

文章编号: 1001-3806(2011)05-0692-04

布喇格光纤激光器的光纤温度分布特性研究

陈海涛^{1,2}, 杨华军², 荣健², 程晓洪¹

(1. 宜宾学院 物理与电子工程学院 计算物理四川省高校重点实验室, 宜宾 644000; 2. 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

摘要: 为了分析布喇格光纤激光器中光纤的温度分布特性, 提出了布喇格光纤激光器中光纤的稳定热模型, 通过热传输方程分析了其中的温度分布, 并采用数值有限元法对布喇格光纤的温度分布和由此产生的热应力进行了数值研究, 然后对热功率密度、光纤包层数和环境对流传热系数对光纤温度分布的影响进行了模拟计算。结果表明, 表层温度远低于覆层材料的临界值 300℃, 而且纤芯和表面的温差大约 10℃。研究结果有助于高功率布喇格光纤激光器的耐热设计。

关键词: 激光器; 布喇格光纤激光器; 布喇格光纤; 热效应

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.031

Research for temperature distribution characteristics of the fiber in a Bragg fiber laser

CHEN Hai-tao^{1,2}, YANG Hua-jun², RONG Jian², CHENG Xiao-hong¹

(1. Sichuan Key Laboratory of Computational Physics, School of Physics and Electrical Engineering, Yibin University, Yibin 644000, China; 2. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In order to study the temperature property of the fiber in a Bragg fiber laser, the steady thermal model was presented. The temperature distribution was analyzed based on heat transfer equations. The temperature distribution and the thermally-induced stress in the fiber were simulated by means of numerical finite-element method. Effects of thermal power density, number of cladding layers and environmental convection coefficient on the temperature distribution were discussed. The results show that the temperature of coating is much lower than its critical temperature 300℃, and the temperature difference between the core and coating is only about 10℃. The result of analysis is helpful to the design of Bragg fiber lasers.

Key words: lasers; Bragg fiber laser; Bragg fiber; thermal effect

引言

要使光纤激光器放大功率提高时保持良好的光束质量, 关键是需要优化设计光纤激光器, 从而使抽运光有效耦合、非线性效应降低、抽运光高效转换和适宜的热特性^[1]。传统光纤激光器是基于普通掺杂的单模光纤, 它虽然允许产生有限衍射的输出, 但抽运源却只能采用有限衍射的光束质量的抽运源, 因此, 也只能局限于低功率。另一方面, 使用多模光纤又往往导致光束质量比较差^[2]。双包层光纤激光器通过较低

折射率的外包层将抽运光限制在内包层, 也可以在单模芯部部分传播, 并能够被激光活性离子吸收^[3]。双包层光纤的内包层区域比较大, 可以支持大量的模式传播, 从而允许更有效的高功率输出。但其缺点是光束质量比较差。最近, 俄罗斯人研制了一种采用布喇格光纤的新型高功率激光器^[4]。这种激光器采用了掺杂稀土离子(比如镱离子)固体纤芯的带隙光纤, 它的周期性包层是由高折射率材料嵌入低折射率材料上构成的。

光纤的热效应对于光纤激光器的有效运行是重要的, 因此, 近年来对双包层光纤激光器和光子晶体激光器热效应的研究很多^[5-9]。但由于布喇格光纤激光器刚出现不久, 所以很少有人对其热效应进行深入研究。本文中通过采用热分析和数值有限元法对布喇格光纤激光器的温度分布情形和冷却措施进行了研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572079)

作者简介: 陈海涛(1972-), 男, 副教授, 硕士, 研究方向为激光与光通信。

E-mail: chqcht@sina.com

收稿日期: 2010-10-08; 收到修改稿日期: 2010-12-01

1 布喇格光纤激光器的温度分布

1.1 布喇格光纤激光器的热扩散模型

布喇格光纤的结构由低折射率的芯层和周期性的包层构成,而周期性的包层是由高折射率层和低折射率层交替变化而构成的^[10](如图1所示)。为了简化理论分析,芯层和周期性包层的低折射率层都采用纯硅材料,而高折射率层则采用 CeO₂ 掺杂。自由度参量则选择为:芯层半径 R ,晶格常数 Λ ,厚度 d ,材料高低折射率差值 Δn ,包层的周期性双层数 N 。为了高功率光纤激光器的应用,要满足: $R > 10\mu\text{m}$, $\Delta n < 0.05$ 。

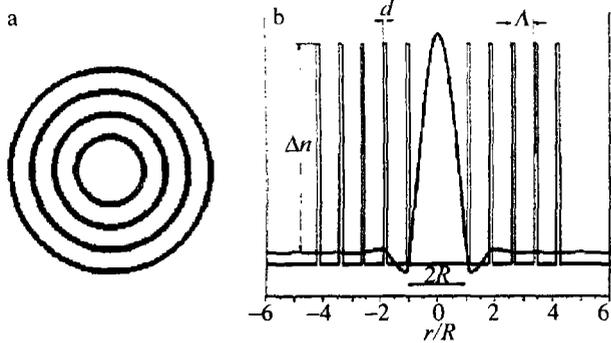


Fig. 1 Schematic of the cross-section of a Bragg fiber
a—cladding structure of a Bragg fiber b—refractive index profile of a Bragg fiber

在 1/4 波栈条件下, Λ 和 d 由下式确定^[11]:

$$d = \frac{\pi}{2n_h\lambda}, \Lambda = \left(\frac{1}{n_h} + \frac{1}{n_l}\right)\frac{\pi}{2\lambda} \quad (1)$$

式中, λ 表示激光器光的波长, n_h 和 n_l 分别表示相应的布喇格光纤周期包层中高折射率层和低折射率层材料的折射率。

布喇格光纤中热的产生主要是由抽运和激光光子间的量子数亏损造成的。这些热量通过芯层和包层之间的热传导到达光纤的外层,而光纤外层由通过传导和对流的方式将热量散发到周围的空气中。由于采用的高折射率材料和低折射率材料非常接近,所以把二者的折射率视为相同。这种热扩散过程可以采用图2建立

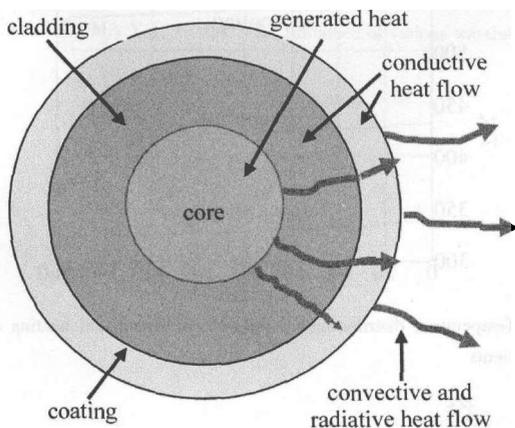


Fig. 2 Thermal model of a Bragg fiber laser

的热扩散模型给予说明。其中的 R_c, R_{in} 和 R_{out} 分别表示芯层半径,包层半径和覆层半径。

热在光纤的纤芯产生,则高、低折射率材料构成的周期性包层可以视为同一层。光纤长度远大于光纤纤芯半径,热量从光纤端的散射远小于从其表面的散射。因此,柱坐标系下热传导方程可以表示为^[12]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] = - \frac{q(z)}{\kappa} \quad (2)$$

式中, r 为距纤芯中心的距离, $T(r, z)$ 为 r 处的温度, $q(z)$ 为单位体积的热功率密度, κ 是热导率;在包层区域($R_c \leq r \leq R_{in}$), $q(z) = 0$ 。根据牛顿冷却定律,在表面处可以得到方程:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_{in}} = \frac{h}{\kappa} (T_{air} - T_{in}) \quad (3)$$

式中, h 是空气的传热系数, T_{air} 是光纤周围空气的温度, $T_{in} = T_3(r = R_{out})$ 。光纤中的温度应该满足边界条件:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \kappa_{ac} \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=R_{out}} = h \left[T_{out} - T_3 \right]_{r=R_{out}} \quad (4)$$

利用边界条件和(2)式、(3)式,可以导出纤芯温度分布:

$$T_1(r) = T_0 + \frac{qR_c^2}{2hR_{out}} + \frac{q(R_c^2 - r^2)}{4\kappa_{Si}} + \frac{qR_c^2}{2\kappa_{Si}} \times \ln\left(\frac{R_{in}}{R_c}\right) + \frac{qR_c^2}{2\kappa_{ac}} \ln\left(\frac{R_{out}}{R_c}\right), (0 \leq r \leq R_c) \quad (5)$$

周期性包层的温度分布为:

$$T_2(r) = T_0 + \frac{qR_c^2}{2hR_{out}} + \frac{qR_c^2}{2\kappa_{Si}} \ln\left(\frac{R_{in}}{r}\right) + \frac{qR_c^2}{2\kappa_{ac}} \ln\left(\frac{R_{out}}{R_{in}}\right), (R_c \leq r \leq R_{in}) \quad (6)$$

光纤涂覆层的温度分布为:

$$T_3(r) = T_0 + \frac{qR_c^2}{2hR_{out}} + \frac{qR_c^2}{2\kappa_{ac}} \times \ln\left(\frac{R_{out}}{r}\right), (R_{in} \leq r \leq R_{out}) \quad (7)$$

式中, $R_{in} = R_c + N\Lambda$, $R_{out} = R_{in} + d$, T_0 为纤芯温度, κ_{Si} 和 κ_{ac} 分别为硅和光纤覆层热导率。

1.2 布喇格光纤激光器的温度分布

布喇格光纤激光器温度分布也可以通过数值有限元法讨论,同时还可以讨论其热应力情况。分析所用参量为:硅的热导率 $\kappa_{Si} = 1.38\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,覆层(通常是丙烯酸酯)的热导率 $\kappa_{ac} = 0.2\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,空气的传热系数 $h = 20\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,纤芯半径 $R = 10\mu\text{m}$, $N = 20$, $\Lambda = 2.027\mu\text{m}$ 。纤芯产生热量可以假定为常数,光纤的提取功率为 $35\text{W}/\text{m}$ 时产生热负载大约为 $1.6\text{W}/\text{m}$ 。

由结果(见图3)看出,布喇格光纤激光器纤芯的温度最高,这与传统的双包层光纤激光器一致。而表层温度远低于覆层材料的临界值 300°C ,而且纤芯和表面的温差只有约 14°C ,远低于双包层光纤激光器。因为其折射率与温度的关系近似为 $1.2 \times 10^{-6} (\text{K}^{-1})$,由温度差别引起折射率改变不影响布喇格光纤的光传播性质。

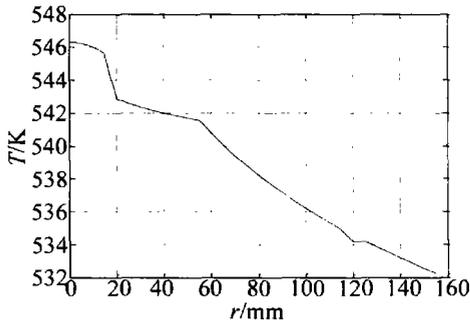


Fig. 3 Temperature profile of a Bragg fiber laser at 5W/m thermal load

此外,作者分析了该布喇格光纤激光器横截面的热应力分布。分析中所用参量:材料的杨氏模量 $E = 7.3\text{GPa}$,泊松比 $\gamma = 0.16$,热膨胀系数 $\alpha = 5 \times 10^{-6}$ 。由于光纤纤芯和外层的温差,内层试图比外层膨胀更多而产生了热应力,也就是光纤内层和外层拉伸和压缩轴向应力。结果表明:在 5W/m 热负载下,该种布喇格光纤激光器沿半径方向和轴向的最大应力远小于熔融硅的临界张应力值 10MPa ,因此可以忽略不计。

2 影响布喇格光纤激光器温度分布的因素

2.1 热功率密度

为了讨论布喇格光纤激光器温度与热功率密度的关系,有关参量可以设置为: $T_{\text{air}} = 300\text{K}$, $R_c = 25\mu\text{m}$, $R_{\text{in}} = 37\mu\text{m}$, $R_{\text{out}} = 40\mu\text{m}$, $h = 20\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\kappa_{\text{Si}} = 1.38\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\kappa_{\text{ac}} = 0.2\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。由图4可以看出:不同热功率密度对应的温度分布不同。虽然最高温度都在纤芯,但当热功率密度由 $q_1 = 1.6\text{W}/\text{mm}^2$ 增加到 $q_2 = 3.6\text{W}/\text{mm}^2$ 时,纤芯温度由 439K 增加到 613K 。对于同一布喇格光纤激光器,其输出功率越高,热功率密度就越大,从而纤芯温度也就越高。

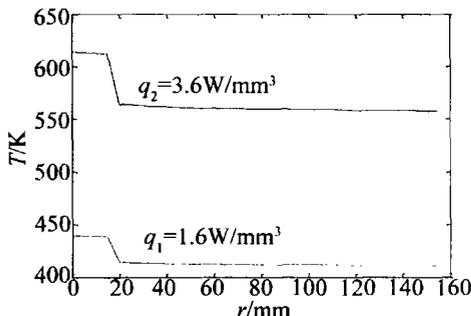


Fig. 4 Radial temperature distribution for different thermal power densities

2.2 光纤包层数

为研究布喇格光纤激光器温度与光纤包层数日关系,有关参量设置为: $q = 1.6\text{W}/\text{mm}^2$, $T_{\text{air}} = 300\text{K}$, $R_c = 25\mu\text{m}$, $h = 20\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\kappa_{\text{Si}} = 1.38\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\kappa_{\text{ac}} = 0.2\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,光纤包层数 $N_1 = 20$, $N_2 = 30$ 。由图5可见:外包层和涂覆层的半径随包层数目增加而增加,纤芯的温度也在增加。这一性质与双包层激光器纤芯温度随外包层半径增大而降低的性质类似。

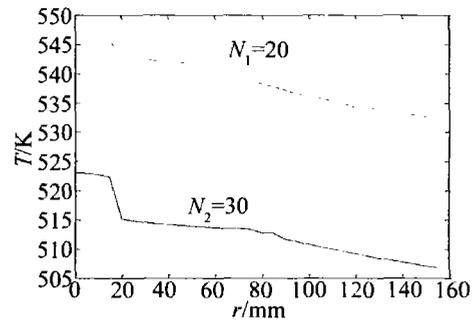


Fig. 5 Temperature distribution for different number of circular cladding-layers

2.3 环境的对流换热系数

为讨论布喇格光纤激光器温度与环境对流换热系数关系,有关参量设置为: $T_{\text{air}} = 300\text{K}$, $R_c = 25\mu\text{m}$, $R_{\text{in}} = 37\mu\text{m}$, $R_{\text{out}} = 40\mu\text{m}$, $q = 1.6 \times 10^2\text{W}/\text{cm}^2$, $\kappa_{\text{Si}} = 1.38\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\kappa_{\text{ac}} = 0.2\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。分别采用3种冷却媒质:空气传热系数 $h_{\text{air}} = 50\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,风的传热系数 $h_{\text{wind}} = 100\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,水的传热系数 $h_{\text{water}} = 500\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

由图6可见,热功率密度为 $160\text{W}/\text{cm}^2$ 时,采用空气媒质的纤芯温度接近 550K 。采用风冷方式,纤芯的温度为 430K 要比用空气媒质时的值低。水的传热系数比空气的至少大一个数量级,采用水冷方式纤芯的温度更低,不到 340K ,所以在高功率输出时,可以采用风冷或者水冷来降低光纤的温度。虽然掺杂硅的熔点很高,但覆层材料的临界温度大约 353K ,要实现高功率输出,应考虑加快热散失。

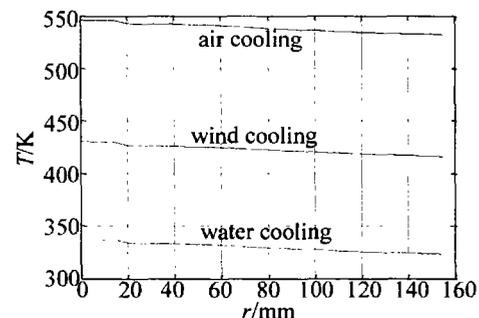


Fig. 6 Temperature distribution for different environmental heating coefficients

3 结论

对布喇格光纤激光器的热效应进行了研究。建立

了该型激光器的稳定热模型,分别利用热传导方程和数值有限元法讨论了布喇格光纤激光器的温度分布特性,并且研究了其温度分布的主要影响因素。研究结果对于大功率布喇格光纤激光器的散热设计具有重要参考价值。

参 考 文 献

- [1] LI K, WANG Y, ZHAO W, *et al.* High-power double-clad large-mode area photonic crystal fiber laser[J]. SPIE, 2005, 6028 : 60280/1-60280/6.
- [2] CHEN Z L, HOU J, JIANG Z F. Theoretical study on thermal effect in Yb-doped double-clad high power fiber laser[J]. *Leaser Technology*, 2007, 31(5) : 544-550 (in Chinese).
- [3] YE H P, YARIV A, MAROM E. Theory of Bragg fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1978, 68(9) : 1196-1201.
- [4] FVRIER S, GAPONOV D D, ROY P, *et al.* High-power photonic-bandgap fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(9) : 989-991.
- [5] CHENG X, XU J. Thermal and thermal-optical effects in high-power photonic crystal fiber lasers [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(12) : 124204/1-124204/5.
- [6] LIMPERT J, SCHMIDT O, ROTHHARDT J, *et al.* High-power rod-type photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(4) : 1055-1058.
- [7] SU H, LI Y, LU K, *et al.* Wavelength tunable Yb³⁺-doped double-clad photonic crystal fiber laser[J]. SPIE, 2007, 6823 : 682318/1-682318/7.
- [8] ORTA B, LECAPLAIN C, HIDEUR A, *et al.* High-power femtosecond Yb-doped single-polarization photonic crystal fiber laser [J]. SPIE, 2008, 6873 : 687321/1-687321/6.
- [9] BOULLET J, ZAOUTER Y, DESMARCHELIER R, *et al.* 94W ytterbium-doped single-mode rod-type photonic crystal fiber laser operating at 977nm[J]. SPIE, 2008, 7195 : 719504/1-719504/10.
- [10] YANG H J, HU Y, LIU J X, *et al.* Research for light propagation characteristics of Bragg fiber [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 18(12) : 1410-1413 (in Chinese).
- [11] CHEN H T, YANG H J, LIU P Sh, *et al.* Optimum design of low-loss hollow OmniGuide fibers [J]. *Optik*, 2010, 121(23) : 2113-2116.
- [12] ZHU H T, LOU H Q, ZHOU J, *et al.* Experimental and theoretical study on designing of cooling device for the kilowatt-level double cladding fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8) : 4966-4971 (in Chinese).
- [3] SHOU X H, WANG J G, YANG Y P, *et al.* Effects of infrared rays on chronic atrophic gastritis in rats[J]. *Journal Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2008, 12(4) : 775-778.
- [4] SUN J L, FAN J Z, SONG F Z, *et al.* Infrared radiation and magnetic field therapy ameliorates cartilage damage in rabbits with knee osteoarthritis[J]. *Journal of Southern Medical University*, 2007, 27(12) : 1851-1855 (in Chinese).
- [5] SUN J L, FAN J Z, ZHANG J H, *et al.* The influence of infrared radiation and magnetic fields in oxidation process of rabbit's knee osteoarthritis[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2006, 21(11) : 971-972 (in Chinese).
- [6] CHENG S J, WANG D, ZHANG G Y. The effects of infrared radiation on hyperglycemia in experimental diabetic rabbits and the regulating mechanism [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2000, 22(3) : 165-167 (in Chinese).
- [7] YANG W Q, WU Z Y, HU M. The effects of infrared radiation on the immunological function of tumor-bearing mice[J]. *Chinese Journal of Clinical Rehabilitation*, 2002, 6(8) : 1178-1178 (in Chinese).
- [8] CAO Z R, MA Y J, CHEN S L. Influence of various waveband infrared radiation lymphocyte proliferation in mice[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2000, 17(2) : 108-109 (in Chinese).
- [9] VANNUCCI R C, BRUCKLACHER R M, VANNUCCI S J. The effect of hyperglycemia on cerebral metabolism during hypoxia-ischemia in the immature rat [J]. *Journal of Cerebral Blood Flow Metabolism*, 1996, 16(5) : 1026-1033.
- [10] SHELDON R A, PARTRIDGE J C, FERRIERO D M. Postischemia hyperglycemia is not protective to the neonatal rat brain[J]. *Pediatric Research*, 1992, 32(4) : 489-493.
- [11] YAGER J Y, HEITJAN D F, TOWFIGHI J. Effect of insulin-induced and fasting hypoglycemia on perinatal hypoxia-ischemic brain damage[J]. *Pediatric Research*, 1992, 31(2) : 138-142.
- [12] DHAHBI J M, MOTE PL, CAO S X, *et al.* Hepatic gene expression profiling of streptozotocin-induced diabetes [J]. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 2003, 5(3) : 411-420.
- [13] ERDAL N, GURGUL S, TAMER L. Effects of long-term exposure of extremely low frequency magnetic field on oxidative/nitrosative stress in rat liver[J]. *Journal of Radiation Research*, 2008, 49(2) : 181-187.

(上接第 666 页)