

# 高功率光纤激光器二级抽运技术的理论分析

杨未强<sup>†</sup> 侯静 宋锐 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2010年5月24日收到;2011年3月28日收到修改稿)

从理论上分析了高功率光纤激光器直接抽运和二级抽运的斜率效率和热管理问题. 计算结果表明:波长为 975 nm 的激光直接抽运产生波长为 1070 nm 的激光时,理论斜率效率为 80%,但当抽运光功率为 10 kW 时,在强制水冷条件下纤芯极值温度也难以降到 150 °C 以下;在二级抽运技术中,波长为 1018 nm 的激光抽运产生波长为 1070 nm 的激光时,若采用传统的包层抽运技术,其斜率效率不足 20%,如果抽运功率填充因子由 0.0025 提高到 0.1,则理论上斜率效率可由 18.5% 提高到 80.9%,从而总斜率效率由 15.5% 提高到 68%. 二级抽运在斜率效率上不如直接抽运,但在热管理上具有明显的优势. 二级抽运的关键技术在于如何合理提高抽运功率填充因子,在保证转换效率的同时获得较好的温度特性.

**关键词:** 二级抽运, 功率填充因子, 斜率效率, 热管理

**PACS:** 42.55. Wd, 42.55. Xi, 42.60. By

## 1. 引言

高功率光纤激光器与传统高能激光器相比具有转换效率高、光束质量好、结构紧凑、散热方便、运转可靠、性价比高、全固化等显著特点,是国际上激光技术领域的研究热点之一<sup>[1-4]</sup>. 近年来,随着大模场面积双包层掺杂光纤制造工艺和高亮度激光二极管抽运技术的发展,以包层抽运为核心技术的高功率光纤激光器得到了迅速发展,光纤激光器的输出功率不断提高. 2009年6月,美国 IPG 光子技术公司推出了产品化的单模万瓦级光纤激光器,

该公司的多横模连续光纤激光器输出功率可达 50 kW,电光转换效率为 30%<sup>[4]</sup>.

美国 IPG 光子技术公司生产的 10 kW 单模光纤激光器的结构<sup>[4]</sup>如图 1 所示,传统的光纤激光器都是采用激光二极管直接抽运技术,该结构中采用了二级抽运技术. 二级抽运是指先由波长为 975 nm 的激光抽运产生波长为 1018 nm 的激光,然后该激光用于抽运放大波长为 1070 nm 的信号光. 采用波长为 1018 nm 的激光作为抽运源具有热管理上的优势,但是掺镱光纤在 1018 nm 波长处的吸收峰强度比 975 nm 波长处的吸收峰强度小一个数量级,而且 1018 nm 波长处吸收截面比

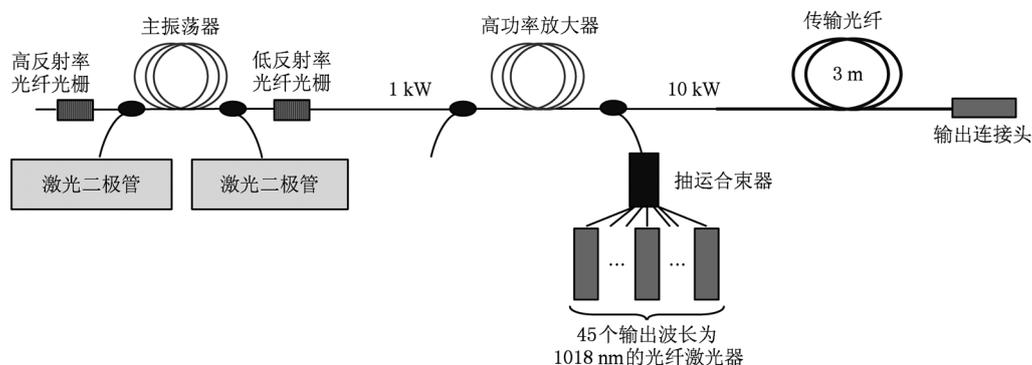


图 1 10 kW 单模光纤激光器的结构示意图

<sup>†</sup>E-mail: yangweiqiang\_001@126.com

辐射截面小得多. 抽运光的转换效率是人们所关心的一个重要问题. 目前还没有相关文献对二级抽运能否获得较高的光-光转换效率、其在热管理上的优势以及二级抽运的关键技术等进行理论上的研究.

本文从激光速率方程和光纤内热传导方程出发,在理论上对比分析了波长为 975 nm 的激光直接抽运和二级抽运产生波长为 1070 nm 的激光在斜率效率和热管理上的优缺点,并指出了利用二级抽运技术实现高功率光纤激光器的关键技术所在. 本文

的研究可为高功率光纤激光器二级抽运技术的实现提供理论参考.

## 2. 理论模型

### 2.1. 激光速率方程

通过激光速率方程可以分析光纤激光器和放大器中信号光和抽运光的功率分布情况、求解最佳光纤长度以及抽运光的转换效率等.

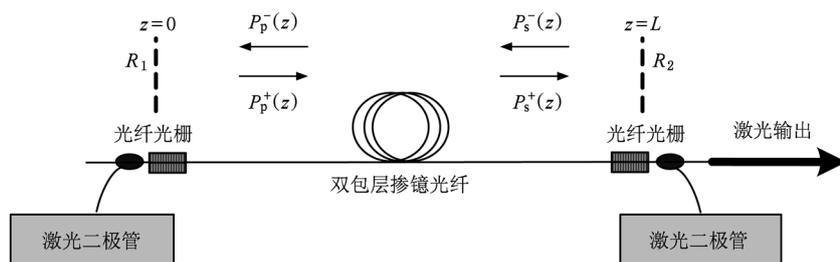


图2 光纤激光器结构示意图

光纤激光器的结构如图2所示,其中  $P_p^+(z)$  和  $P_p^-(z)$  分别表示正反向传输的抽运光功率和信号光功率,  $R_1$  和  $R_2$  为前后腔对信号光的反射率. 文献 [5,6] 给出了光纤激光器中信号光和抽运光所满足的速率方程,假设光纤中的激光是一个窄带信号

光,只在信号波长  $\lambda_s$  附近取值,则激光功率密度可表示为  $\rho^+(z, \lambda) \approx P_s^+(z) \delta(\lambda - \lambda_s)$ . 在典型的强抽运光纤激光器中,与信号光功率相比放大的自发辐射可以忽略,经简化后稳态下掺镱光纤激光器中速率方程可表示为

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

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p \{ \sigma_{ap} N + [\sigma_{24} - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})] N_2(z) \} P_p^\pm(z) - \alpha_p(z) P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \Gamma_s \{ [\sigma_e(\lambda_s) + \sigma_a(\lambda_s)] N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s) N \} P_s^\pm(z) - \alpha_s(\lambda_s) P_s^\pm(z), \quad (3)$$

式中  $N$  为光纤单位体积内镱离子掺杂浓度;  $N_2(z)$  为上能级粒子数密度分布函数;  $\tau$  为上能级粒子自发辐射寿命;  $\Gamma_p$  为抽运功率填充因子,表示抽运光功率耦合进有源纤芯的比例;  $\Gamma_s$  为信号功率填充因子;  $A$  为双包层光纤纤芯面积;  $\sigma_{as}$  和  $\sigma_{es}$  分别为信号光的吸收截面和辐射截面;  $\sigma_{ap}$  和  $\sigma_{ep}$  分别为抽运光的吸收截面和辐射截面;  $\sigma_{24}$  为激发态吸收散射截面;  $\alpha_s$  和  $\alpha_p$  分别为信号光和抽运光的传输损耗系数;  $h$  为普朗克常量;  $c$  为光在真空中的传播速度.

由反射镜决定的边界条件为

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), \quad (4)$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L). \quad (5)$$

根据边界条件,通过龙格-库塔法和打靶法,可以对方程(1)—(3)进行求解.

### 2.2. 光纤内热传导方程

对于双包层光纤激光器,由于增益光纤的长度远大于光纤横向尺寸,因此可将光纤视为无限长,

同时假定热流仅限于径向方向. 为简化计算, 假设双包层光纤的内包层为圆形, 纤芯、内包层和外包层具有相同的热传导系数, 则在柱坐标系下关于  $z$  轴对称的稳态热传导微分方程可表示为<sup>[7]</sup>

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = - \frac{Q(r, z)}{\kappa_f}, \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right|_{r=r_3} = \frac{H}{\kappa_f} [T_h - T(r_3, z)], \quad (7)$$

式中  $r$  为光纤内任一点与中心轴  $z$  的距离;  $T$  为光纤中的温度;  $T_h$  为热沉温度;  $Q$  为内热源, 单位为  $W \cdot m^{-3}$ ;  $\kappa_f$  为光纤热传导系数;  $H$  为对流传热系数;  $r_3$  为双包层光纤外包层半径, 而纤芯半径和内包层半径分别用  $r_1$  和  $r_2$  表示. 热传导方程的解析解形式为<sup>[8-10]</sup>

$$T_1(r, z) = T_h + \frac{Qr_1^2}{4\kappa_f} \left[ 2\ln\left(\frac{r_3}{r_1}\right) + \frac{2\kappa_f}{r_3H} \right] + \frac{Qr_1^2}{4\kappa_f} \left( 1 - \left(\frac{r}{r_1}\right)^2 \right) \quad (0 \leq r \leq r_1), \quad (8)$$

$$T_2(r, z) = T_h + \frac{Qr_1^2}{2r_3H} - \frac{Qr_1^2}{2\kappa_f} \ln\left(\frac{r}{r_3}\right) \quad (r_1 \leq r \leq r_3). \quad (9)$$

内热源  $Q$  主要产生于纤芯内部, 表示单位体积内的热功率密度,  $Q$  可表示为

$$Q(r, z) = \frac{\Delta P \eta}{\Delta z \pi r_1^2} = \frac{[P_p(z) - P_p(z + \Delta z)] \eta}{\Delta z \pi r_1^2}. \quad (10)$$

这里  $\eta$  为热转换系数. 若仅考虑量子亏损发热, 则有  $\eta = 1 - \lambda_p/\lambda_s$ .  $P_p(z)$  为  $z$  处抽运光功率. 对于前端抽运, 由激光速率方程(2) 可得

$$P_p(z) \approx P_p^+(0) \exp[-(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p)z] = P_p^+(0) \exp(-\alpha z), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_p(z) - P_p(z + \Delta z) \\ &= [1 - \exp(-\alpha \Delta z)] P_p^+(0) \exp(-\alpha z) \\ &\approx \alpha P_p^+(0) \exp(-\alpha z) \Delta z \\ &= \alpha P_p(z) \Delta z. \end{aligned} \quad (12)$$

将方程(12)代入方程(10), 可得

$$Q(r, z) = \frac{\alpha P_p(z)}{\pi r_1^2} \left( 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \right). \quad (13)$$

同样, 对于双向抽运,  $z$  处抽运光功率  $P_p(z)$  可表

示为

$$\begin{aligned} P_p(z) &= P_p^+(z) + P_p^-(z) \\ &= P_p^+(0) \exp(-\alpha z) \\ &\quad + P_p^-(L) \exp[-\alpha(L - z)]. \end{aligned} \quad (14)$$

将方程(14)代入方程(10), 可得到和方程(13) 相同的结果.

### 3. 数值计算及讨论

#### 3.1. 计算参量取值

计算时选用美国 Nufern 公司生产的 LMA-YDF-20/400 型掺镱光纤作为增益介质, 其吸收截面和辐射截面如图 3 所示. 掺镱光纤在 975 和 915 nm 附近有两个吸收峰, 915 nm 波长处的吸收峰强度比 975 nm 波长处的吸收峰强度小得多. 因此, 为获得较高的抽运光转换效率通常选择波长为 975 nm 的激光作为抽运源.

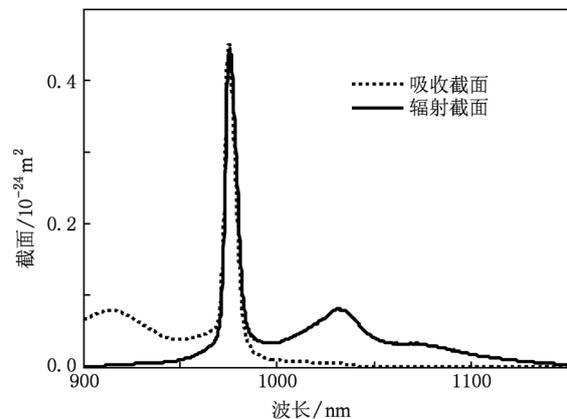


图3 LMA-YDF-20/400 型掺镱光纤的吸收截面和辐射截面

利用包层抽运技术, 采用波长为 975 nm 的激光抽运产生波长为 1070 nm 的信号光时, 计算中相关参量取值如表 1 所列. 当抽运光或者信号光波长为 1018 nm 时, 在计算中该波长对应的吸收截面和辐射截面分别为  $7.07 \times 10^{-26} m^2$  和  $5.7 \times 10^{-25} m^2$ , 传输损耗系数取值为  $1.15 \times 10^{-4} cm^{-1}$ , 其他参量的取值列于表 1.

求解光纤内部热传导方程时, 热沉温度  $T_h = 300 K$ , 光纤热传导系数  $\kappa_f = 1.38 W \cdot m^{-1} K^{-1}$ , 光纤

的结构参数  $r_1 = 10 \mu\text{m}$ ,  $r_2 = 200 \mu\text{m}$ ,  $r_3 = 275 \mu\text{m}$ , 空气和水的对流传热系数  $H$  的取值列于表 2<sup>[11]</sup>.

表 1 数值计算中相关参量取值

参 量	取 值
$\lambda_p/\text{nm}$	975
$\lambda_s/\text{nm}$	1070
$\sigma_{ap}/\text{m}^2$	$4.47 \times 10^{-24}$
$\sigma_{ep}/\text{m}^2$	$4.28 \times 10^{-24}$
$\sigma_{as}/\text{m}^2$	$3.93 \times 10^{-27}$
$\sigma_{es}/\text{m}^2$	$3.31 \times 10^{-25}$
$\alpha_p/\text{cm}^{-1}$	$2.30 \times 10^{-4}$
$\alpha_s/\text{cm}^{-1}$	$1.15 \times 10^{-4}$
$\Gamma_p$	0.0025
$\Gamma_s$	0.9000
$h/\text{Js}$	$6.63 \times 10^{-34}$
$c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$3 \times 10^8$
$\tau/\text{ms}$	0.90
$N/\text{cm}^{-3}$	$5 \times 10^{19}$
$A/\text{cm}^2$	$3.14 \times 10^{-6}$
$R_1$	0.98
$R_2$	0.04

表 2 空气和水的对流传热系数  $H$  的取值范围  
(单位为  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ )

	自然对流	强制对流
空气	3—10	20—100
水	200—1000	1000—10000

### 3.2. 最佳光纤长度和输出端信号光功率

当抽运光功率为 1 kW 时,不同增益光纤长度对应的输出端信号光功率如图 4 所示. 图 4(a) 和 (b) 中抽运光波长均为 975 nm, 信号光波长分别为 1070 和 1018 nm, 其中双向抽运时前后端抽运光功率都为 500 W. 图 4(c) 中只考虑前端抽运, 抽运光波长为 1018 nm, 信号光波长为 1070 nm. 图 4(a) 和 (b) 对应的抽运方式为包层抽运, 抽运功率填充因子  $\Gamma_p$  可由光纤纤芯面积与内包层面积之比近似求得,  $\Gamma_p = 0.0025$ .

从图 4(a) 和 (b) 可以看出: 后端抽运对应的光-光转换效率最高, 其次是双向抽运, 前端抽运转换

效率最低; 前端抽运对应的最佳光纤长度最短, 后端抽运时最佳光纤长度比前端抽运和双向抽运的最佳光纤长度要长; 当波长为 975 nm 的激光直接抽运产生波长为 1070 和 1018 nm 的信号光时, 光-光转换效率可达到 80% 以上, 对应 1 kW 抽运时输出端信号光功率可超过 800 W. 从图 4(c) 可以看出: 当波长为 1018 nm 的激光前向抽运产生波长为 1070 nm 的信号光时, 若采用传统的包层抽运技术, 抽运功率填充因子  $\Gamma_p = 0.0025$ , 对应的最佳光纤长度较长(约为 63 m), 而且输出端信号光功率不足 200 W; 当  $\Gamma_p$  不断增加时, 最佳光纤长度减小, 光-光转换效率提高, 输出端信号光功率不断增大; 当  $\Gamma_p = 0.1$  时最佳光纤长度约为 10 m, 输出端信号光功率达到 800 W.

考虑前端抽运情况, 当抽运光波长为 1018 nm, 信号光波长为 1070 nm 时, 抽运光和信号光功率沿光纤长度的分布情况如图 5 所示, 图中计算时的光纤长度为不同情况下对应的最佳光纤长度. 从图 5(a) 可以看出, 当抽运功率填充因子较小 ( $\Gamma_p = 0.0025$ ) 时, 抽运光的吸收系数小、转换效率低, 最终输出端信号光功率不足 200 W. 从图 5(b) 可以看出, 由于抽运功率填充因子的增大 ( $\Gamma_p = 0.1$ ), 抽运光的吸收系数变大、转换效率提高, 最终输出端信号光功率超过 800 W.

### 3.3. 斜率效率

当抽运光波长为 975 nm 时, 输出端信号光功率与抽运光功率的关系如图 6 所示, 其中 (b) 图为 (a) 图中抽运光功率较小时的局部放大. 数值计算时只考虑前端抽运情况, 光纤长度的选取参考图 4 中的计算结果, 取抽运光功率为 1 kW 时对应的最佳光纤长度. 从图 6 可以看出: 当信号光波长为 1070 nm 时, 激光阈值功率为 0.7 W, 斜率效率为 80%; 当信号光波长为 1018 nm 时, 激光阈值功率为 3.5 W, 斜率效率为 84%.

考虑前端抽运情况, 当抽运光波长为 1018 nm, 信号光波长为 1070 nm 时, 输出端信号光功率与抽运光功率的关系如图 7 所示, 其中 (b) 和 (c) 图为 (a) 图中抽运光功率较小时的局部放大. 计算时针对不同的抽运功率填充因子  $\Gamma_p$ , 光纤长度的选取参考图 4 中的计算结果, 均选择抽运光功率为 1 kW

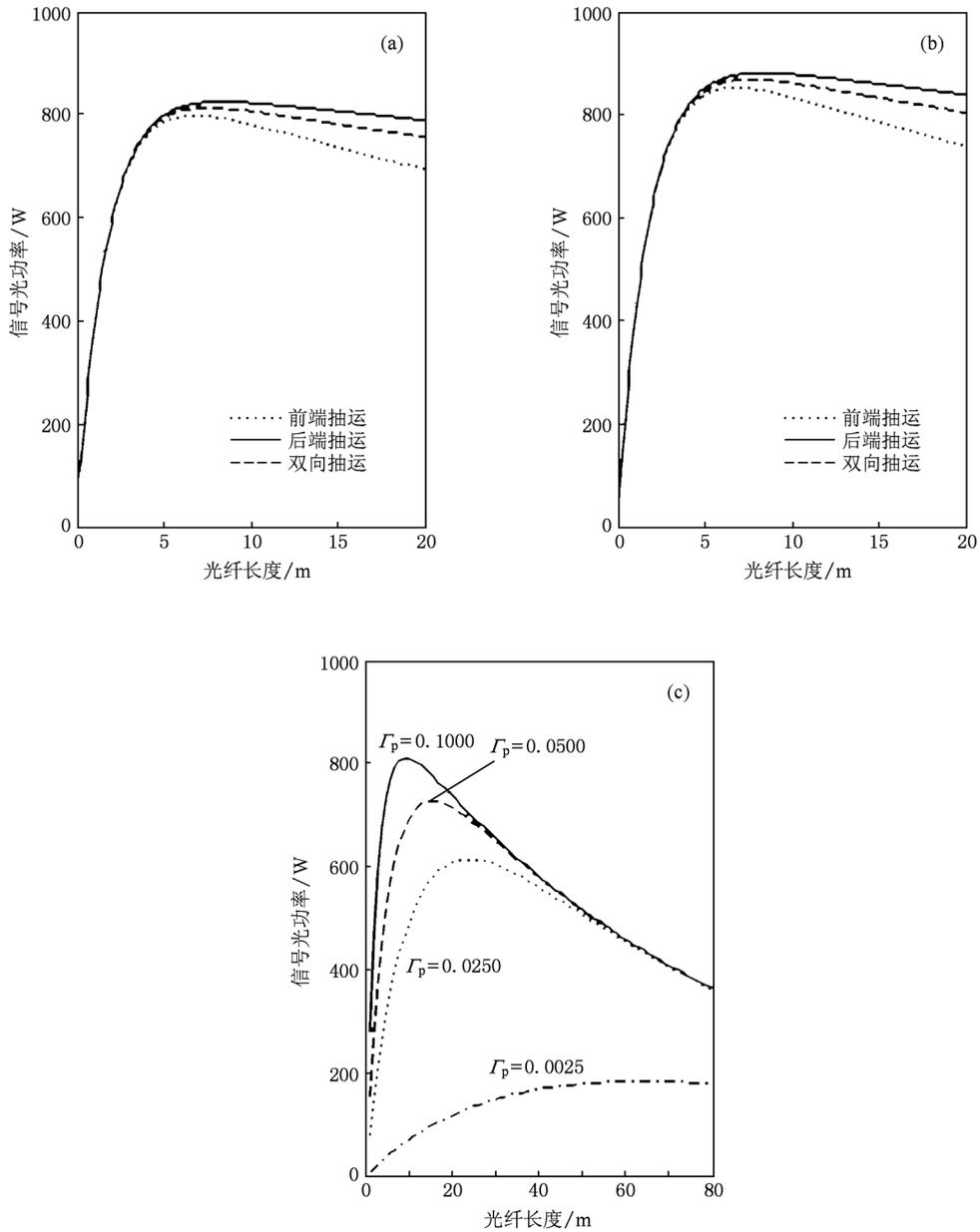


图4 抽运光功率为1 kW时不同增益光纤长度对应的输出端信号光功率 (a)  $\lambda_p = 975 \text{ nm}, \lambda_s = 1070 \text{ nm}$ ; (b)  $\lambda_p = 975 \text{ nm}, \lambda_s = 1018 \text{ nm}$ ; (c)  $\lambda_p = 1018 \text{ nm}, \lambda_s = 1070 \text{ nm}$

时对应的最佳光纤长度. 不同  $\Gamma_p$  对应的最佳光纤长度、阈值功率、斜率效率和总斜率效率如表 3 所列. 波长为 1018 nm 的激光抽运产生波长为 1070 nm 的信号光, 需要先由波长为 975 nm 的激光抽运产生波长为 1018 nm 的激光, 为表征二级抽运总的效率, 定义总斜率效率为两次抽运斜率效率之积. 计算总斜率效率时, 根据图 6 中的结果取波长为 975 nm 的激光抽运得到波长为 1018 nm 的激光的斜率效率为 84%.

从图 7 和表 3 可以看出, 当抽运功率填充因子

增大时, 对应的最佳光纤长度和激光阈值功率不断减小, 而斜率效率和二级抽运的总斜率效率不断增大. 因此, 抽运光波长为 1018 nm 时, 要提高光-光转换效率必须提高抽运功率填充因子, 使一部分抽运光有效地限制在纤芯中传输.

由上述计算结果可知, 波长为 975 nm 的激光直接抽运产生波长为 1070 nm 的信号光时斜率效率可达 80%, 高于二级抽运的总斜率效率; 二级抽运的总斜率效率与波长为 1018 nm 的激光抽运时所对应的抽运功率填充因子成正比.

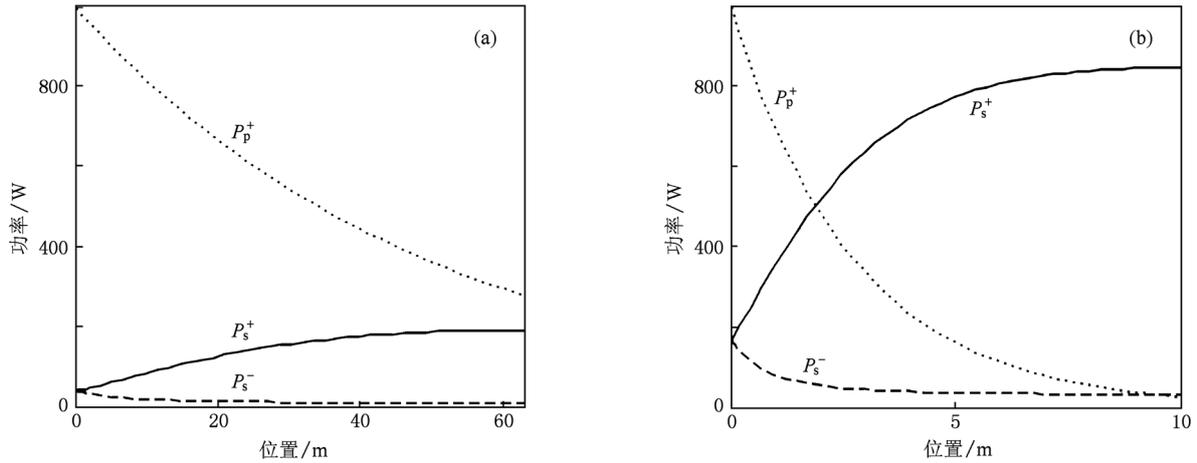


图5 抽运光和信号光功率沿光纤长度的分布 (a)  $\Gamma_p = 0.0025$ , (b)  $\Gamma_p = 0.1000$

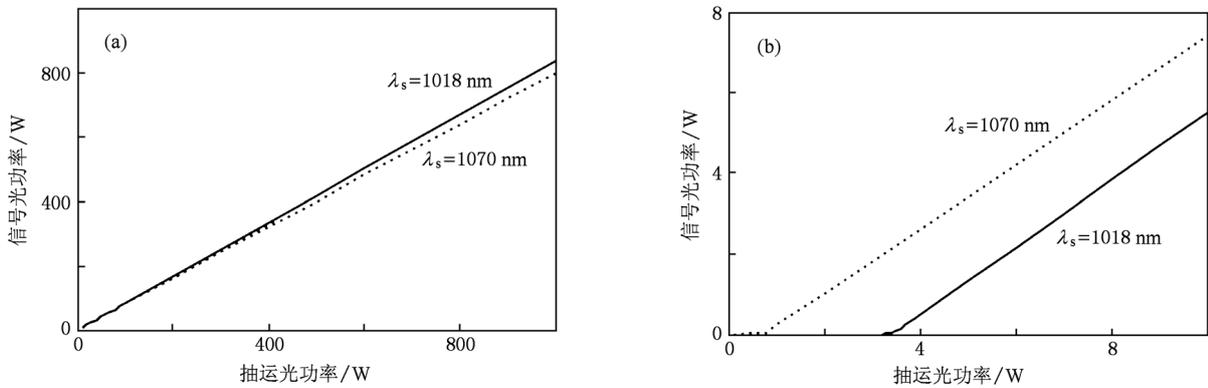


图6 波长为 975 nm 的激光抽运时输出端信号光功率与抽运光功率的关系 (b) 图为(a)图的局部放大

### 3.4. 温度分布

当抽运光波长为 975 nm, 信号光波长为 1070 nm 时, 光纤纤芯中心温度沿光纤长度的分布如图 8 所示, 图中实线对应前端抽运, 虚线对应双向抽运 (双向抽运时前后端抽运光功率相等). 参照表 2 取不同的对流传热系数, 图 8 (a), (b) 和 (c) 分别对应自然空气对流冷却、自然水对流冷却和强制水对流冷却时的情况.

从图 8 可以看出, 双向抽运的温度特性优于单端抽运. 由图 8 (a) 和 (b) 可知: 当抽运光功率为 1 kW 时, 纤芯中温度较高, 在自然空气对流冷却情况下纤芯极值温度高于 1000 °C, 超过了石英熔点; 若采取有效的自然水冷, 当  $H = 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$  时, 双向抽运可使纤芯极值温度降到 80 °C 以下. 由图 8 (c) 可知, 当抽运光功率为 10 kW 时, 光纤纤芯中心温度难以下降, 即使采用强制水对流冷却, 取表 2 中

的对流传热系数极值  $H = 10000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ , 纤芯中的极值温度仍然高于 150 °C.

对于如图 1 所示的光纤激光器, 二级抽运中波长为 1018 nm 的激光抽运放大波长为 1070 nm 信号光时会产生较多的热量, 该环节决定了二级抽运的温度特性. 当抽运光波长为 1018 nm, 信号光波长为 1070 nm 时, 光纤纤芯中心温度沿光纤长度的分布如图 9 所示, 图中实线对应前端抽运, 虚线对应双向抽运 (双向抽运时前后端抽运光功率相等).

对比图 8(b) 与图 9(a) 可知, 在同样的抽运光功率和冷却条件下, 二级抽运与直接抽运相比具有明显的热管理优势, 图 9(a) 中双向抽运和单端抽运时纤芯极值温度均低于 60 °C.

对比图 8(c) 与图 9(b) 可知, 当抽运光功率为 10 kW 时, 采用二级抽运技术时光纤纤芯温度可以得到有效控制. 图 9(b) 中  $H$  的取值  $5000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$  仅

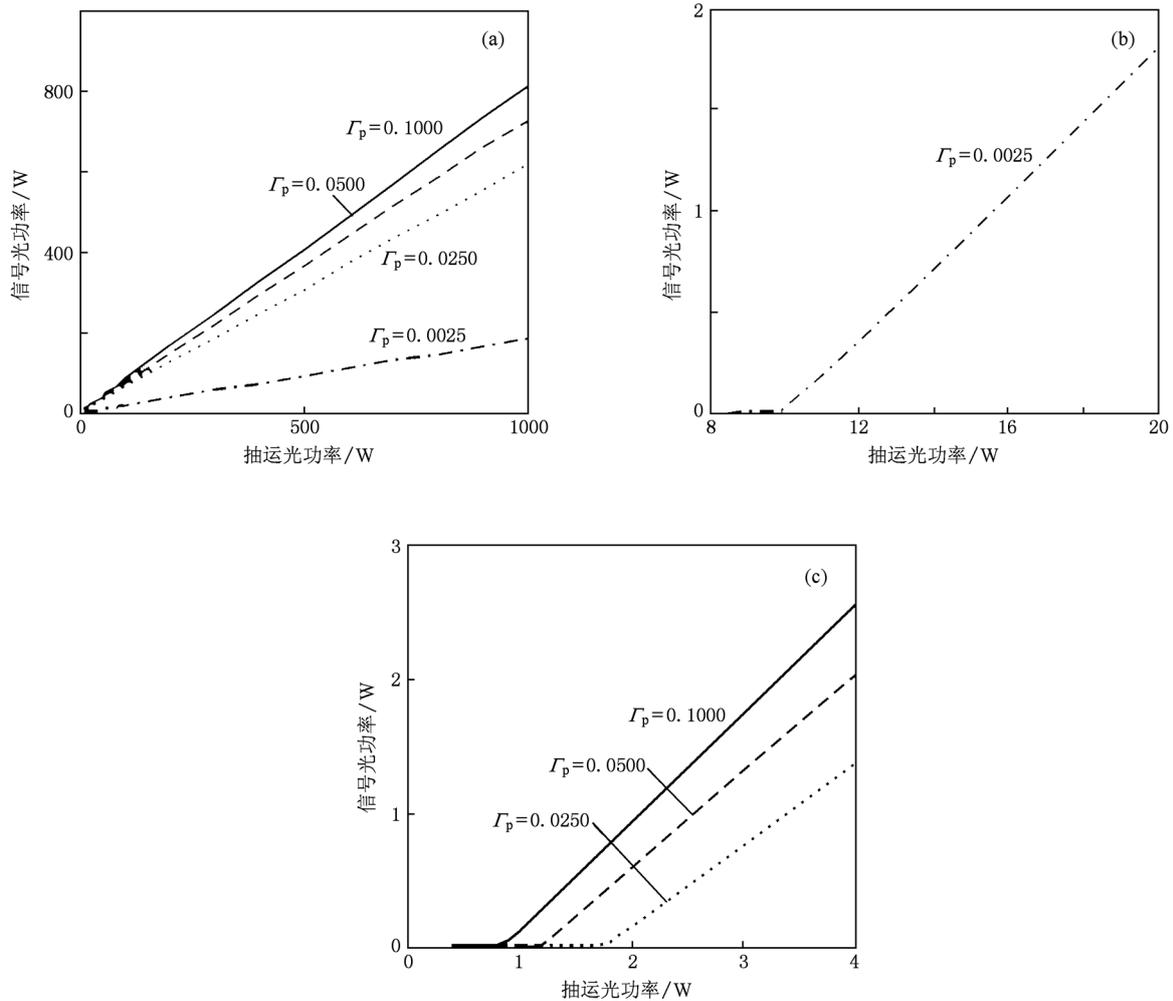


图7 波长为 1018 nm 的激光抽运时输出端信号光功率与抽运光功率的关系 (b)图和(c)图为(a)图的局部放大

表3  $\lambda_p = 1018 \text{ nm}$ ,  $\lambda_s = 1070 \text{ nm}$  时不同  $\Gamma_p$  对应的最佳光纤长度、阈值功率、斜率效率和总斜率效率

$\Gamma_p$	最佳光纤长度/m	阈值功率/W	斜率效率	总斜率效率
0.0025	63	10.0	18.5%	15.5%
0.0250	24	1.7	61.5%	51.7%
0.0500	16	1.2	72.7%	61.1%
0.1000	10	0.8	80.9%	68.0%

为图 8(c) 中的一半, 但温度比图 8(c) 中低很多. 图 9(b) 中单端抽运时纤芯极值温度为 120 °C, 双向抽运时纤芯极值温度低于 80 °C.

对比图 9(b) 与 (c) 可知, 当抽运功率填充因子由  $\Gamma_p = 0.1$  降到  $\Gamma_p = 0.05$  时温度特性得到了极大的改善. 图 9(c) 中  $H$  的取值  $2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  不足图 9(b) 中的一半, 但图 9(c) 中单端抽运时纤芯极值温度不足 100 °C, 双向抽运时纤芯极值温度低于 65 °C, 均优于图 9(b) 中的计算结果.

产生波长为 1070 nm 的信号光时, 与波长为

975 nm 的激光抽运相比, 波长为 1018 nm 的激光抽运量子损耗小, 而且掺镱光纤在 1018 nm 波长处吸收峰强度比 975 nm 波长处的吸收峰强度小得多, 因此波长为 1018 nm 的激光抽运在热管理上具有明显的优势, 二级抽运的温度特性优于直接抽运. 波长为 1018 nm 的激光抽运时, 降低抽运功率填充因子可以减轻热管理负担, 但同时光-光转换效率下降, 因此应当合理选择抽运功率填充因子, 在保证转换效率的同时获得较好的温度特性.

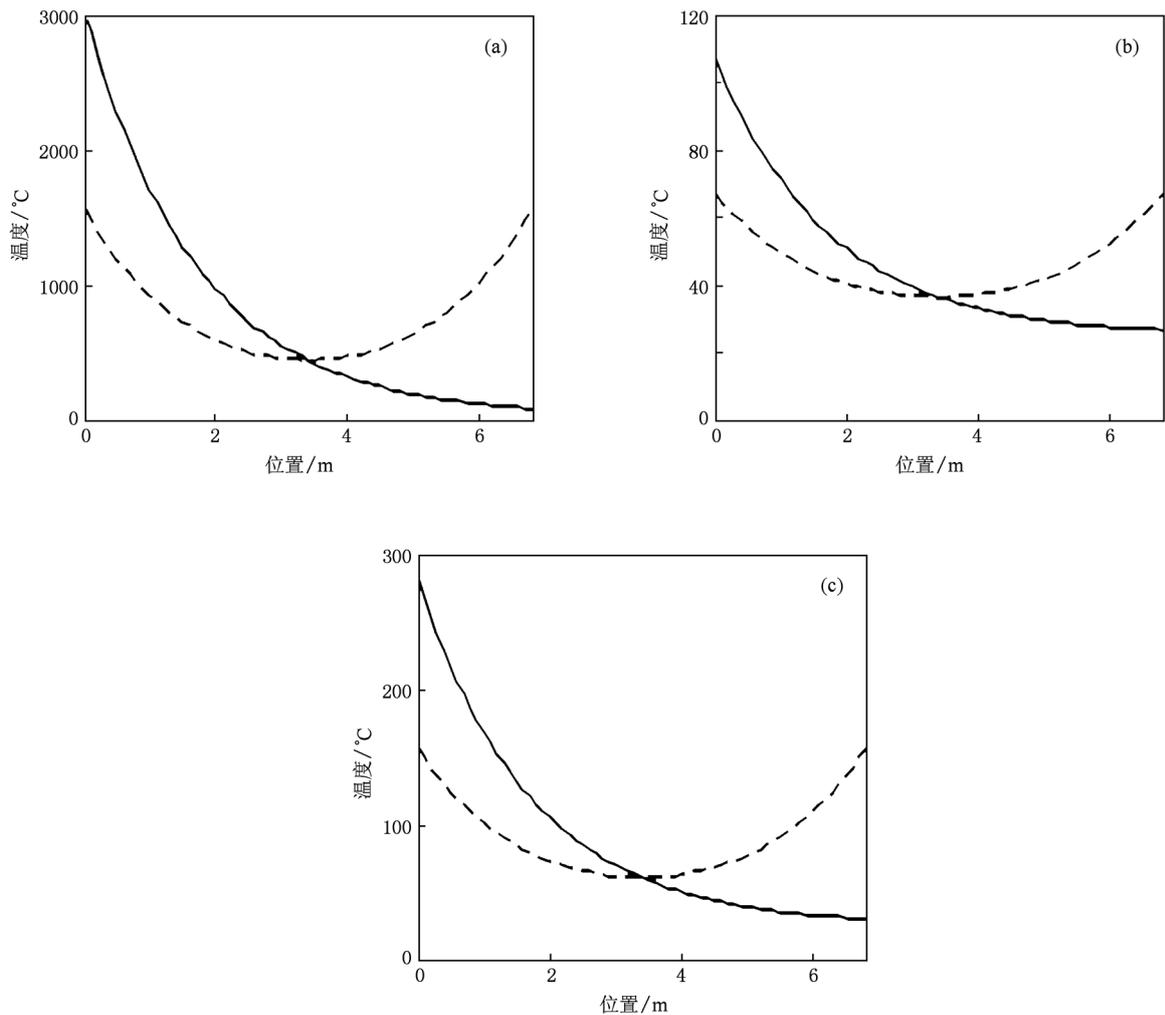


图 8  $\lambda_p = 975 \text{ nm}$ ,  $\lambda_s = 1070 \text{ nm}$  时光纤纤芯中心温度分布 实线对应前端抽运, 虚线对应双向抽运 (双向抽运时前后端抽运光功率相等). (a)  $P_p = 1 \text{ kW}$ ,  $H = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ; (b)  $P_p = 1 \text{ kW}$ ,  $H = 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ; (c)  $P_p = 10 \text{ kW}$ ,  $H = 10000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$

#### 4. 实现二级抽运的关键技术讨论

由以上分析可知, 二级抽运的斜率效率和温度分布特性均和波长为 1018 nm 的激光抽运时抽运功率填充因子有关.

如图 10 (a) 所示, 传统的包层抽运技术中抽运光在内包层中传输, 此时抽运功率填充因子较小. 若采用传统的包层抽运技术, 波长为 1018 nm 的激光抽运产生波长为 1070 nm 的信号光时, 抽运光的吸收系数小, 对应的斜率效率较低.

二级抽运中, 波长为 1018 nm 的激光抽运产生波长为 1070 nm 的信号光时斜率效率随抽运功率填充因子的增加而增大. 如图 10(b) 所示, 如果通过

有效的抽运耦合方式, 使更多的抽运光限制在纤芯中传输, 则可提高抽运功率填充因子, 从而提高二级抽运的斜率效率. 二级抽运过程中, 波长为 1018 nm 的激光为光纤激光器输出, 其光束发散角比激光二极管的输出光发散角小得多, 因此将更多的抽运光耦合到纤芯中传输是有可能实现的. 如图 1 所示, 光纤激光器中多个波长为 1018 nm 的激光经抽运合束器并束后可对信号光进行放大, 因此如何设计和制作适合二级抽运技术的增益光纤和抽运合束器是应该重点考虑的问题.

由温度分布的计算结果可知, 波长为 1018 nm 的激光抽运时通过降低抽运功率填充因子可以减轻热管理负担, 但同时会导致光-光转换效率减小. 因此, 应当合理提高抽运功率填充因子, 在保证转

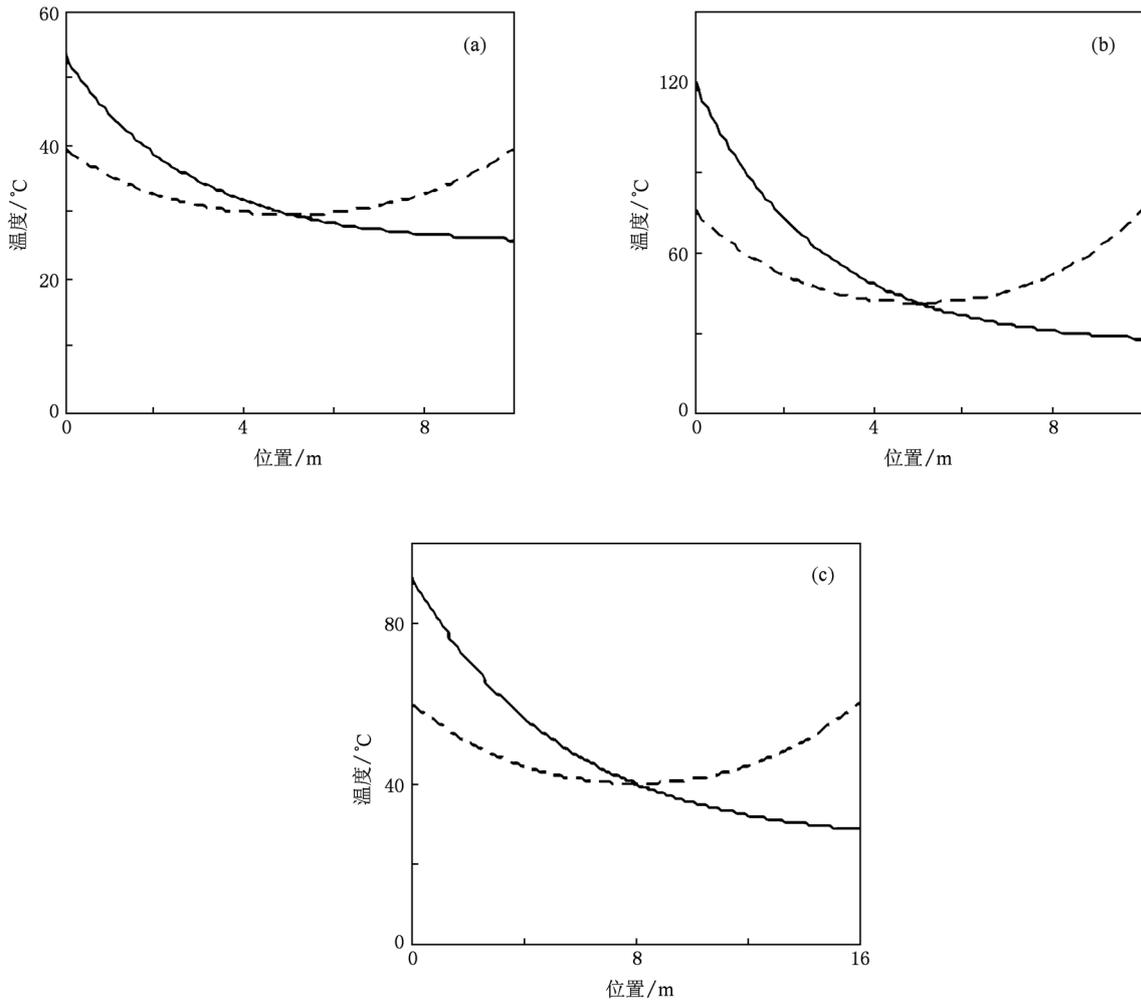


图9  $\lambda_p = 1018 \text{ nm}$ ,  $\lambda_s = 1070 \text{ nm}$  时光纤纤芯中心温度分布 实线对应前端抽运, 虚线对应双向抽运(双向抽运时前后端抽运功率相等). (a)  $P_p = 1 \text{ kW}$ ,  $\Gamma_p = 0.1000$ ,  $H = 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ; (b)  $P_p = 10 \text{ kW}$ ,  $\Gamma_p = 0.1000$ ,  $H = 5000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ; (c)  $P_p = 10 \text{ kW}$ ,  $\Gamma_p = 0.0500$ ,  $H = 2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$



图10 抽运光在双包层光纤中的传输示意图 (a)抽运光在内包层中传输, (b)部分抽运光在纤芯中传输

换效率的同时获得较好的温度特性,这正是二级抽运的关键技术所在.

## 5. 结 论

本文从激光速率方程和光纤内热传导方程出

发,从理论上对比分析了波长为  $975 \text{ nm}$  的激光直接抽运和二级抽运产生波长为  $1070 \text{ nm}$  的激光在斜率效率和热管理上的优缺点.数值计算结果表明:当波长为  $975 \text{ nm}$  的激光直接抽运产生波长为  $1070 \text{ nm}$  的激光时,斜率效率为  $80\%$ .二级抽运中,波长为  $975 \text{ nm}$  的激光抽运产生波长为  $1018$

nm 的激光时,斜率效率可达 84%,波长为 1018 nm 的激光抽运产生波长为 1070 nm 的激光时,斜率效率与抽运功率填充因子  $\Gamma_p$  有关.若采用传统的包层抽运技术,抽运功率填充因子  $\Gamma_p = 0.0025$ ,波长为 1018 nm 的激光抽运产生波长为 1070 nm 的激光时斜率效率不足 20%,适当提高抽运功率填充因子使部分抽运光有效地限制在纤芯中传输可提高斜率效率,当  $\Gamma_p = 0.1$  时斜率效率可达 80.9%,从而二级抽运总斜率效率为 68%.波长为 975 nm 的激光直接抽运产生波长为 1070 nm 的激光会产生较

多的热耗散,当抽运光功率为 1 kW 时,采取有效水冷可使纤芯极值温度低于 100 °C,但当抽运光功率高达 10 kW 时,即使采用强制水冷,纤芯极值温度也难以降到 150 °C 以下.二级抽运时即使抽运光功率到达 10 kW,采用适当的强制水冷就可使纤芯极值温度降到 100 °C 以下.总之,二级抽运在斜率效率上不如直接抽运,但在热管理上具有明显的优势.二级抽运的关键技术在于如何合理提高抽运功率填充因子,在保证转换效率的同时获得较好的温度特性.

- [1] Jeong Y, Sahu J, Payne D, Nilsson J 2004 *Opt. Express* **12** 6088
- [2] Pan L L, Zhang B, Yin S Q, Zhang Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8289 (in Chinese) [潘雷雷、张彬、阴素芹、张艳 2009 物理学报 **58** 8289]
- [3] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, Ma H T, Xu X J, Liu Z J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014202
- [4] Hecht J 2009 *Laser Focus World* **45** 53
- [5] Kelson I, Hardy A 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 1570
- [6] Kelson I, Hardy A 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 891
- [7] Wang Y, Xu C Q, Po H 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 63
- [8] Luis Z 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 1435
- [9] Brown D C, Hoffman H J 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 207
- [10] Zhu H T, Lou Q H, Zhou J, Qi Y F, Dong J X, Wei Y R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4966 (in Chinese) [朱洪涛、楼祺洪、周军、漆云凤、董景星、魏运荣 2008 物理学报 **57** 4966]
- [11] Xue D, Zhou J, Lou Q H, Shuan M D 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 1013 (in Chinese) [薛冬、周军、楼祺洪、帅敏东 2009 强激光与粒子束 **21** 1013]

## Theoretical analysis of two-stage pumping technology for high power fiber lasers

Yang Wei-Qiang<sup>†</sup> Hou Jing Song Rui Liu Ze-Jin

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 24 May 2010; revised manuscript received 28 March 2011)

### Abstract

The problems of direct pumping and two-stage pumping for high power fiber lasers are theoretically analyzed. The simulation results show that 1070 nm laser directly pumped by 975 nm laser provides a theoretical slope efficiency up to 80%. But it is hard to make the highest temperature of the fiber core reduce below 150 °C by forced water cooling when pump power is 10 kW. For the two-stage pumping technology, if the conventional cladding pumping technology is used the slope efficiency is less than 20% when a 1070 nm laser is pumped by a 1018 nm laser. With the pump power filling factor increasing from 0.0025 to 0.1, the slope efficiency can be raised from 18.5% to 80.9%, thus the total slope efficiency is raised from 15.5% to 68%. Two-stage pumping is inferior to direct pumping in terms of slope efficiency, but it has the obvious advantage of thermal management. How to raise the pump power filling factor to achieve high slope efficiency and good temperature characteristics at the same time is the key technology of the two-stage pumping.

**Keywords:** two-stage pumping, power filling factor, slope efficiency, thermal management

**PACS:** 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.60.By

---

<sup>†</sup> E-mail: yangweiqiang\_001@126.com