

# 高功率光子晶体光纤激光器温度分布研究

陈爽,冯莹

(国防科技大学 光电科学与工程学院,长沙 410073)

**摘 要:**对高功率光子晶体光纤激光器温度分布问题进行了理论研究. 在分析光纤热产生机理和结构的基础上,建立了双包层光子晶体光纤激光器稳态切面温度分布简单模型,数值模拟了光纤径向的温度分布、纤芯温度和纤芯-表面温差与纤芯热负载的关系,研究了光纤结构对温度分布的影响;并就激光器光纤泵浦端面的冷却方案进行讨论,数值模拟了外界对流系数不同时纤芯温度的大小. 结果表明:对高功率光子晶体光纤激光器采用风冷和水冷的方法可以降低热效应的影响.

**关键词:**光子晶体光纤激光器;双包层光子晶体光纤;热效应

**中图分类号:** TN248

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)06-1134-5

## 0 引言

双包层掺杂光纤的出现和包层泵浦技术的成熟使得光纤激光器光转换效率明显提高. 但对于普通双包层掺杂光纤来说,为获得良好的光束质量,纤芯的几何尺寸一般很小,在高功率运转时,必然会伴随着各种非线性效应的干扰,限制了光纤激光器的进一步发展. 掺杂光子晶体光纤通过微小空气孔阵列实现对光的限制,增大了光纤设计的自由度,可以很方便实现大模面积(Large Mode Area, LMA)、内包层大数值孔径、高掺杂乃至多芯的设计,从而提升了光纤激光器的各项性能,保持了良好的光束质量<sup>[1-5]</sup>. 2005 年德国 Jena 研究所利用单根双包层光子晶体光纤实现了 1.53 kW 的激光输出,  $M^2 < 3$ <sup>[1]</sup>. 2006 年 3 月,该所又报导了一种新型的 LMA 棒状光子晶体光纤,通过缺失光纤中心的 19 个空气孔形成 LMA,掺杂纤芯直径高达 60  $\mu\text{m}$ ,模场面积高达 2 000  $\mu\text{m}^2$ <sup>[2]</sup>.

虽然光纤激光器有着较大的表面积与体积比,散热性能好,但仍存在热效应问题,如泵浦光与激光上能级之间光子能量差以热的形式散入晶格,造成量子亏损发热;激光下能级与基态之间的能量差转化为热能;激光跃迁荧光过程除产生激光外,其余能量由于激光淬灭转化生热<sup>[6]</sup>. 当泵浦光很强的时候,单根光纤内传输功率达到几百上千瓦时,会出现应力和折射率变化等热效应;尤其在泵浦端,温度升高甚至可能熔化基质和燃烧,造成光纤损毁. 目前已有不少关于高功率双包层光纤激光器温度分布的研究报导<sup>[7-11]</sup>,但对光子晶体光纤激光器的温度分布与热效应的研究还不多见. 本文建立了一套光子晶体光纤激光器稳态温度分布的模型,数值模拟了

光纤径向的温度分布,分析了光纤结构对温度的影响,并对比了其与普通双包层光纤的差别,对高功率光子晶体光纤激光器的研究具有一定的参考价值.

## 1 理论与模型建立

双包层光子晶体光纤在传输机理上与传统光纤有着本质区别<sup>[12]</sup>. 由于光纤中有许多微小的空气孔,光纤截面中心的气孔缺失构成了光纤的芯区,而内、外包层则由规则分布的较大空气孔排列为三角形或六角形、圆形的微结构分割形成<sup>[1]</sup>,很容易实现大数值孔径、LMA 且保持单模的特性,优化了光纤激光器的出光质量. 光子晶体光纤激光器中,主要的热源同样来自掺杂纤芯中泵浦激光与激光上能级光子之间的能量差造成的能量淬灭,并通过硅玻璃基质包层和保护层向外散热;唯一不同在于光子晶体光纤内空气孔阵列的存在,造成了传热情况的复杂性,导致了温度分布与普通双包层光纤的差异.

参照常规双包层掺杂光纤(Double Clad Fiber, DCF)温度分布模型<sup>[7]</sup>,可以建立如图 1 所示双包层

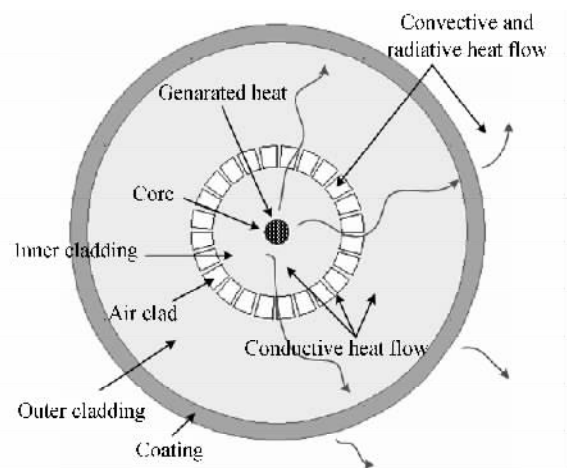


图 1 双包层光子晶体光纤截面温度分布模型

Fig. 1 Thermal model of double-cladding photonic crystal fiber laser

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)切面温度分布简单模型:忽略 PCF 中的微小气孔,将截面中心缺失微小空气孔形成的芯区等效为圆形;并将芯区掺杂部分构成的热源也等效于一个圆形结构;分割内、外包层的空气孔阵列由近似成扇形的空气孔和狭长的硅桥构成,硅桥与内外包层是同样的硅玻璃基质. 另外考虑到光子晶体纤芯内泵浦光传输的特性,可假设沿切面热负载在纤芯内均匀分布而不是高斯分布.

由此模型可进行分析:热源集中在纤芯掺杂区域,在硅玻璃基质包层和保护层中以热传导方式传递,而在空气孔内则同时存在传导、对流和辐射三种形式;最后在光纤表面通过对流和辐射向外界散热,对流则是主要的方式.

因此根据传导方程,在纤芯掺杂区域有

$$-\nabla \cdot (k_1 \nabla T) = Q \quad (1)$$

式中,  $Q$  表示在芯区由于掺杂离子对泵浦激光吸收而产生的量子热,  $k_1$  为纤芯基质的导热系数. 而在内外包层中,由于忽略了微小空气孔,可看成是均匀分布的硅玻璃介质. 因此在该区域,传热过程可以由无源热传导公式表示

$$-\nabla \cdot (k_2 \nabla T) = 0 \quad (2)$$

保护层内传热过程同样可用式(2)表示,但保护层多为丙烯酸脂等有机物质,导热系数  $k_3 < k_2$ .

在光纤表面,换热方式主要以对流和辐射为主,可以表示为

$$\mathbf{n} \cdot (k_2 \nabla T) = h(T_{\text{inf}} - T) + C(T_{\text{amb}}^4 - T^4) \quad (3)$$

式中,  $T_{\text{inf}}$  是外部温度、 $T_{\text{amb}}$  是环境温度,  $h$ 、 $C$  分别是对流和辐射系数.  $h$  与外部温度、风速和介质密度、粘度等因素有关. 实验中可以通过使用水冷和风冷方式,加速介质流动等措施增大  $h$  和降低  $T_{\text{inf}}$ , 达到高效的制冷.

光子晶体光纤激光器截面温度分布传热模型与 DCF 最大的不同是对泵浦激光进行约束的空气孔阵列区域. 在该区域内,空气孔与硅玻璃基质硅桥相间分布,在硅桥内,热传导是唯一的传热方式,同样可以用式(2)进行描述. 而在空气孔内,同时存在传导、对流和辐射等传热方式,可以描述为

$$-\nabla \cdot (k_a \nabla T) = Q + h(T_{\text{ext}} - T) + C_{\text{trans}}(T_{\text{amb}}^4 - T^4) \quad (4)$$

近似地,空气孔内的热传递情况可以简单地看成是从气孔的内表面向外表面传热,如图 2. 假设在稳态的情况下,内表面温度为  $T_1$ ,外表面温度为  $T_2$ . 于是在气孔内热传导过程可以描述为

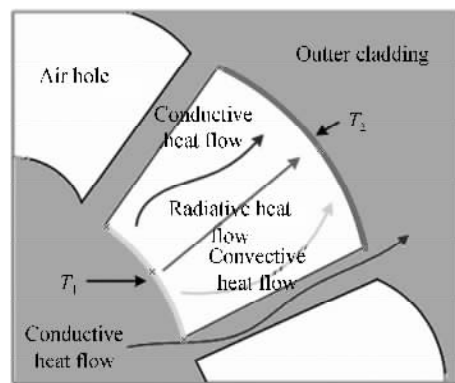


图 2 气孔内热传递情况

Fig. 2 Illustrated heat flow mechanisms in the air holes

$$d\Phi = k_a \frac{dA}{L} \Delta T = k_a \frac{\pi(R_2 + R_1) dl}{R_2 - R_1} \Delta T \quad (5)$$

式中  $k_a$  为空气的导热系数,  $R_1$ 、 $R_2$  为气孔内外表面到光纤中心的距离. 同时,从内表面向外表面的辐射传热则可以表示为

$$d\Phi = \sigma \epsilon dA (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

式中,斯忒芬-玻尔兹曼常量  $\sigma = 5.6705 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,而辐射系数  $\epsilon$  则与材质有关. 另外,由于对流换热与空气的密度  $\rho$ 、动力粘度  $\eta$ 、导热系数  $\lambda$ ,以及定压热容  $C_p$ ,以及风速等因素有关;而在空气孔内体积小、比较封闭,温差带来的空气密度差不大,因此对流效果也不明显,可以忽略空气孔内对流传热的影响.

对比三种换热方式,发现空气孔内虽然导热系数比较小,但较对流和辐射,仍是最主要的方式. 同时考虑到稳态的情况下,由于温度梯度的形成,辐射和对流等传热过程仍可以近似为传导. 因此,可以通过计算对  $k_a$  值进行修正和补偿,使其更接近于真实情况. 由此模型即可对稳态下光子晶体光纤激光器温度分布进行数值模拟.

## 2 模拟结果及分析

基于以上所建模型,对光子晶体光纤激光器的温度分布进行了数值模拟. 计算中采用的光子晶体光纤参量取自文献[13],其中  $\text{PCF}_1$  空气孔阵列为六边形而  $\text{PCF}_2$  为圆形<sup>[13]</sup>. 为便于计算,模拟时将空气孔阵列等效于圆形,将缺失微小空气孔构成的三角形纤芯也等效为圆形.

### 2.1 参量选取

气孔内的空气介质是随温度变化而变化的<sup>[14]</sup>,而硅玻璃基质的热物理性质则相对稳定,选取  $k_a = 1.38 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $\rho = 2203 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $C_p = 703 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ <sup>[7]</sup>,有机物保护层传热系数为  $k_c = 0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot$

K)<sup>[13]</sup>;另外假设外界温度为 300 K,自然对流的情况下,对流系数  $h=10\sim 30\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,如果加入风冷和水冷可以使得  $h$  达到  $100\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,甚至更大<sup>[8-9]</sup>.

另一个重要参量是热负载(纤芯内的热源),具体可描述为

$$q(z)=\alpha_a\eta_h[P_p^+(z)+P_p^-(z)] \quad (7)$$

式中  $\alpha_a$  为纤芯对泵浦光的吸收效率,而  $\eta_h$  是热转换效率,表征量子热产生的情况,一般镱离子吸收泵浦光的热转换效率  $\eta_h=0.101$ <sup>[8]</sup>,而据文献[13]报道,当光子晶体光纤激光器输出激光为 35 W 时,热负载大约为 5 W/m. 由于不同的实验系统中  $\alpha_a$  不同,所以不考虑泵浦光功率,而直接将热负载值带入计算更有普遍意义.

## 2.2 光纤泵浦端径向温度分布

针对 PCF<sub>1</sub> 和 PCF<sub>2</sub> 两种光纤,假设热负载为 5 W/m,而外界空气温度设定为 300 K,对流情况为自然对流  $h=20\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . 为了便于分析比较,设计与 PCF<sub>1</sub> 和 PCF<sub>2</sub> 具有相同结构参量的普通双包层光纤 DCF<sub>1</sub> 和 DCF<sub>2</sub> 进行模拟计算,结果如图 3 和图 4.

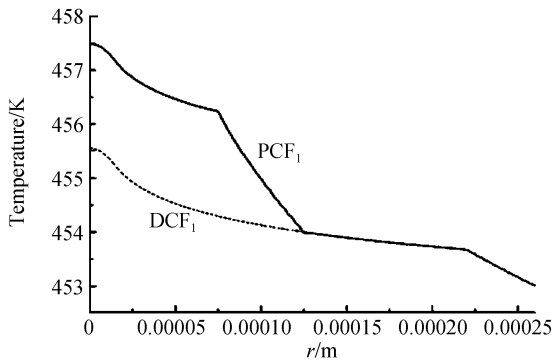


图 3 光纤 PCF<sub>1</sub> 和 DCF<sub>1</sub> 沿径向温度分布

Fig. 3 Temperature as a function of radial coordinate of different fibers for PCF<sub>1</sub> and DCF<sub>1</sub>

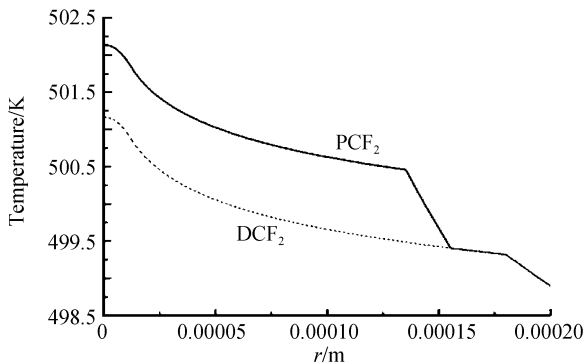


图 4 光纤 PCF<sub>2</sub> 和 DCF<sub>2</sub> 沿径向温度分布

Fig. 4 Temperature as a function of radial coordinate of different fibers for PCF<sub>2</sub> and DCF<sub>2</sub>

由此可以看出,在相同热负载下,光子晶体光纤与常规双包层光纤由于外界条件相同(外界温度、光

纤表面积和对流系数相同),导致外包层和保护层温度分布一致. 其次,稳态下普通双包层光纤沿径向的温度分布曲线比较光滑,只是在外包层和保护层之间有一个突变;而光子晶体光纤不但在该点处有突变,在空气孔边缘同样存在突变,空气孔内温度梯度比包层和保护层内更大,说明空气孔使得光纤传热能力下降.

## 2.3 热负载与温度分布

在光纤激光器实际应用中,更关心的是纤芯温度和纤芯-表面温差. 通过纤芯温度可以判断光纤是否熔化而损毁;而通过纤芯-表面温差,可了解光纤应力的情况. 本文数值模拟了不同热负载下 PCF 纤芯温度和纤芯-表面温差的情况,并与 DCF 进行了比较. 计算中设定外界环境温度为 300 K,对流系数为 30 W/m,结果如图 5 和图 6.

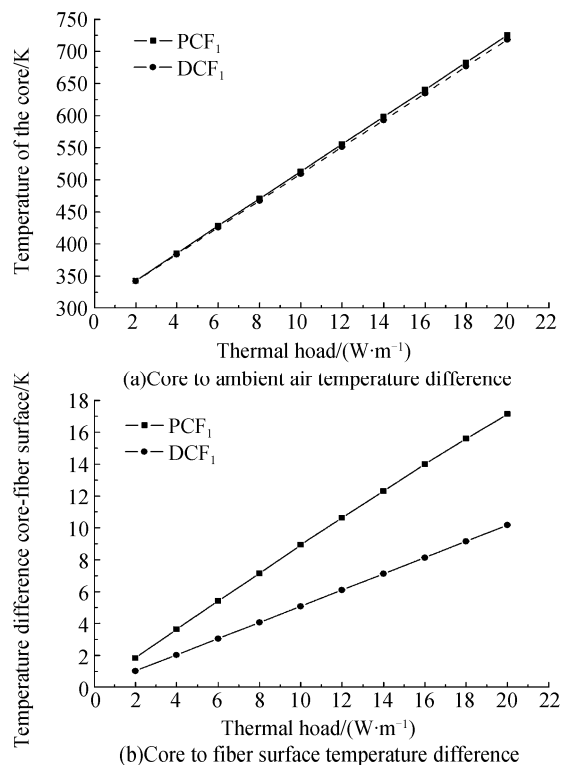
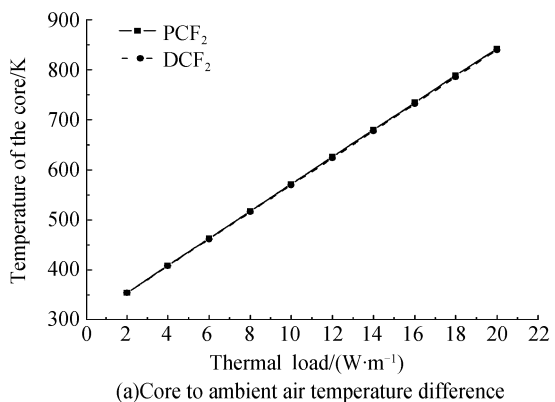


图 5 PCF<sub>1</sub> 和 DCF<sub>1</sub> 温度分布与热负载的关系

Fig. 5 Temperature distribution for PCF<sub>1</sub> and DCF<sub>1</sub> as a function of thermal load



(a)Core to ambient air temperature difference

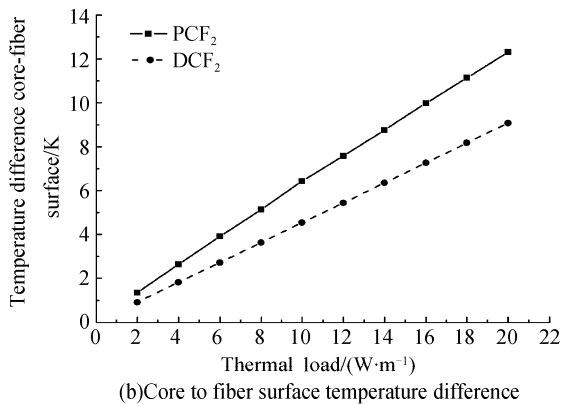


图6 PCF<sub>2</sub>和DCF<sub>2</sub>温度分布与热负载的关系

Fig. 6 Temperature distribution for PCF<sub>2</sub> and DCF<sub>2</sub> as a function of thermal load

模拟结果表明:1)由于光纤表面是自然对流换热,导致纤芯温度随热负载线性增大,尤其是PCF<sub>2</sub>在热负载为20 W/m时,纤芯温度达到了842.1 K;2)光子晶体光纤纤芯温度比同规格普通双包层光纤高;3)随着热负载的增加,纤芯与表面的温度差也随之增大,PCF<sub>1</sub>在20 W/m时为17.13 K;4)光子晶体纤芯-表面温差增大的趋势大于普通双包层光纤。由此,在设计光子晶体激光器时需要考虑光纤纤芯-表面温差值,如果过大将会导致光纤内热应力效应,造成光纤损坏。

#### 2.4 光子晶体光纤参量与温度分布的关系

2.2和2.3节分别模拟了两种掺镱光子晶体光纤(PCF<sub>1</sub>和PCF<sub>2</sub>)稳态时的情况。由图3~6可以得出:1)相同热负载下PCF<sub>2</sub>较PCF<sub>1</sub>纤芯温度更高,这是因为PCF<sub>1</sub>外包层半径较大,光纤与空气接触的外表面积更大,散热效果更好;2)PCF<sub>1</sub>纤芯-表面温差比PCF<sub>2</sub>高40%左右,是由于PCF<sub>1</sub>空气孔阵列较厚以及硅桥数量较少,导致了该区域散热能力较低。

因此,设计用于大功率光纤激光器的掺杂光子晶体光纤时,需要考虑光纤结构参量对热效应的影响。为了降低纤芯温度以及纤芯-表面温差,应该增大外包层的半径,使其与空气等对流介质有更大的接触面积;另外还应在满足对泵浦源激光约束的前提下,缩小空气孔的厚度以及增加空气孔阵列中硅桥的数量,以便于大量的热能迅速向表面传递,避免高功率泵浦时由于内外温差造成的光纤端面应力损毁。

### 3 大功率光子晶体光纤激光器泵浦端冷却设计

在端面泵浦的光纤激光器系统中,泵浦光注入的端面承受的功率最高,热效应最严重,容易损毁;

而沿轴向稍微远离端面的地方温度则急剧下降<sup>[9]</sup>。因此,在实验中只需对端面附近很短一段光纤制冷,就可达到保护光纤的目的。

一般常用的散热措施有热沉制冷和对流制冷。风冷、水冷是最常用的对流换热方式,增大传热系数 $h$ ,则可以提高换热效果;一般自然对流的情况下 $h$ 为10~20 W/(m<sup>2</sup>·K),风冷、水冷则可使 $h$ 达到100~300 W/(m<sup>2</sup>·K)。模拟光纤端面在不同对流条件下的情况(图7)可知,即使纤芯内热负载达到20 W/m的时候,增大 $h$ 同样可使纤芯温度明显降低;在纤芯温度降低的同时,纤芯-表面温差也会随之降低,减小了内外温差产生应力效应而损毁光纤的可能。这也体现了光纤激光器表面积/体积比较大,散热好的优点。

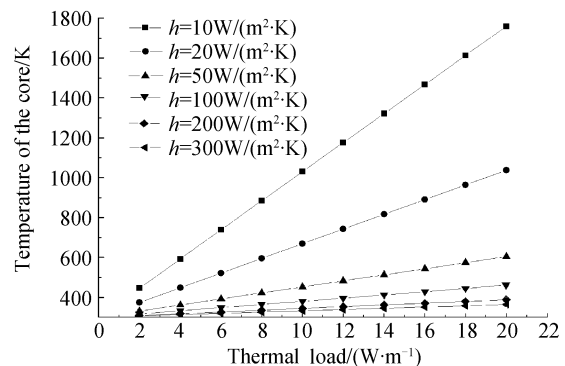


图7 不同对流条件下泵浦端面纤芯温度与热负载之间的关系

Fig. 7 The relationship between temperature at fiber-end and thermal load at different cooling condition

另外,水冷的方式固然好,但是较之风冷方式,系统和装置比较复杂。为了提高大功率光纤激光器工作时风冷降温的效果,可以将光纤嵌入传热系数较高的金属槽内,增大风冷散热的表面积。同时,光纤外面的丙烯酸酯保护层,相对于包层的传热系数较低,仅为 $k_c=0.2$  W/(m·K),影响了传热效果。但是在一定的条件下,保护层的存在却增大了光纤对空气散热的面积,增大了表面积/体积比值,有利于散热。即便如此,由于其燃点比较低,与空气接触的时候比较容易燃烧,带来一些不良的效应,造成对光纤损毁,因此在大功率泵浦的情况下还是应该将保护层去掉。

## 4 结论

建立了一套双包层光子晶体光纤激光器稳态温度分布模型,数值模拟了在不同的纤芯热负载下光纤切面温度分布情况。结果表明,由于光子晶体光纤结构的特殊,其温度分布较同规格普通双包层光纤有较大差异。光子晶体光纤内空气孔阵列的厚度和硅桥的数量直接影响了纤芯-表面温度差,外包

层的大小影响了散热面积,导致了纤芯温度的不同.因此在设计用于大功率光纤激光器的光子晶体光纤时需要考虑这些结构参量对温度分布的影响.讨论了不同的冷却条件对激光器端面的影响,针对光纤泵浦端提出了冷却措施和方法.数值模拟表明:风冷和水冷基本上能解决光纤端面的热问题,同时还可以将光纤嵌入传热系数较大的金属槽,提高散热效果.这些结论对大功率光子晶体光纤激光器实验研究有着实际的参考价值.

#### 参考文献

- [1] BONATI G, VOELCKEL H, GABLER T, *et al.* 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[C]. *Photonics West, San Jose, Late Breaking Developments*, 2005, Session 5709-2a.
- [2] LIMPET J, SCHMIDT O, ROTHARD J, *et al.* Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(7):2715-2720.
- [3] RUAN Shuang-chen, YANG Bing, ZHU Chun-yan, *et al.* Yb<sup>3+</sup>-doped double cladding photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **30**(1):15-16.  
阮双琛,杨冰,朱春艳,等. 2.2 W 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光子晶体光纤激光器[J]. 光子学报, 2004, **30**(1):15-16.
- [4] RUAN Shuang-chen, DU Chen-lin, YANG Bing, *et al.* Yb<sup>3+</sup>-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.
- [5] LIN Hao-jia, RUAN Shuang-chen, CHENG Chao, *et al.* Yb<sup>3+</sup>-doped double clad large-mode-area photonic crystal fiber laser with a output power of 65 mW[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):797-799.  
林浩佳,阮双琛,程超,等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 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.
- [6] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. SUN Wen, JIANG Ze-wen, CHENG Guo-xiang, transl. Beijing: Science Press, 2002:356-409.  
克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥,译. 北京:科学出版社, 2002:356-409.
- [7] GAO Xue-song, GAO Chun-qing, LIN Zhi-feng, *et al.* Numerical analysis of the temperature distribution of high power double cladding fiber laser[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2005, **25**(11):998-1002.  
高雪松,高春清,林志锋,等. 高功率双包层光纤激光器温度分布的数值分析[J]. 北京理工大学学报, 2005, **25**(11):998-1002.
- [8] XIONG Yue, PAN Wei, LUO Bin, *et al.* Thermal effects in Yb-doped double-clad high power fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4):496-499.  
熊悦,潘伟,罗斌,等. 掺镱双包层高功率光纤激光器热效应的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(4):496-499.
- [9] CHEN Ji-xin, SUI Zhan, CHEN Fu-shen, *et al.* Thermal effect of Yb<sup>3+</sup>-doped double clad fiber laser[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(3):298-270.  
陈吉欣,隋展,陈福深,等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的热效应分析[J]. 激光技术, 2006, **30**(3):298-270.
- [10] HUO Y, CHEO P K. Thermomechanical properties of high-power and high-energy Yb-doped silica fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(3):759-791.
- [11] WANG Y, XU Chang-Qing, PO Hong. Thermal effects in kilowatt fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(1):63-65.
- [12] KNIGHT J C, BIRK T A, RUSSELL P St J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(19):1547-1549.
- [13] 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.
- [14] YUE Dan-ting. Engineering mechanics and heat transfer[M]. Dalian: Dalian Maritime Press, 2002:279.  
岳丹婷. 工程力学和传热学[M]. 大连:大连海事出版社, 2002:279.

## Temperature Distribution in High Power Photonic Crystal Fiber Laser

CHEN Shuang, FENG Ying

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha 410073, China)

Received date: 2006-12-21

**Abstract:** Temperature distribution in high power photonic crystal fiber laser is analyzed through the thermal conductive equations. It presents a steady thermal model of the photonic crystal fiber laser, which is applied to calculate the heat distribution in different fibers at various thermal load. The cooling method of the pump-end is investigated. The results show that air-cooling and water-cooling can significantly reduce the influence of the thermal effect of the high power photonic crystal fiber laser.

**Key words:** Photonic crystal fiber laser; Double clad photonic crystal fiber; Thermal effect

**CHEN Shuang** was born in 1979. He received his M. S. degree from National University of Defense Technology in 2004. Now he is a candidate for Ph. D. degree at National University of Defense Technology. His major research field is fiber laser and fiber amplifier.

