数值计算和分析。研究表明,复合结构光纤中抽运光的耦合特性与抽运光的模式、纤芯半径和纤芯距离等因素有关;与端面抽运光纤激光放大器相比,这种复合结构光纤放大器对抽运光的吸收和激光转换相对平缓,光纤具有相对低的温度分布。因此,基于这种复合结构光纤的新型抽运技术可以解决使用端面抽运技术进行抽运时增益光纤温度过高的问题。这种复合结构光纤用于研制大功率光纤激光(放大)器有很大的优越性,为研制超大功率光纤激光(放大)器提供了一种新的途径。

**关键词** 激光器;光纤激光放大器;端面抽运;复合结构光纤;耦合周期;耦合模方程

**中图分类号** TN242;TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702014

## High-Power Fiber Laser Amplifiers Based on a New Pump-Coupling Technology

Zhao Baoyin<sup>1,2</sup> Duan Kailiang<sup>1</sup> Zhao Wei<sup>1</sup> Zhang Entao<sup>1</sup> Hui Xiangyun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** By constructing the coupled-mode equations, the mode-coupling characteristics between the passive and active cores within a kind of composite structural fiber (CSF) are studied theoretically. By using the steady-state rate equations and the heat conductive equations, the gain characteristics and the temperature distribution of all-fiber laser amplifiers based on CSF are calculated and analyzed numerically. The results show that the mode-coupling characteristics depend on the coupled modes, the radius and the separation of the two cores of the CSF. Compared with the end-pumped fiber laser amplifiers, the amplifiers based on CSF have a slow pump light absorption and conversion, and thus, have low temperature distribution. This kind of new coupling-pump technology by using CSF is of apparent advantages. It can be used to solve the problem of high temperature of end-pumped fiber amplifiers, and thereby provides a new approach to design higher power fiber lasers and fiber amplifiers.

**Key words** lasers; fiber laser amplifier; end pump; composite structural fiber; coupling distance; coupled-mode equations

**OCIS codes** 060.2310; 060.2280; 140.3280

## 1 引 言

大功率光纤激光器具有结构紧凑、性能稳定、转

换效率高和输出光束质量好等优点,因而在材料加工、激光打标、生物医学、空间通信和国防安全等领

收稿日期: 2010-12-07; 收到修改稿日期: 2011-02-28

基金项目: 中国科学院“西部之光”“联合学者”项目(0729591213)资助课题。

作者简介: 赵保银(1974—),男,博士研究生,主要从事大功率全光纤激光技术方面的研究。

E-mail: joseph.zhao@opt.ac.cn

导师简介: 段开棕(1967—),男,副研究员,博士生导师,主要从事高功率激光技术方面的研究。

E-mail: kl.duan@163.com(通信联系人)

域具有广泛的应用<sup>[1~4]</sup>。近几年来,随着双包层光纤等大功率光纤器件的研制和高功率激光二极管抽运技术的成熟,光纤激光器的输出功率水平得到了很大提升。2004年 Jeong 等<sup>[2]</sup>报道了 1.36 kW 功率输出的掺镱大芯径光纤激光器。2005年,IPG Photonics 公司的掺镱光纤激光器实现 2 kW 高光束质量激光输出<sup>[5]</sup>。2009年,该公司又成功研制一种单模激光器,其单光纤输出能力达到 9.6 kW<sup>[6]</sup>,是目前国际上光纤激光器输出功率的最高水平。

然而,光纤激光器输出功率的提高需要为增益光纤提供更大的抽运功率,这就对抽运技术提出了更高要求。目前,端面抽运技术是一种被广泛使用的较为成熟的抽运技术,它是将多模抽运光从增益光纤端面直接耦合进入光纤<sup>[1,7~9]</sup>。由于量子亏损和耦合损失等原因,在大功率抽运情况下这种端面抽运技术会使增益光纤的抽运端有非常高的温度分布,严重影响了激光器的运行安全,同时也限制了光纤激光功率的进一步提高<sup>[10~12]</sup>。有文献提出利用分段抽运的方法来解决这一问题<sup>[11]</sup>,但随着抽运光功率的增加,需要增加增益光纤长度和分段数,使得激光器结构变得较为复杂,而且由于光纤熔点数目的增加,使激光器系统的累计熔接损耗增大,这也降低了激光器的效率和可靠性。因此,探索适于较大功率水平的抽运技术,仍是大功率全光纤激光技术需要重点解决的技术问题。

本文提出一种新型的光纤抽运耦合技术。该技术使用一种复合结构的光纤(CSF)<sup>[13~15]</sup>,这种光纤包含一对平行排列的“芯”,其中的一个为抽运芯,用于传输抽运光,另一个为掺杂稀土离子的增益芯,这一对芯共用一个包层。在抽运光的传输过程中,由于倏逝波的泄露,抽运芯中的抽运光逐渐耦合到增益芯中,这样就避免了使用端面抽运技术时抽运点光能量过于集中的问题,能有效地降低增益光纤的热分布。在对这种复合结构光纤的模场耦合特性进行理论分析时,结合光纤激光放大器的速率方程和热传导方程,对基于这种复合结构光纤的激光放大器的增益放大特性和光纤的热分布进行了数值模拟和分析。

## 2 理论模型

### 2.1 抽运芯和增益芯之间的耦合模方程

图 1 描述了复合结构光纤的结构以及基于这种光纤的激光放大器原理。PC 和 GC 分别为抽运芯和增益芯,半径分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ ,折射率分别为  $n_1$  和

$n_2$ ,中心相距  $d(d > \rho_1 + \rho_2)$ 。PC 和 GC 处于一个包层之中,包层半径为  $b$ ,折射率为  $n_0$ 。若  $d$  足够小,两芯中的模场会有较强的倏逝波耦合,可使 PC 中传输的抽运光在传输过程中逐渐耦合到 GC 中。GC 中心存在半径为  $r \leq \rho_3$  ( $\rho_3 < \rho_1, \rho_2$ ) 的掺有稀土离子的增益区。从 PC 耦合到 GC 中的抽运光会被稀土离子逐步吸收,并转换为波长更长的激光,从而实现信号激光的放大。

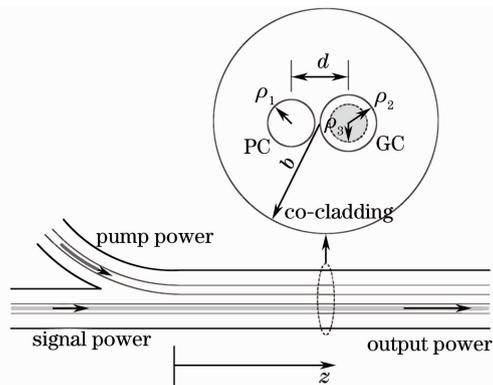


图 1 基于复合结构光纤的激光放大器原理  
Fig. 1 Schematic principle of the laser amplifier based on CSF

复合结构光纤中的光波场满足微分方程<sup>[16]</sup>

$$\nabla^2 \Psi + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(r, \theta) \Psi = 0, \quad (1)$$

式中  $n(r, \theta)$  为复合结构光纤的折射率。 $\Psi(r, \theta, z)$  可用 PC 和 GC 中的光波场表示为

$$\Psi(r, \theta, z) = a(z)E_1(r, \theta) + b(z)E_2(r, \theta), \quad (2)$$

式中  $E_1(r, \theta)$  和  $E_2(r, \theta)$  分别为 PC 和 GC 中的归一化模场分布函数,  $a(z)$  和  $b(z)$  为复振幅。由于抽运光在 GC 中传输时不断被吸收并转换为激光,因此 GC 中抽运光是不断衰减的,设其振幅衰减因子为  $\exp(-gz)$ ,  $g$  为吸收系数。在实际中  $g \ll k_0$ ,  $g/k_0 \sim 10^{-6}$ , 为研究问题方便,可将 GC 视为折射率为  $n_2$  的均匀介质光纤,在描述 GC 中抽运光的模场分布时不考虑系数  $g$  引起的横向模场分布变化<sup>[17]</sup>。 $E_1(r, \theta)$  和  $E_2(r, \theta)$  分别满足微分方程

$$\nabla^2 E_1 + [k_0^2 n_1^2(r, \theta) - \beta_1^2] E_1 = 0, \quad (3a)$$

$$\nabla^2 E_2 + [k_0^2 n_2^2(r, \theta) - (\beta_2 - ig)^2] E_2 = 0. \quad (3b)$$

将(2)式代入(1)式并利用(3)式化简,可得到模场复振幅  $a(z)$  和  $b(z)$  满足的耦合模方程组

$$\frac{\partial a(z)}{\partial z} = -i(K_{11} + \beta_1)a(z) - iK_{12}b(z), \quad (4a)$$

$$\frac{\partial b(z)}{\partial z} = -iK_{21}a(z) - i(K_{22} + \beta_2 - ig)b(z), \quad (4b)$$

式中  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为模传播常数,  $K_{11}, K_{22}$  为自耦合系数,  $K_{12}, K_{21}$  为互耦合系数, 表示为

$$K_{ij} = \frac{2\pi^2 [n_{(3-j)}^2 - n_0^2] \iint_{S_{(3-j)}} E_i^* E_j r dr d\theta}{\lambda^2 \beta_j \iint_{S_{(3-j)}} E_i^* E_i r dr d\theta}, \quad (5)$$

式中  $i, j = 1, 2$ , 积分区域  $S_1$  为 PC 区域,  $S_2$  为 GC 区域。利用(4)式可以分析图 1 所示的复合结构光纤中 PC 和 GC 之间的模场耦合情况。若吸收系数  $g$  不随耦合长度  $z$  变化, 利用边界条件  $a(0) = A_0$ ,  $b(0) = 0$ , 可得(4)式的解析解为

$$a(z) = \frac{A_0}{2p} \{ p[1 + \exp(pz)] + \text{is}[1 - \exp(pz)] \} \exp\left[-\frac{1}{2}(p + iq)z\right], \quad (6a)$$

$$b(z) = \frac{ik_{21}A_0}{p} [1 - \exp(pz)] \exp\left[-\frac{1}{2}(p + iq)z\right], \quad (6b)$$

式中

$$s = k_{11} - k_{22} + \beta_1 - (\beta_2 - ig), \quad (7)$$

$$p = (-4k_{12}k_{21} - s^2)^{1/2}, \quad (8)$$

$$q = k_{11} + k_{22} + \beta_1 + (\beta_2 - ig). \quad (9)$$

由(6b)式可得  $|b(z)|^2 = 2(k_{21}A_0/|p|)^2(1 - \cos\theta)\exp(-gz)$ ,  $\theta = |p|z$ , 即当两光纤存在耦合时, GC 中抽运光功率衰减因子为  $\exp(-gz)$ , PC 和 GC 中抽运光功率耦合的周期长度  $L_T = 2\pi/|p|^{[18]}$ 。特殊地, 若  $g = 0, \rho_1 = \rho_2, n_1 = n_2$ , 而且  $\beta_1 = \beta_2, k_{11} = k_{22}, k_{21} = k_{12}$ , 由(7)~(9)式得  $s = 0, p = 2ik_{12}, q = 2(k_{11} + \beta_1)$ , (6)式化简为

$$a(z) = A_0 \cos(k_{12}z) \exp[-i(k_{11} + \beta_1)z], \quad (10a)$$

$$b(z) = -iA_0 \sin(k_{12}z) \exp[-i(k_{11} + \beta_1)z], \quad (10b)$$

(10)式即为 GC 不存在吸收, 即与 PC 完全相同时, 相同模场的耦合结果, 这与文献[18]中的结果是一致的。

## 2.2 复合结构光纤激光放大器的速率方程

为研究图 1 所示光纤激光放大器的增益特性, 假定 GC 中心掺杂  $\text{Yb}^{3+}$ 。在强抽运条件下, 假设抽运光和激光分别为单一波长, 忽略自发辐射, 并考虑激光和抽运光的散射损耗, 放大器的稳态速率方程表示为<sup>[19]</sup>

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{P_p(z)\lambda_p\sigma_{ap}\Gamma_p}{hcA} + \frac{P_s(z)\lambda_s\sigma_{as}\Gamma_s}{hcA}}{\frac{P_p(z)(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\lambda_p\Gamma_p}{hcA} + \frac{1}{\tau} + \frac{P_s(z)(\sigma_{as} + \sigma_{es})\lambda_s\Gamma_s}{hcA}}, \quad (11a)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)] \times P_p(z) - \alpha_p P_p(z), \quad (11b)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N] \times P_s(z) - \alpha_s P_s(z), \quad (11c)$$

式中  $N_2(z)$  为  $\text{Yb}^{3+}$  粒子在增益光纤  $z$  处的上能级粒子数密度,  $N$  为掺杂浓度,  $\lambda_p$  和  $\lambda_s$  分别为抽运光和激光波长,  $\Gamma_p$  和  $\Gamma_s$  分别为抽运光和激光功率填充因子,  $\sigma_{ap}, \sigma_{ep}$  和  $\sigma_{as}, \sigma_{es}$  分别为抽运光和激光的吸收、发射截面,  $\tau$  为上能级电子寿命,  $A = \pi\rho_3^2$  为 GC 芯中增益区截面积,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中光速,  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别为抽运光和激光的损耗因子,  $P_p$  和  $P_s$  分别为 GC 中的抽运光和激光功率。其中抽运光功率

$$P_p = P_b = \frac{\epsilon_0 c n_2}{2} |b(z)|^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E_2^*(r, \theta) E_2(r, \theta) r dr d\theta. \quad (12)$$

对比(11b)、(12)式可知吸收系数  $g$  为

$$g = \frac{\Gamma_p[\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)] + \alpha_p}{2}, \quad (13)$$

利用(4)、(11)~(13)式可以数值分析激光放大器的抽运光耦合、吸收和信号激光增益放大特性。

## 2.3 复合结构光纤激光放大器的热传导方程

引入热传导方程, 对图 1 所示的光纤激光放大器的热分布进行分析。复合结构光纤中的热主要产生于 GC 中的增益区对抽运光的吸收和激光转换过程中的量子亏损以及激光在纤芯中的传输损耗, 光纤中的热源函数可表示为<sup>[20]</sup>

$$Q(z) = \frac{\alpha_a \eta_a P_p(z) + \alpha_s P_s(z)}{\pi\rho_3^2}, \quad (14)$$

式中, 参数  $\alpha_a = 2g, \eta_a$  为与量子亏损有关的热转换系数。纤芯增益区产生的热由内而外传向光纤表面, 再经辐射和对流散失到空气中。由于复合光纤包层半径  $b$  远大于 PC 和 GC 芯径  $\rho_1$  和  $\rho_2$ , 因此可以假定纤芯 GC 位于复合光纤的中心。稳态热传导方程表示为<sup>[20, 21]</sup>

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = -\frac{Q(z)}{\kappa}, \quad (0 \leq r \leq \rho_3), \quad (15a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] = 0, \quad (\rho_3 \leq r \leq b), \quad (15b)$$

式中  $\kappa$  为光纤的热传导系数。使用温度  $T(r, z)$  沿光纤轴向的慢变近似  $\partial^2 T(r, z)/\partial z^2 = 0$ , 并根据温度在边界  $r = 0$  和  $r = \rho_3$  处的连续性条件, 得到纤芯

温度

$$T_0(z) = T_b(z) + \frac{Q(z)\rho_3^2}{4\kappa} + \frac{Q(z)\rho_3^2}{2\kappa} \ln \frac{b}{\rho_3}, \quad (16)$$

式中  $T_b(z)$  为光纤表面温度。根据牛顿冷却定律可知<sup>[21]</sup>

$$T_b(z) = T_c + \frac{Q(z)\rho_3^2}{2bh_c}, \quad (17)$$

式中  $T_c$  为空气温度,  $h_c$  为空气的热对流系数。将热源函数(14)、(17)式代入(16)式可得

$$T_0(z) = T_c + \frac{2g\eta_q P_p(z) + \alpha_s P_s(z)}{\pi} \times \left( \frac{1}{2bh_c} + \frac{1}{4\kappa} + \frac{1}{2\kappa} \ln \frac{b}{\rho_3} \right). \quad (18)$$

这样, 联立(4), (11)~(13)式和(18)式进行数值计算, 可得到复合光纤的 GC 中心温度  $T_0(z)$ 。在数值计算时, 需要将 GC 分为许多小段。在分段长度足够小时, 该小段内的吸收系数  $g$  可视为常数。每一小段内的数值计算分为两步: 第一步根据(11)、(12)和(13)式得到 GC 芯中的抽运功率  $P_b$ 、激光功率  $P_s$  和吸收系数  $g$ , 并将  $P_b$ 、 $P_s$  和  $g$  代入(18)式解得 GC 中心温度  $T_0$ ; 第二步将系数  $g$  值代入(4)式计算出 PC 和 GC 纤芯中的抽运光耦合、吸收后的复振幅。重复这两步计算, 可以得到复合光纤 GC 中抽运光、激光功率和中心温度随光纤长度的变化曲线。

### 3 数值计算与结果分析

首先研究复合结构光纤的模场耦合特性。为简单起见, 仅以  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$  及  $LP_{03}$  三个低阶模为例分析 PC 和 GC 中相同模式耦合时的抽运光演变情况。基本计算参数取值为: 抽运光波长  $\lambda_p = 0.975 \mu\text{m}$ , 激光波长  $\lambda_s = 1.08 \mu\text{m}$ , PC 和 GC 半径  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , 折射率  $n_1 = n_2 = 1.452$ , 复合光纤包层半径  $b = 200 \mu\text{m}$ , 折射率  $n_0 = 1.456$ , GC 芯中增益区半径  $\rho_3 = 5 \mu\text{m}$ 。速率方程(11)式和纤芯温度(18)式中各参数如表 1 所示<sup>[19, 22]</sup>。

图 2 为耦合周期  $L_T$  随归一化间距  $d/\rho$  的变化曲线,  $\rho = 15 \mu\text{m}$ , 吸收系数  $g = 0.05$ 。从图 2 可以看出, 对于同一个模,  $L_T$  随纤芯距  $d/\rho$  的增大而迅速增大。对于相同的归一化间距  $d/\rho$ ,  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$  和  $LP_{03}$  模的耦合周期  $L_T$  依次减小, 即低阶模的耦合周期大于高阶模的耦合周期, 如当  $d/\rho = 2.5$  时,  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$  和  $LP_{03}$  模的耦合周期分别为 28.3, 5.3 和 1.3 m。

表 1 速率方程(11)式和纤芯温度(8)式使用的参数值  
Table 1 Parameters used in the equations (11) and (8)

Parameter	Value
$\tau / \text{s}$	$1 \times 10^{-3}$
$\sigma_{\text{ap}} / \text{m}^2$	$2.5 \times 10^{-24}$
$\sigma_{\text{ep}} / \text{m}^2$	$2.5 \times 10^{-24}$
$\sigma_{\text{es}} / \text{m}^2$	$2.0 \times 10^{-25}$
$\sigma_{\text{as}} / \text{m}^2$	$1.4 \times 10^{-27}$
$N / \text{m}^{-3}$	$4 \times 10^{25}$
$\alpha_p / \text{m}^{-1}$	$5 \times 10^{-3}$
$\alpha_s / \text{m}^{-1}$	$3 \times 10^{-3}$
$\Gamma_p$	0.0012
$\Gamma_s$	0.82
$L / \text{m}$	50
$P_a(0) / \text{W}$	3000
$P_b(0) / \text{W}$	0
$P_s(0) / \text{W}$	500
$\eta_q$	0.11
$\kappa / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	1.38
$T_c / \text{K}$	298
$h_c / [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	30

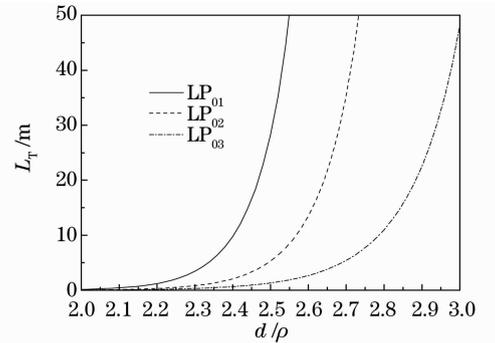


图 2 耦合周期  $L_T$  随光纤归一化间距  $d/\rho$  的变化 ( $g = 0.05, \rho = 15 \mu\text{m}$ )

Fig. 2 Coupling periods  $L_T$  of different LP modes versus the normalized core separation  $d/\rho$  ( $g = 0.05, \rho = 15 \mu\text{m}$ )

图 3 是归一化间距  $d/\rho = 2.5$  时, 耦合周期  $L_T$  随纤芯半径  $\rho$  的变化曲线, 系数  $g = 0.05$ 。选取纤芯半径的变化范围为  $12 \mu\text{m} \leq \rho \leq 22 \mu\text{m}$ , 由图 3 可以看出,  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$  和  $LP_{03}$  模的耦合周期  $L_T$  均随芯径  $\rho$  的增大而迅速增大。与图 2 类似, 低阶模的耦合周期大于高阶模的耦合周期, 对于相同的  $\rho$ ,  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$  和  $LP_{03}$  模的耦合周期  $L_T$  依次减小。由图 2, 3 的结果可知, 为保证复合结构光纤对低阶模抽运光也有一定的吸收效率, 必须根据纤芯  $\rho$  的大小选择适当的归一化纤芯距离  $d/\rho$ 。

图 4 分析了复合结构光纤激光放大器在不同模式抽运光耦合时的增益特性, 为便于分析, 假设从

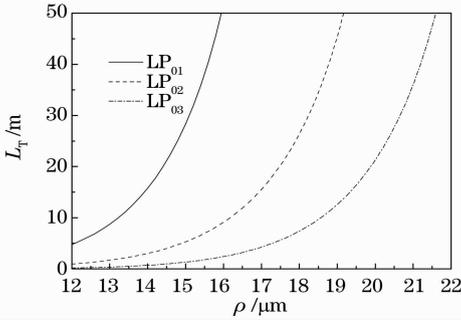


图3 耦合周期  $L_T$  随纤芯半径  $\rho$  的变化 ( $g=0.05, d/\rho=2.5$ )

Fig. 3 Coupling periods  $L_T$  of different LP modes versus the core radius  $\rho$  ( $g=0.05, d/\rho=2.5$ )

PC 注入了功率为 1000 W、模式分别为  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$  或  $LP_{03}$  的抽运光，初始信号激光功率为  $P_s(0) = 500$  W。GC 中抽运功率  $P_b$  和激光功率  $P_s$  随传输

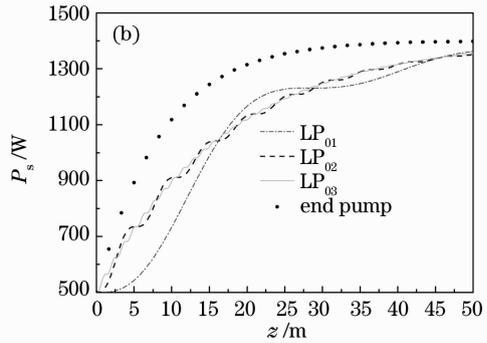
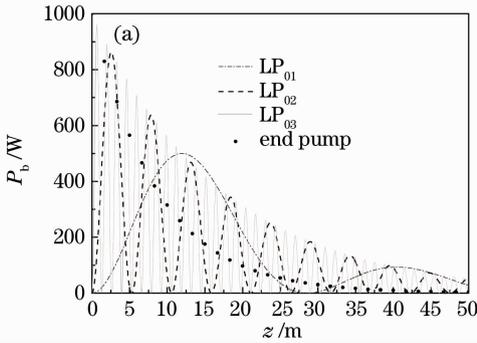


图4 GC 中抽运功率  $P_b$  (a) 和激光功率  $P_s$  (b) 随传输距离  $z$  的变化 ( $\rho=15 \mu\text{m}, d/\rho=2.5$ )

Fig. 4 Pump power  $P_b$  (a) and output power  $P_s$  (b) in GC versus the coupling distance  $z$  ( $\rho=15 \mu\text{m}, d/\rho=2.5$ )

下面讨论图 1 所示的复合结构光纤放大器的增益放大及热分布特性。在实际使用中抽运光为多模激光，因此不失一般性，设多模抽运光总功率为  $P_a(0) = 3000$  W，且总功率平均分配在  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$  和  $LP_{03}$  三个模上，即  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$  和  $LP_{03}$  模功率分别为 1000 W。在此前提下，图 5(a) 和 (b) 分别对抽运光

转换效率  $\eta_p = [P_s(z) - P_s(0)] / P_a(0)$  和纤芯温度  $T_0$  随传输距离  $z$  的变化做了数值计算，半径  $\rho = 15 \mu\text{m}$ 。图中同时给出了使用单端抽运技术将抽运光直接导入单根 GC 时的计算结果，用小黑点线表示。由图 5(a) 可知，与端面抽运技术相比较，使用复合结构光纤抽运技术时抽运光的转换效率较为平

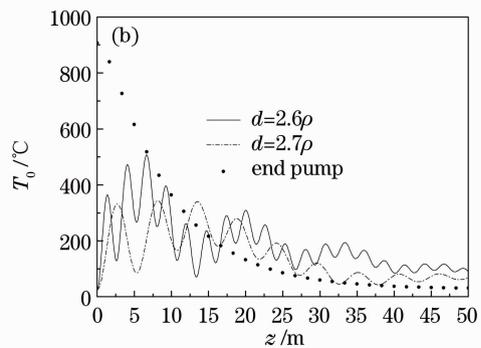
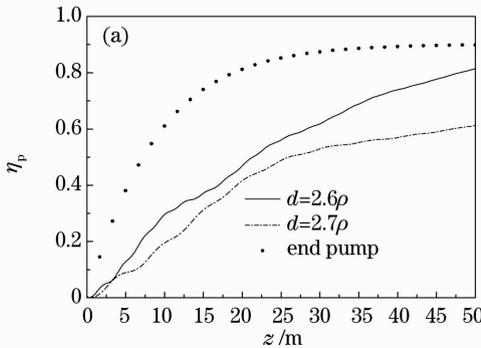


图5 抽运光吸收率  $\eta_p$  (a) 和复合光纤纤芯温度  $T_0$  (b) 随传输距离  $z$  的变化 ( $\rho=15 \mu\text{m}$ )

Fig. 5 Absorption  $\eta_p$  of pump power (a) and core temperature  $T_0$  of the CSF (b) versus the coupling distance  $z$  ( $\rho=15 \mu\text{m}$ )

缓,如当  $d=2.6\rho$  时,复合结构光纤在  $z=25,50\text{ m}$  处的转换效率分别为  $\eta_p=56.1\%$ ,  $81.4\%$ ,而使用端面抽运技术时在  $z=25,50\text{ m}$  处  $\eta_p=85.2\%$ ,  $89.8\%$ 。当归一化间距增加时,复合结构光纤抽运技术时抽运光的转换效率更加平缓,如  $d=2.7\rho$  时,在  $z=50\text{ m}$  处的转换效率只有  $61.2\%$ 。抽运光相对平缓的转换效率可有效改善放大器的热分布,这可由图 5(b)看出。使用复合结构光纤抽运技术时,光纤起始端  $z=0$  处的纤芯温度仅为室温  $25.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。纤芯温度  $T_0$  随  $z$  波动变化,在 PC 和 GC 纤芯距  $d=2.6\rho, 2.7\rho$  时纤芯的最高温度分别为  $507\text{ }^\circ\text{C}$  和  $340\text{ }^\circ\text{C}$ 。而使用端面抽运技术时,起始端  $z=0$  处的纤芯温度高达  $907\text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 4 结 论

对基于一种复合结构光纤的新型光纤激光放大器的抽运耦合特性、增益放大特性以及热分布特性等进行了全面的理论分析。这种新型抽运耦合技术的光纤激光放大器的抽运耦合是通过复合结构光纤中传输芯和增益芯的倏逝波泄露实现的。与端面抽运光纤激光放大器相比,使用这种新型抽运耦合技术的光纤激光放大器的抽运光吸收和信号激光增益放大都较为平缓,而且其平缓程度还可通过改变两纤芯间的距离、纤芯半径等参数进行调节。因此基于这种复合结构光纤的新型抽运技术可以解决使用端面抽运技术进行抽运时增益光纤温度过高的难题。研究结果对设计超大功率的光纤激光器和激光放大器有一定的理论指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Yin Shuping, Yan Ping, Gong Mali. End-pumped 300 W continuous-wave ytterbium-doped all-fiber laser with master oscillator multistage power amplifiers configuration[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 17864~17869
- 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. Express*, **12**(25): 6088~6092
- 3 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu. Experimental investigation of phase detection and compensation in coherent combining of fiber laser array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1): 184~187  
肖 瑞, 侯 静, 姜宗福. 光纤激光器阵列相干合成中的位相探测与校正方法研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(1): 184~187
- 4 Zhu Mengzhen, Huang Changchun, Cheng Yong *et al.*. Mutual injection phase-locked study of fiber laser with two output ports[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 2964~2968  
朱孟真, 黄长春, 程 勇 等. 双端输出光纤激光器互注入锁相研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 2964~2968

- 5 V. Gapontsev, D. Gapontsev, N. Platonov *et al.*. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness [C]. Munich: Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, IEEE, 2005, 508
- 6 IPG Photonics. IPG Photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser [EB]. <http://www.ipgphotonics.com/newsproduct.htm>
- 7 D. J. Digiovanni, A. J. Stentz. Tapered fiber bundles for coupling light and out of cladding-pumped fiber devices[P]. U. S. Patent, 5864644, 1999
- 8 F. Gonthier, L. Martineau, F. Seguin *et al.*. Optical coupler comprising multimode fibers and method of making the same[P]. U. S. Patent, 7046875, 2006
- 9 Wang Dazheng, Wang Yonggang, Liu Suping *et al.*. New reflecting side-pumped method of double-clad fiber laser by micro-prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 974~979  
王大拯, 王勇刚, 刘素平等. 双包层光纤激光器微棱镜反射式侧面耦合的新技术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 974~979
- 10 Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Estimation of maximum output power of double clad fiber laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(4): 577~580  
陈子伦, 侯 静, 姜宗福. 双包层光纤激光器最大输出功率的估算[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(4): 577~580
- 11 Wang Yong. Heat dissipation in kilowatt fiber power amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6): 731~740
- 12 Li Pingxue, Zhu Chen, Zou Shuxhen *et al.*. Theoretical and experimental investigation of thermal effects in a high power Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2008, **40**(2): 360~364
- 13 A. B. Grudinin, D. N. Payne, P. W. Turner *et al.*. Multi-fiber arrangements for high power fiber lasers and amplifiers[P]. U. S. Patent, 6826335B1, 2004
- 14 Liu Lisong, Peng Jian, Yao Lei *et al.*. Research on the fabrication and coupling characteristic of symmetrical twin-core fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 752~756  
刘利松, 彭 健, 姚 磊 等. 对称双芯光纤的研制及其耦合特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 752~756
- 15 Zheng Jingjing, Zheng Kai, Peng Jian *et al.*. Analysis of splicing and splicing fusion coupling efficiency between single-core fiber and dual-core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2529~2535  
郑晶晶, 郑 凯, 彭 健 等. 单芯光纤与双芯光纤的对接和熔接耦合效率分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2529~2535
- 16 A. Ghatak, K. Thyagarajan. An Introduction to Fiber Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, 545
- 17 A. E. Siegman. Propagation modes in gain-guided optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(8): 1617~1618
- 18 Wang Xiangru, Xiong Caidong, Luo Juanyan. Coupling coefficients evaluation of a directional coupler using gain guided and index antiguided fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(3): 382~386
- 19 I. Kelson, A. A. Hardy. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9): 1570~1577
- 20 D. C. Brown, H. J. Hoffman. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(2): 207~217
- 21 I. Kelson, A. Hardy. Optimization of strongly pumped fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 891~897
- 22 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19): 1831~1833