

# 千瓦级双包层光纤激光器冷却方案 设计理论和实验研究\*

朱洪涛<sup>1)†</sup> 楼祺洪<sup>1)</sup> 周 军<sup>1)</sup> 漆云凤<sup>1)</sup> 董景星<sup>1)</sup> 魏运荣<sup>1)</sup>

1) 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

2) 中国人民解放军工程兵指挥学院, 徐州 221004)

(2007 年 8 月 12 日收到, 2008 年 2 月 26 日收到修改稿)

尽管双包层光纤激光器的散热性能好于传统的固体激光器的散热性能, 光纤激光器中的热沉积仍然是限制提高其输出功率的重要因素. 以双端抽运的 400 W 双包层光纤激光器为实例, 定量分析了光纤内的热沉积分布. 根据所建立的散热模型, 为了确保千瓦级双包层光纤激光器安全稳定的运行, 抽运端附近的对流换热系数应大于  $2.8 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . 据此设计出高功率双包层光纤激光器抽运端冷却装置并成功应用在激光系统中, 获得了千瓦级的激光输出.

关键词: 热沉积, 散热, 双包层光纤激光器

PACC: 4255R, 4260

## 1. 引 言

由于双包层光纤激光器采用细长的掺杂光纤作为增益介质, 表面积与体积比是传统固体块状激光介质的 1000 倍以上, 因此散热性能非常好. 近几年, 双包层光纤激光器获得了快速的发展, 其输出功率逐年提高, 已引起人们的广泛关注<sup>[1, 2]</sup>. 虽然双包层光纤激光器的散热特性非常好, 但是如果抽运光足够强, 光纤内的热沉积也会导致严重的问题, 例如: 由于基质材料热扩散而引起的应力和折射率变化, 光纤包层的热致老化、损伤, 严重时会出现光纤炸裂<sup>[3]</sup>等. 特别是对于掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器, 如果掺杂光纤的温度升高, 将增加激光下能级的热粒子数, 从而导致激光器阈值功率提高和斜率效率下降<sup>[4]</sup>.

对于几十瓦甚至上百瓦的双包层光纤激光器, 由于其固有的优良散热特性, 仅靠其自然散热基本上就可以安全高效运行, 而无需再考虑特殊的散热措施. 但是, 当单根光纤激光器的输出功率为几百瓦乃至上千瓦时, 光纤激光器的热效应问题就应引起足够的重视. 光纤激光介质内的热沉积及其分布是

光纤激光器热效应的根本问题, 国内外对此已经开展了较广泛的理论研究<sup>[5, 6]</sup>, 但由于技术的保密性, 对提高光纤激光器热处理能力的相关实验研究的文献资料还非常少.

中国科学院上海光学精密机械研究所在研发百瓦级双包层光纤激光器的实验工作中已经遇到了热效应问题, 并通过优化实验方案来改善双包层光纤激光器的热性能, 从而提高激光器的输出功率. 以 400 W 双包层光纤激光器为例, 探讨改善高功率双包层光纤激光器热问题的方法, 并在此基础上设计出光纤激光器抽运端冷却装置, 在实验研究中获得了千瓦级的激光输出.

## 2. 400 W 双包层光纤激光器的实验现象

双端抽运双包层光纤激光器实验装置如图 1 所示<sup>[7]</sup>. 双包层光纤具有 D 形内包层 (400/450  $\mu\text{m}$ ), 纤芯直径为 30  $\mu\text{m}$ , 光纤吸收系数约为 1.5 dB/m. 双包层光纤长度约为 15 m, 均匀缠绕在铝光纤盘上, 铝盘上刻有 V 形槽以增加光纤与铝盘的接触面积以获得良好的散热性能, 同时在光纤两端设计了带 V 形槽的金属夹具并带有水冷装置用来加强光纤头部

\* 上海市科学技术委员会光科技专项行动计划 (批准号 05DZ22001) 和国家高技术研究发展计划 (批准号 2008AA03Z405) 资助的课题.

† E-mail: zhht\_1975@yahoo.com.cn

的散热. 通过以下的理论研究将会看到, 与百瓦级双包层光纤激光器相比, 这些简单的散热方式的改进可以有效地降低光纤纤芯的工作温度, 提高激光器的热处理能力.

图 1 中由一个双色镜和光纤的输出端面构成谐振腔, 激光束经 20° 放置的另一双色镜反射输出. 双色镜在 975 nm 处的透过率约为 95%; 在 1080—1150 nm 范围内的反射率大于 99.8%. 半导体激光器的抽运波长为 975 nm, 光纤激光器的输出波长为 1100 nm, 激光器的输出功率与抽运入纤功率的关系如图 2 所示.

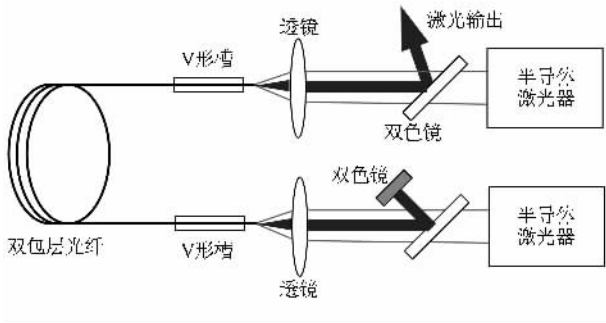


图 1 双端抽运双包层光纤激光器实验装置示意图

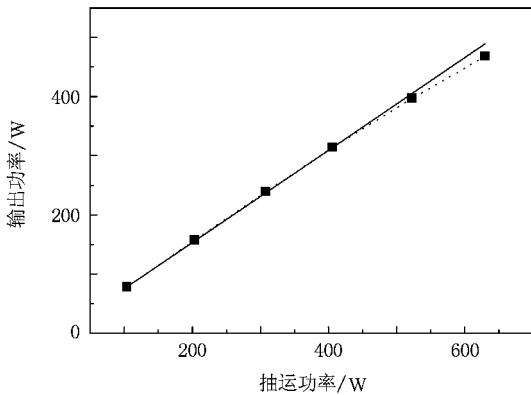


图 2 400 W 光纤激光器输出功率与抽运功率的关系

对实验结果的分析可知, 在抽运入纤功率小于

406 W 时(激光输出功率小于 314 W), 激光器的斜率效率为 79%. 继续增加抽运入纤功率, 激光器的斜率效率发生下降, 在抽运入纤功率约为 630 W 时(激光输出功率约为 468 W), 斜率效率下降到 74%. 这表明进一步提高该光纤激光器的输出功率, 将受到热效应的制约. 为了把该光纤激光器的输出功率提高到千瓦级水平, 必须改善激光器的散热性能, 下面将对其进行理论分析.

### 3. 400 W 双包层光纤激光器热性能实例分析

研究双包层光纤激光器的热效应问题首先要确定光纤内的热沉积分布. 在理想情况下, 抽运光子与激光光子之间的能量亏损是激光介质内唯一的发热因素. 对于掺镱光纤激光器, 可以认为光纤介质内的热沉积分布与吸收的抽运光分布是基本一致的. 因此, 如果确定了光纤内吸收的抽运功率分布就能够得出其中的热沉积分布. 这里以 400 W 双端抽运的双包层光纤激光器为例, 分析光纤中的热沉积分布.

#### 3.1. 抽运功率在光纤内的分布

图 3 为双端抽运双包层光纤激光器的结构示意图. 图中的光纤长度为  $L$ , 纤芯半径为  $r$ , 两端的抽运功率分别为  $P_1$  和  $P_r$ ,  $P_p^+(z)$  和  $P_p^-(z)$  分别为沿  $z$  轴正向和反向传输的抽运功率,  $P_s^+(z)$  和  $P_s^-(z)$  分别为沿  $z$  轴正向和反向传输的激光功率,  $R_{s1}$  和  $R_{sr}$  分别为两端面对激光的反射率,  $R_{p1}$  和  $R_{pr}$  分别为两端面对抽运光的反射率. 这样, 光纤纤芯内任意处吸收的抽运功率密度  $\rho(z)$  可表示为

$$\begin{aligned} \rho(z) &= \frac{1}{\pi r^2} \left( \left| \frac{dP_p^+}{dz} \right| + \left| \frac{dP_p^-}{dz} \right| \right) \\ &= \frac{1}{\pi r^2} \left( \frac{dP_p^+}{dz} - \frac{dP_p^-}{dz} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

通过求解速率方程组<sup>[8]</sup>, 就可以得到光纤内的功率

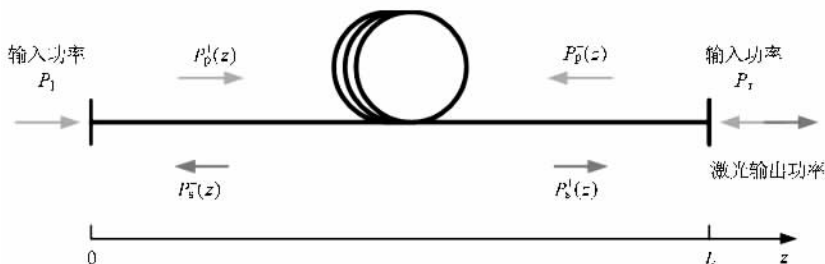


图 3 双端抽运双包层光纤激光器结构示意图

密度分布,结果如图 4 所示.

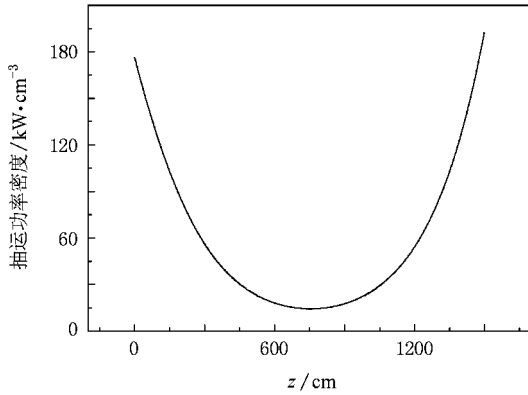


图 4 抽运功率密度沿光纤长度方向的分布

### 3.2. 双包层光纤温度分布

如上所述,根据抽运功率在光纤内分布可以方便地得到光纤内热沉积的分布,在此基础上就可以进一步分析双包层光纤的温度分布,为此建立一个求解其温度分布的模型.首先,因为光纤的长度远远大于光纤的横向尺寸,可以假定热流仅限于光纤径向.其次,虽然双包层光纤的内包层通常并不是圆形,但考虑到光纤的热问题主要来源于纤芯,而纤芯的尺寸又远小于内包层的尺寸,因此可以使用圆形内包层来分析和建立模型,如图 5 所示.图 5 中,区域 I、区域 II 和区域 III 分别表示掺杂纤芯、内包层和外包层,对应的半径分别为  $a$ 、 $b$  和  $c$ .

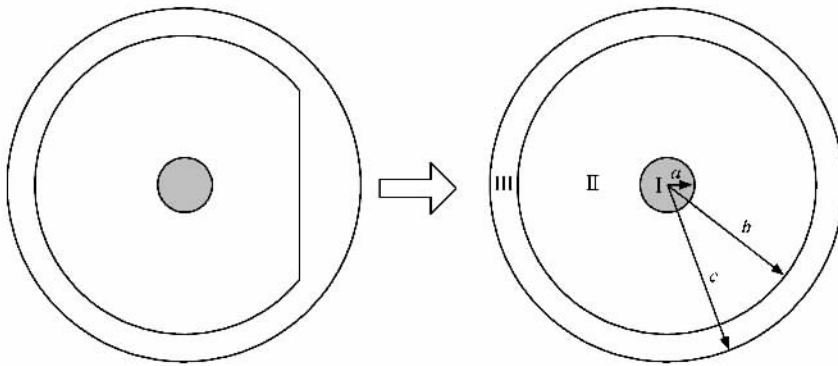


图 5 求解光纤温度分布的模型

双包层光纤激光器达到稳定激光输出后,其温度分布也将达到稳态分布,对应的温度分布应满足下列方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T(r)}{\partial r} \right) = - \frac{q}{k}, \quad (2)$$

式中  $r$  为距纤芯中心的距离,  $T(r)$  为  $r$  处的温度,  $q$  为单位体积的热功率密度,  $k$  为导热系数.其温度分布还应满足下列边界条件:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0, \\ k_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=c} &= h [T_c - T_3(r=c)], \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $T_c$  为光纤表面冷却介质温度,  $h$  为光纤表面对流换热系数.根据热传导方程、边界条件及各区域边界间的热流守恒条件,可以解得各区间的温度为

$$T_1(r) = T_0 - \frac{1}{4} \frac{q_1 r^2}{k_1}, \quad (4)$$

$$T_2 = T_0 - \frac{q_1 a^2}{4k_1} - \frac{q_1 a^2}{2k_2} \ln\left(\frac{r}{a}\right), \quad (5)$$

$$T_3 = T_0 - \frac{q_1 a^2}{4k_1} - \frac{q_1 a^2}{2k_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) - \frac{q_1 a^2}{2k_3} \ln\left(\frac{r}{b}\right), \quad (6)$$

$$T_0 = T_c + \frac{q_1 a^2}{2hc} + \frac{q_1 a^2}{4k_1} + \frac{q_1 a^2}{2k_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{q_1 a^2}{2k_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right), \quad (7)$$

式中  $q_1$  表示纤芯的热功率密度,  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$  分别为区域 I、区域 II 和区域 III 的导热系数,  $T_0$  为光纤纤芯中心的温度.

根据已求得的双包层光纤内的热功率密度分布和双包层光纤参数  $a = 15 \mu\text{m}$ ,  $b = 225 \mu\text{m}$ ,  $c = 325 \mu\text{m}$ ,  $k_1 = k_2 = 1.38 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $k_3 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $h = 5.0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ,  $T_c = 293 \text{ }^\circ\text{C}$ , 就可以得到 400 W 双包层光纤激光器的二维温度分布.根据热功率的分布,求解(7)式可以得到双包层光纤纤芯中心的温度分布,如图 6 所示.根据某处的热功率密度,求解(4)–(6)式可以得到光纤的径向温度分布,图 7 是距离左端 1 cm 处的径向温度分布.

从图 4 和图 6 可以看出,对于双端抽运的光纤

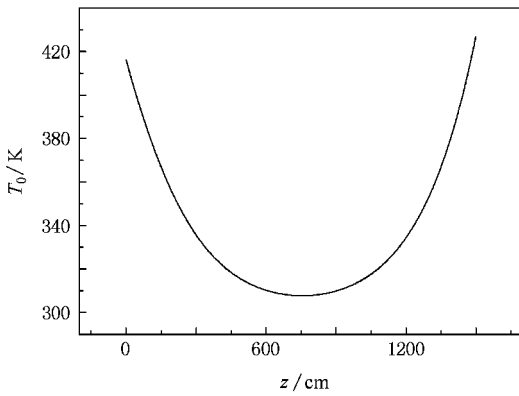


图 6 双包层光纤纤芯中心温度轴向 ( $z$  方向) 的分布 对流换热系数  $h = 5.0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$

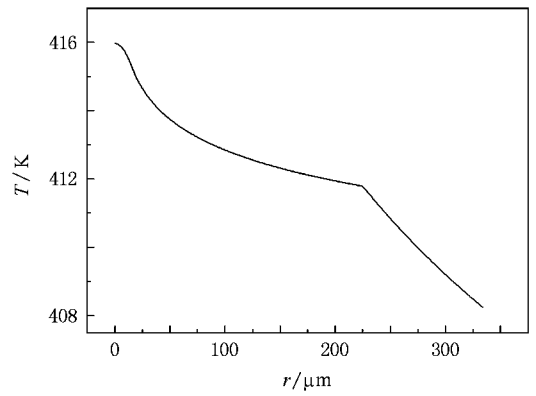


图 7 双包层光纤径向温度分布 热功率密度  $q = 1.6 \times 10 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$

激光器,热沉积主要集中在抽运端附近,因而这里的温升最为严重.此外,根据图 6 和图 7 可以得到轴向平均温度梯度约为  $0.15 \text{ K} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,而径向平均温度梯度约为  $229.8 \text{ K} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,径向温度梯度远大于轴向温度梯度,这表明在热传导过程中,热量的确主要是沿径向传输的,计算结果与假设是自洽的.

#### 4. 光纤表面对流换热系数对光纤温升的影响

从光纤中心温度表达式(7)可以知道,对于指定的双包层光纤,其表面与空气的对流换热系数是影响光纤散热能力的唯一因素.由于它数值比较小,因

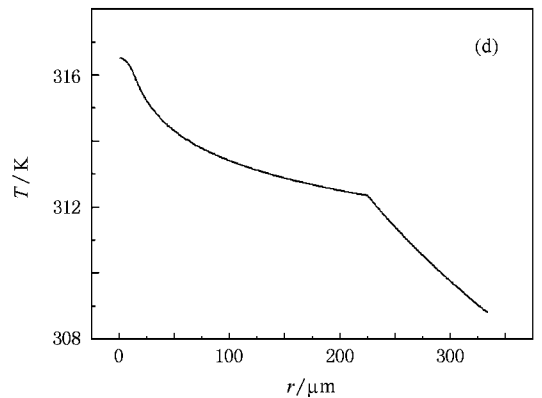
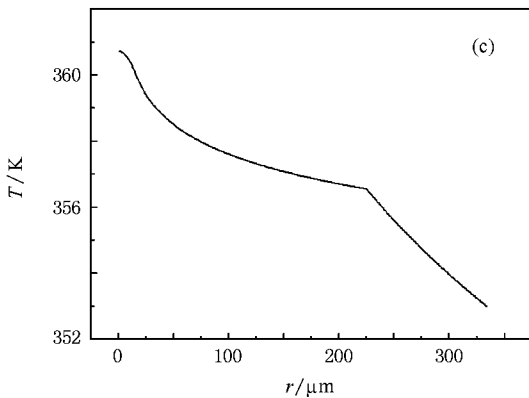
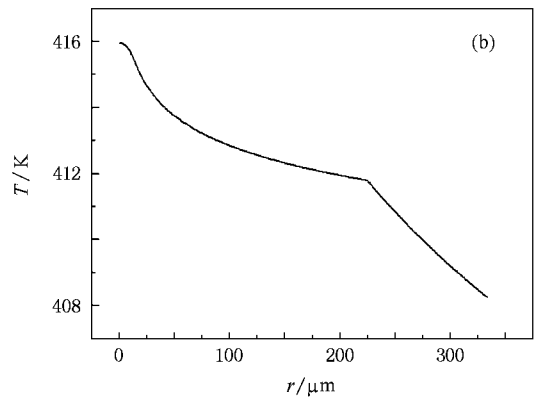
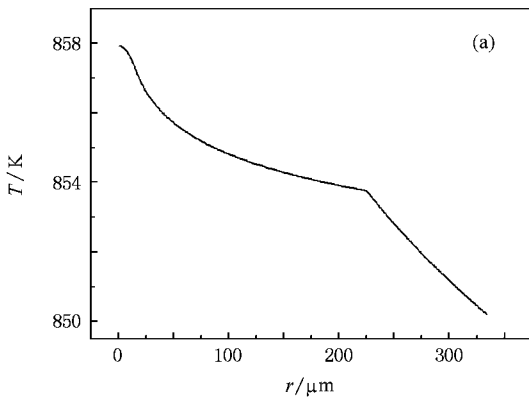


图 8 光纤表面换热系数对光纤径向温度  $T$  的影响 (a)自然空气冷却,  $h = 1.0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (b)铝散热片,  $h = 5.0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (c)风扇散热,  $h = 1.0 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (d)水冷,  $h = 5.0 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$

而纤芯温度的高低对表面换热系数的变化非常敏感.下面将定量研究表面换热系数对光纤纤芯温度的影响.

以靠近光纤左端面 1 cm 处为例,热功率密度为  $1.6 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,计算不同冷却条件下(自然空气冷却、铝散热片、风扇冷却、水冷)换热系数对光纤径向温度分布的影响,计算结果如图 8 所示.

图 8 表明,通过增加光纤表面换热系数,光纤纤芯温度得到急剧降低.如果光纤激光器仅仅靠空气自然对流散热,纤芯中心温度将达 858 K,这么高的温升将会显著降低增益介质的量子效率,最终影响激光器的斜率效率.在自然空气冷却的条件下,外包层的温度约为 850 K,根据文献[3]关于光纤损伤的研究结果,如果外包层的工作温度大于 353 K,外包层将会逐渐发生老化甚至烧毁从而失去作用,影响光纤激光器的稳定性和使用寿命.因而,虽然纤芯的温度低于石英的熔点(1982 K),但是光纤外包层的温度已经远远超出安全范围.

为了实现高功率光纤激光器高效、稳定的运行,必须使其工作在许可的温度下.实验中所采取的措施是通过把光纤缠绕在铝盘上(铝盘上刻有 V 形槽以增加光纤与铝盘的接触面积)来增加换热系数,这样可以大大降低光纤纤芯以及包层的温度.虽然如此,如果要进一步提高该光纤激光器的输出功率,纤芯和光纤表面的温度都会随之升高,现有的冷却散热条件将不能够保证激光器高效、安全运行.

## 5. 千瓦级双包层光纤激光器输出端冷却方案及实验结果

对于同一台激光器,如果不考虑热效应导致斜率效率下降,在增加激光输出功率时热功率也将线性增加.因此,要把 400 W 光纤激光器的输出功率提高到 1 kW,靠近光纤端面 1 cm 处热功率密度将增加到  $3.6 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,此时纤芯温度与光纤表面对流换热系数的关系如图 9 所示.

如果设定激光器安全高效运行的纤芯温度为 360 K,根据图 9 可知,要获得安全稳定的 1 kW 激光输出,必须把表面换热系数增加到  $2.8 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ,显然,通过风冷的方式是不能满足光纤激光器的冷却要求.在对 400 W 光纤激光器进一步优化基础上,设计并应用高功率双包层光纤激光器光纤头部冷却装置,成功研制出高效、安全运行的

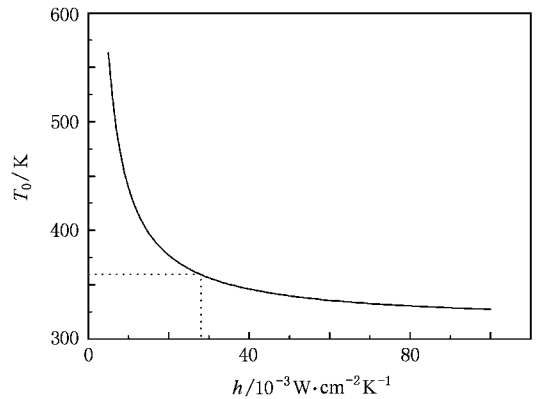


图 9 千瓦级光纤激光器纤芯中心温度  $T_0$  与光纤表面换热系数  $h$  的关系

千瓦级双包层光纤激光器,其激光输出功率特性如图 10 所示.

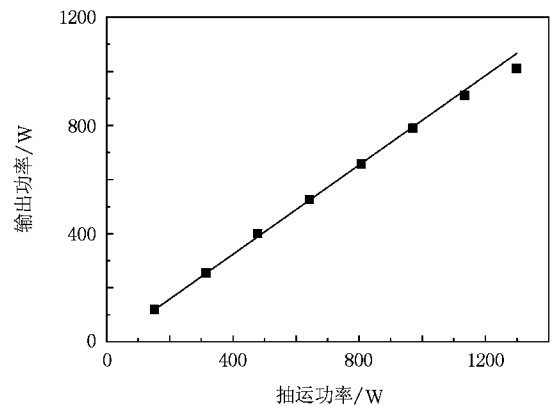


图 10 千瓦级激光器输出功率与抽运功率的关系

## 6. 结 论

虽然光纤激光器具有良好的热性能,但是光纤介质的温升仍然是制约提高输出功率水平的重要因素.对 400 W 双包层光纤激光器中的热问题进行实例分析,通过求解热功率分布和建立温度分析模型,研究千瓦光纤激光器所需的冷却条件.要获得安全稳定的千瓦级激光输出,光纤表面换热系数要大于  $2.8 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .在此基础上设计出高功率光纤激光器端部冷却装置,并应用于光纤激光器系统,获得千瓦级激光输出.本文的研究结果将对进一步提高双包层光纤激光器的热处理能力具有参考价值.

- [ 1 ] Jeony Y , Sahu J K , Payne D N , Nilsson J 2004 *Electron . Lett .* **40** 470
- [ 2 ] Fu S G , Fan W D , Zhang Q , Wang Z , Li L J , Zhang C S , Yuan S Z , Dong X Y 2004 *Acta Phys . Sin .* **53** 4262 ( in Chinese ) [ 付圣贵、范万德、张 强、王 志、李丽君、张春书、袁树忠、董孝义 2004 *物理学报* **53** 4262 ]
- [ 3 ] Carter A , Samson B , Tankala K , Machewirth D P , Khitrov V , Manyam U H , Gonthier F , Seguin F 2005 *Proc . SPIE* **5647** 561
- [ 4 ] Zhou J , Lou Q H , Kong L H , Dong J X , Wei Y R 2004 *Chin . Phys . Lett .* **21** 1083
- [ 5 ] Brown D C , Hoffman H J 2001 *IEEE J . Quantum Electron .* **37** 207
- [ 6 ] Wang Y 2004 *IEEE J . Quantum Electron .* **40** 731
- [ 7 ] Xue D , Lou Q H , Zhou J , Dong J X , Wei Y R 2007 *Opt . Laser Technol .* **39** 871
- [ 8 ] Kelson I , Hardy A 1999 *J . Lightwave Tech .* **17** 891

## Experimental and theoretical study on designing of cooling device for the kilowatt-level double cladding fiber laser \*

Zhu Hong-Tao<sup>1,2)†</sup> Lou Qi-Hong<sup>1)</sup> Zhou Jun<sup>1)</sup> Qi Yun-Feng<sup>1)</sup> Dong Jing-Xing<sup>1)</sup> Wei Yun-Rong<sup>1)</sup>

1 *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China )*

2 *Engineer Command Institute of the People 's Liberation Army , Xuzhou 221004 , China )*

( Received 12 August 2007 ; revised manuscript received 26 February 2008 )

### Abstract

Though the double cladding fiber ( DCF ) laser 's ability of heat dissipation is better than the traditional solid-state laser 's , the heat generation in double-cladding fiber laser is the bottleneck in the development of high power lasers . The distribution of heat deposition in the practical 400 W DCF laser is quantitatively analyzed for the first time . Based on the heat dissipation model developed in this work , in order to ensure the safe and stable operation of the kilowatt-level DCF laser , the convective coefficient near the pumping ends should be greater than  $2.8 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  . The cooling device for high power DCF laser 's pumping ends was designed and successfully used in a laser system , and the output power of 1 kW was obtained .

**Keywords :** heat generation , heat dissipation , double cladding fiber laser

**PACC :** 4255R , 4260

\* Project supported by the Optical Science and Technology Program from the Committee of Science and Technology of Shanghai , China ( Grant No. 05DZ22001 ) and the National High Technology Development Program of China ( Grant No. 2008AA03Z405 ) .

† E-mail : zhht\_1975@yahoo.com.cn