

双包层光子晶体光纤激光器散热能力的理论研究*

朱洪涛^{1,2}, 楼祺洪¹, 周军¹, 漆云凤¹, 董景星¹, 魏运荣¹

(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)

摘 要:通过比较在相同发热功率和散热条件下双包层光子晶体光纤和传统双包层光纤的温度分布, 考察了双包层光子晶体光纤的散热能力. 数值研究结果表明: 双包层光子晶体光纤的散热能力要弱于后者; 但从总体来看, 传统双包层光纤和光子晶体光纤的热性能对激光器的激光性能的影响是近乎相同的.

关键词:光子晶体; 双包层光纤; 散热

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)01-0060-4

0 引言

相对于常规光纤激光器来说, 双包层光纤激光器克服了在泵浦功率和泵浦效率方面的限制, 是光纤激光器发展过程中具有重大意义的技术突破. 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/体积比很大(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, 其输出功率得到了不断的提高^[1]. 然而, 进一步提高双包层光纤激光器的输出功率将首先受到来自于光纤自身的限制: 一是光纤端面的光损伤; 二是光纤中的非线性效应, 此外还将受到热效应的制约^[2-3]. 实验研究结果表明, 为了保证激光器安全可靠的运行, 掺杂石英纤芯端面的光功率面密度一般不得超过 $2\text{W}/\mu\text{m}^2$, 因此纤芯的面积将制约激光器的最大输出功率. 另一方面, 由于双包层光纤激光器纤芯中的激光功率密度非常高且光纤较长, 非线性效应出现的可能性就很大, 其中主要的非线性效应是光纤中的受激布里渊散射.

为了克服端面激光损伤和非线性效应给功率提高带来的限制, 各国研究人员都采用了大模场面积光纤. 然而, 对于传统双包层光纤激光器来说, 增加纤芯尺寸又将会引起光束质量下降, 激光功率和光束质量存在着内在的矛盾. 因此, 如何在增加有效模场面积的同时控制激光束的模式又成为一个重要的研究课题.

光子晶体光纤与传统光纤相比, 由于其独特的导光机制, 光子晶体光纤在实际应用中展示出越来

越多的优越性^[4-5]. 近年来, 国内外已经开展双包层光子晶体光纤激光器的实验研究^[6-9]. 理论上来说, 使用双包层光子晶体光纤代替传统的双包层光纤更有利于提高泵浦功率和效率以及增加模场面积和控制光束质量. 然而, 由于双包层光子晶体光纤的包层中存在很多气孔, 特别是外包层是由一个大气孔环构成的, 而空气的导热能力很差, 因此, 双包层光子晶体光纤的散热能力是个值得关注的问题. 本工作将通过与传统双包层光纤的散热能力的对比来考察双包层光子晶体光纤的散热能力.

1 双包层光子晶体光纤温度模型

以双包层光子晶体光纤激光器中常见的结构为例^[10], 如图 1. 纤芯直径 $24\ \mu\text{m}$, 内包层直径为 $270\ \mu\text{m}$, 气孔包层的厚度为 $20\ \mu\text{m}$ (气孔数为 90, 气孔间石英厚度为 $350\ \text{nm}$), 外包层直径为 $360\ \mu\text{m}$, 涂敷层厚度为 $20\ \mu\text{m}$. 双包层光子晶体光纤的热传导模型如图 2(a), 其中: I 区代表掺杂石英纤芯, II 区是布有气孔的石英包层, III 区是空气包层, IV 区是石英包层, V 区是光纤的涂覆层, 相同尺寸的传统双包层光纤(用石英代替外包层气孔)的热传导模型如图 2(b).

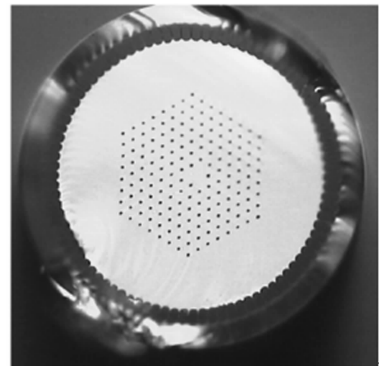


图 1 双包层光子晶体光纤端面 SEM 图

Fig. 1 SEM image of the end surface of the double-cladding photonic crystal fiber

* 上海市科委光科技专项(05DZ22001)和国家高技术 863 计划资助

Tel: 029-69918639 Email: zhht_1975@yahoo. com. cn

收稿日期: 2007-08-13

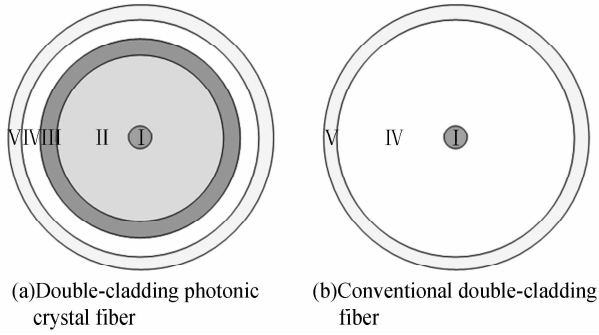


图 2 双包层光纤温度分布计算模型

Fig. 2 The models for calculating the distributions of temperature in the double-cladding fiber

当激光器达到稳定激光输出后,其温度分布也达到稳态,径向温度分布应满足

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

式中, r 是距纤芯中心的距离, $T(r)$ 是 r 处的温度, q 是单位体积的热功率密度, k 是导热系数.在求解方程时,需考虑边界条件

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \\ T_1(r=0) = T_0 \end{cases} \quad (2)$$

以及各边界之间的温度连续性、热流连续性条件和光纤表面的冷却条件.这样就可以求解热传导方程得出双包层光子晶体光纤各个区域的温度分布

$$T_1 = T_0 - \frac{qr^2}{4k_1} \quad (3)$$

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

$$T_3 = T_0 - \frac{qa^2}{4k_1} - \frac{qa^2}{2k_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) - \frac{qa^2}{2k_3} \ln\left(\frac{r}{b}\right) \quad (5)$$

$$T_4 = T_0 - \frac{qa^2}{4k_1} - \frac{qa^2}{2k_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) - \frac{qa^2}{2k_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right) - \frac{qa^2}{2k_4} \ln\left(\frac{r}{c}\right) \quad (6)$$

$$T_5 = T_0 - \frac{qa^2}{4k_1} - \frac{qa^2}{2k_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) - \frac{qa^2}{2k_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right) - \frac{qa^2}{2k_4} \ln\left(\frac{d}{c}\right) - \frac{qa^2}{2k_5} \ln\left(\frac{r}{d}\right) \quad (7)$$

$$T_0 = 298 + \frac{qa^2}{2he} + \frac{qa^2}{4k_1} + \frac{qa^2}{2k_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{qa^2}{2k_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right) + \frac{qa^2}{2k_4} \ln\left(\frac{d}{c}\right) + \frac{qa^2}{2k_5} \ln\left(\frac{e}{d}\right) \quad (8)$$

式中: T_0 表示纤芯中心温度, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 分别表示 I 区、II 区、III 区、IV 区和 V 区的温度、外半径和导热系数.

2 数值计算结果

计算给定纤芯发热功率密度条件下双包层光子晶体光纤的径向温度分布,需已知各个区域的导热

系数.纤芯和 second 外包层为石英材料, $k_1 = k_4 = 1.38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;涂敷层为聚合物材料, $k_5 = 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;内包层区域是由石英材料和气孔组成,但是气孔直径与间距比值较小,因而比单一石英材料的热传导系数略低,设定该区等效热传导系数为 $k_2 = 1.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.假设从内包层区经气孔包层流入外包层区的热功率为 P_h ,则有

$$P_h = k_3 \frac{\bar{S}}{L} \Delta T = k_3 \frac{\pi(R_2 + R_3) \cdot dl}{R_3 - R_2} \Delta T \quad (9)$$

式中, \bar{S} 为热流平均截面积, dl 为光纤单位长度.流经气孔包层的热功率,一部分是通过气孔间的石英传输的, P_{silica} ;另一部分是通过气孔中的空气传输的, P_{air} ,即: $P_h = P_{\text{silica}} + P_{\text{air}}$, P_{silica} 、 P_{air} 可分别表示为

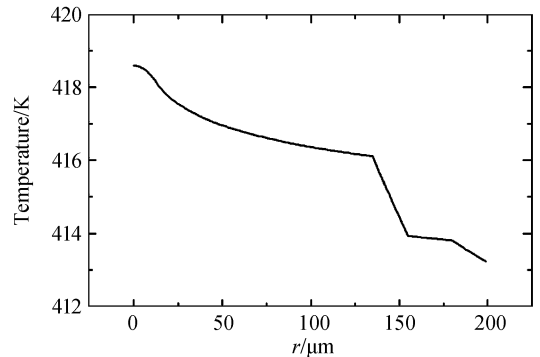
$$P_{\text{silica}} = k_{\text{silica}} \frac{\bar{S}_{\text{silica}}}{L} \Delta T = k_{\text{silica}} \frac{W_{\text{silica}} \cdot dl}{R_3 - R_2} \Delta T \quad (10)$$

$$P_{\text{air}} = k_{\text{air}} \frac{\bar{S}_{\text{air}}}{L} \Delta T = k_{\text{air}} \frac{W_{\text{air}} \cdot dl}{R_3 - R_2} \Delta T \quad (11)$$

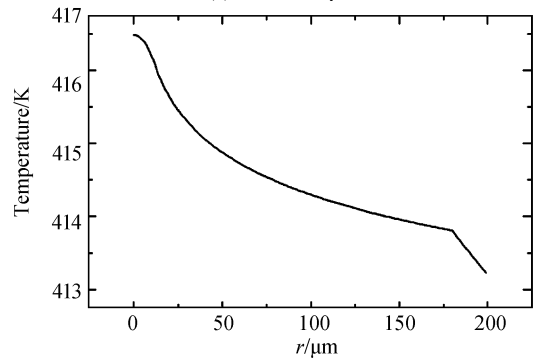
式中, W_{silica} = 石英间隔个数 \times 每个间隔宽度, $W_{\text{air}} = \pi(R_2 + R_3) - W_{\text{silica}}$,根据式(10)、(11),可以得到空气包层等效热传导系数

$$k_3 = k_{\text{silica}} \frac{W_{\text{silica}}}{\pi(R_2 + R_3)} + k_{\text{air}} \frac{W_{\text{air}}}{\pi(R_2 + R_3)} \quad (12)$$

空气热传导系数为 $k_{\text{air}} = 0.026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,根据所研究的光子晶体光纤结构,可以得到 $k_3 = 0.073 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.设定纤芯发热功率密度为



(a) Photonic crystal DCF



(b) Conventional DCF

图 3 双包层光纤径向温度分布数值计算结果

Fig. 3 Calculated results of the radial distribution of temperature in the double-cladding fiber

$1.6 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$, 光纤表面对流换热系数为 $5.0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 即可计算双包层光子晶体光纤的径向温度分布, 计算结果如图 3(a). 同样条件下, 相同尺寸的传统双包层光纤的径向温度分布如图 3(b).

定量计算结果表明: 在设定的条件下, 双包层光子晶体光纤和传统双包层光纤的表面温度是一样的 (413.2 K). 但是, 双包层光子晶体光纤的纤芯中心温度 (418.6 K) 要比传统双包层光纤纤芯中心温度 (416.5 K) 高 2.1 K. 从图 3(a) 可以看出, 由于双包层光子晶体光纤中的空气包层的热导率最低, 在稳态导热过程中其温度梯度是最大的, 这是造成双包层光子晶体光纤纤芯温度相对较高的主要原因. 虽然双包层光子晶体光纤的纤芯温度略高于传统双包层光纤的纤芯温度, 但是, 相对于近 120 K 的温升, 两种激光器的热性能可以认为是近乎相同的.

3 结论

通过比较在相同发热功率和散热条件下双包层光子晶体光纤和传统双包层光纤的温度分布, 考察了双包层光子晶体光纤的散热能力. 研究表明: 在设定的条件下, 双包层光子晶体光纤的纤芯中心温度略高于传统双包层光纤的纤芯中心温度, 这表明前者的散热能力要低于后者. 但是, 相对于传统双包层光纤来说, 光子晶体光纤的较差的散热性对激光器的激光性能的影响是可以忽略的. 考虑到其大模面积、大数值孔径(内包层)等优越的特性, 双包层光子晶体光纤激光器在高功率固体激光器研究领域有着广阔的应用前景.

参考文献

[1] JEONY Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output

- power[J]. *Elect Lett*, 2004, **40**(8):470-471.
- [2] ZHOU J, LOU Q, KONG L, *et al.* A 115 W Ytterbium-doped fiber laser[J]. *Chinese Phys Lett*, 2004, **21**(6):1083-1085.
- [3] CARTER A, SAMSON B, TANKALA K, *et al.* Damage mechanisms in components for fibre lasers and amplifiers[C]. *SPIE*, 2005, **5647**:561-571.
- [4] TANG Can, LU Yong-zhi. Studies and applications of photonic crystal fiber[J]. *Optoelectronic Technology*, 2005, **25**(3):181-186.
唐灿, 刘永智. 光子晶体光纤的研究与应用[J]. 光电子技术, 2005, **25**(3):181-186.
- [5] BENABID F, KNIGHT J C, RUSSELL P, *et al.* Stimulate Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, **298**(5592):399-402.
- [6] LIMPET J, SCHREIBER T, NOLTER S, *et al.* High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fibre laser[J]. *Opt Express*, 2003, **11**(7):818-823.
- [7] RUAN Shuang-chen, YANG Bing, ZHU Chun-yan, *et al.* Yb³⁺-doped double cladding photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):15-16.
阮双琛, 杨冰, 朱春艳, 等. 2.2W 掺 Yb³⁺ 双包层光子晶体光纤激光器[J]. 光子学报, 2004, **33**(1):15-16.
- [8] LIN Hao-jia, RUAN Shuang-chen, CHEN Chao, *et al.* Yb³⁺-doped double clad large-mode-area photonic crystal fiber laser with a output power of 65mW[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):797-799.
林浩佳, 阮双琛, 程超, 等. 掺 Yb³⁺ 双包层大模面积光子晶体光纤激光器的研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(7):797-799.
- [9] RUAN Shuang-chen, DU Chen-lin, YANG Bing, *et al.* Yb³⁺-doped double cladding photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10):1156-1158.
阮双琛, 杜晨林, 杨冰, 等. 15 W 光子晶体光纤激光器的研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(10):1156-1158.
- [10] LIMPET J, SCHREIBER T, LIEM A, *et al.* Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation[J]. *Opt Express*, 2003, **11**(22):2982-2990.

Theoretical Study on the Heat Dissipation Ability of Double-cladding Photonic Crystal Fiber

ZHU Hong-tao^{1,2}, LOU Qi-hong¹, ZHOU Jun¹, QI Yun-feng¹, DONG Jing-xing¹, WEI Yun-rong¹

(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 date: 2007-08-13

Abstract: The heat dissipation ability of double-cladding photonic crystal fiber was studied by comparing the temperature distribution in the conventional double-cladding fiber with that in the double-cladding photonic crystal fiber under the same conditions. The numerical results show that the heat dissipation ability of double-cladding photonic crystal is weaker than the conventional double-cladding fiber's. However, in general, the influences of the heat properties of the conventional double-cladding fiber and the double-cladding photonic crystal fiber on the laser property are almost the same.

Key words: Photonic crystal; Double-cladding fiber; Heat dissipation



ZHU Hong-tao was born in 1975. He received his Ph. D. degree from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research focuses on the thermal effect in solid-state lasers and amplifiers, including fiber lasers and amplifiers.