

双半圆柱激光器的设计及其热效应分析

吴朝辉^{1,2} 郭强^{1,2} 周健^{1,2} 王首长^{1,2} 黄荔^{1,2}

(¹中国科学院安徽光学精密机械研究所 激光技术与应用研究室, 安徽 合肥 230031)
²安徽光子器件与材料省级实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 针对板条、盘片和管状激光器由于不是圆形光斑而难于聚焦及棒状激光器的热效应问题,设计了一种双半圆柱激光器。双半圆柱激光器能实现圆斑输出,而热效应要优于棒状激光器。用 ANSYS 软件进行的热效应数值模拟分析表明,双半圆柱状激光器比棒状激光器最高温度低 25 °C 左右,最大温差低 11 °C 左右,最大热应力在棒状激光器的 60% 以下。

关键词 激光器;双半圆柱;热效应;数值模拟

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.031401

Design and Thermal Effect Analysis of a Double-Semi-Cylinder Laser

Wu Zhaohui^{1,2} Guo Qiang^{1,2} Zhou Jian^{1,2} Wang Shouzhong^{1,2} Huang Li^{1,2}

(¹Laboratory of Laser Technology and Applications, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
²Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract We design a double-semi-cylinder laser in order to solve the problem that the beams of slab laser, disk laser and tube laser are difficult to focus because they are not round and the problem of rod laser with a poor thermal effect. The beam of double-semi-cylinder laser can be round and its thermal effect is much better than rod laser. Results of numerical analysis with ANSYS software show that the highest temperature of double-semi-cylinder laser is about 25 °C lower than that of rod laser; its largest temperature difference is about 11 °C lower, and its largest thermal strain is less than 60% of that of rod laser.

Key words lasers; double-semi-cylinder; thermal effect; numerical simulation

OCIS codes 140.3320; 140.0140; 140.6810; 140.3580

1 引言

激光器的热效应一直是激光器中一个严重的问题,由热效应产生的双折射、热透镜、热畸变等制约着激光器的发展。为了解决激光器的热效应问题,目前采用的方式主要有板条激光器、管状激光器^[1]、盘状激光器。近年来对于激光器的热效应分析主要集中在板条和盘状激光器上^[2~5],同时也有管状激光器的热效应分析^[6]。文献[2]对棒状、板条和盘状激光器的热效应进行了比较分析,在抽运功率为 500 W,效率为 0.8,周围温度为 77 K 的情况下,盘片激光器单位吸收功率产生的温度最低。文献[7]对有关激光器的热效应的分析进行了总结。在对其他几何形状的激光器进行的热效应分析中,国外文献中有对方柱形、六角棱柱形和三棱柱形激光器的热效应分析。板条激光器、管状激光器的热效应大大优于圆棒状激光器,然而它们由于聚焦困难而难于将能量集中。盘片激光器显示最好的热效应,但由于光斑较大,聚焦也比较困难,且其光学系统十分复杂,元器件多,不利于系统的稳定^[8]。现实工程中往往要求激光器光斑为便于聚焦的小圆斑,棒状激光器因为构造简单且光斑符合要求而得到广泛应用。因此,对于棒状激光器的热效应研究一直是一个重要的课题。加大冷却系统散热效率是一个很好的方式,但也受到冷却系统本身条件的限制。本文设计了一

收稿日期: 2011-07-20; 收到修改稿日期: 2011-09-19; 网络出版日期: 2011-12-23

作者简介: 吴朝辉(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光器热效应方面的研究。E-mail: wuzhaohui20050@163.com

导师简介: 郭强(1963—),男,研究员,主要从事激光集成技术方面的研究。E-mail: qguo@aiofm.ac.cn

种双半圆棒激光器,能实现圆斑输出,而且在同等冷却系统的条件下,其热效应优于棒状激光器。近年来抽运系统主要向全固态激光器发展,全固态激光器的热效应也研究得比较广泛^[9],但由于一种腔型可适用于多种抽运系统,本文采用比较简单的闪光灯抽运进行分析。

2 激光器结构

如图1所示,M和OC分别为谐振腔的全反镜和输出镜,中间部分为激光器谐振腔的剖面图。为了使结构更简单实用,此双半圆柱激光器结构尽量与棒状激光器相似。图1聚光腔下半部分为闪光灯,上半部为两根固定的半圆柱棒。可以看出,两个半圆柱棒相距一定的距离,使得冷却水可以流过两根半圆棒的夹缝从而提高冷却效果。为了保证中间夹缝部分的水流速度,夹缝的尺寸设计尽量与棒半径相当,如对于 $R=0.32\text{ cm}$ 的两个半圆柱,中间的距离为 0.4 cm 。为了使得水流更好地通过棒中间的夹缝,进出水嘴处于聚光腔的异侧。两个分离的半圆柱由棒套固定,因此棒套与激光棒接头部分的横截面为两个相对的 $R=0.32\text{ cm}$ 的半圆,中间距离为 0.4 cm 。由于从谐振腔里出来的是两束平行的半圆形的激光,因此需用聚光片把它们聚合成圆形光束以便于聚焦。四棱镜能够很好地平移光束且损耗非常小。图2是模拟的四棱镜聚光图。

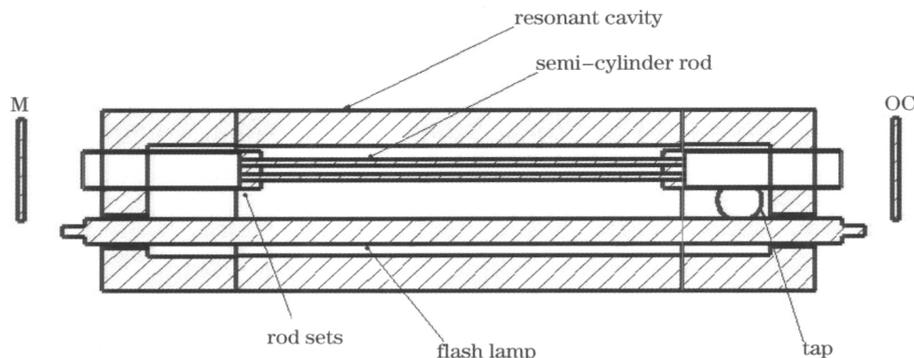


图1 双半圆柱激光器结构图

Fig. 1 Structure of double-semi-cylinder laser

四棱镜与光束垂直的面高度与夹缝宽度相等,为 0.4 cm 。由图2可以看出,光束的偏移量正好为棱镜与光束垂直的面的高度,这样两束半圆激光便合成圆形光束。光束垂直于棱镜的入射面入射,并且在棱镜里面可以实现全反射,因此棱镜对激光的损耗非常小。棱镜的下角两束光合并的地方需要进行切割,以免挡住下半圆柱光束。

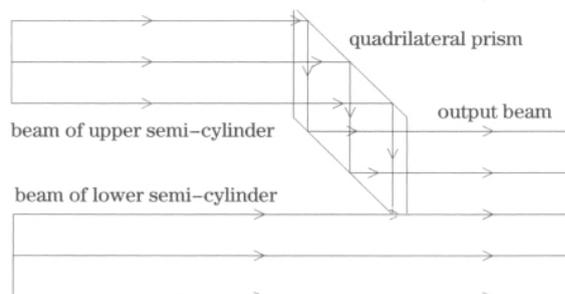


图2 四棱镜聚光图

Fig. 2 Schematic of obtaining a round beam by quadrilateral prism

3 热效应分析

双半圆柱激光器的横截面由两个相对的半圆组成,中间的夹缝供水流通过,由于对称性,在分析其热效应时只要考虑其中一个半圆即可。

忽略轴向的热传导,可以列出二维平面极坐标系下的热传导方程^[10]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = -\frac{Q}{k}, \quad (1)$$

式中 Q 为激光棒中生热率, k 为晶体导热系数。

边界条件为^[11]

$$\begin{cases} k \frac{\partial T}{\partial r} + H_1 = 0 \mid r = R \\ k \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + H_2 = 0 \mid \theta = 0, \\ k \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + H_2 = 0 \mid \theta = \pi \end{cases} \quad (2)$$

式中 H_1 为半圆弧表面对流换热系数, H_2 为夹缝处对流换热系数。具体解方程的过程比较复杂, 这里用 ANSYS 软件进行数值模拟分析。

根据文献[11]的数据, 取棒的半径为 $R=0.32 \text{ cm}$, 发热率为 $Q=248.68 \text{ W/cm}^3$, YAG 晶体导热系数为 $k=0.14 \text{ W/(cm}\cdot\text{K)}$, 半圆弧表面冷却水对流换热系数为 $H_1=1 \text{ W/(cm}^2\cdot\text{K)}$ 。夹缝水流速度由于受晶体剪切力的影响要小于圆弧表面速度, H_2 的值比 H_1 小, 文献[11]显示水流速度小时对流换热系数大于 $0.2 \text{ W/(cm}^2\cdot\text{K)}$ 。而 H_2 的具体数值与夹缝宽度和腔结构有关, 这里取 $H_2=0.3 \text{ W/(cm}^2\cdot\text{K)}$ 。

为了比较双半圆柱激光器和圆柱激光器的热效应, 需要对相同情况下的圆柱棒进行热效应分析。采用半径为 $R=0.32 \text{ cm}$ 的圆棒。由于采用相同的冷却系统, 在谐振腔里面的水流速度可认为和双半圆柱激光器相等, 因此其表面对流换热系数为 $H_1=1 \text{ W/(cm}^2\cdot\text{K)}$ 。由于采用同样的抽运系统, 其发热率也为 $Q=248.68 \text{ W/cm}^3$ [11]。Nd:YAG 的杨氏模量为 $E=3\times 10^3 \text{ kg/cm}$, 热膨胀系数为 $\alpha=7.9\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 泊松比 $\nu=0.3$ [6]。

图 3 为 ANSYS 软件模拟得到的半圆截面和圆截面激光棒在相同情况下的温度分布图。

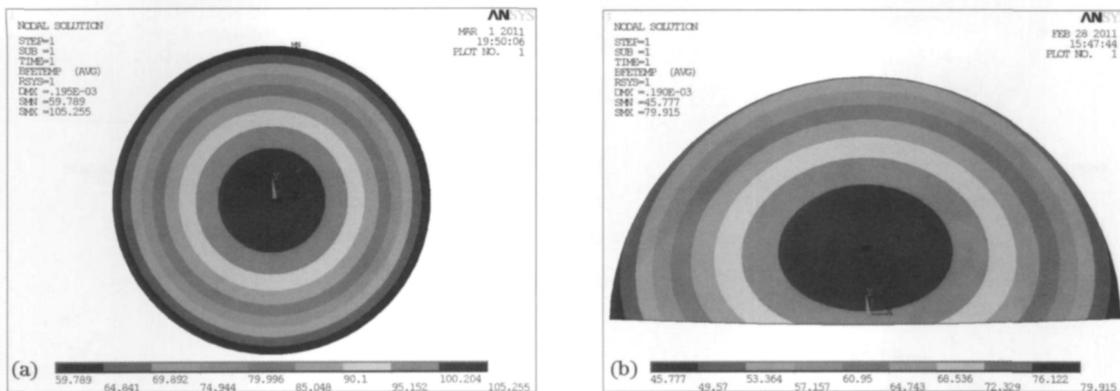


图 3 (a)圆棒和(b)半圆棒横截面的温度分布

Fig. 3 Distribution of temperature in cross-section of (a) round rod and (b) semi-cylinder rod

图 3 显示圆棒中心最高温度为 $105.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 最低温度为边缘的 $59.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 最大温差为 $45.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 双半圆柱最高温度为 $79.9 \text{ }^\circ\text{C}$, 最低温度为 $45.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 最大温差为 $34.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。显然双半圆柱激光器的最高温度比圆棒激光器低 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 温差低 $11 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。夹缝间的水流速度对双半圆棒激光器的温度有一定影响, 在这里夹缝对流换热系数设定了一个较小的值, 在具体工程中可设计如喇叭口之类的形状来增大夹缝水流速度, 从而使得半圆内的温度进一步降低。分析结果表明, 在同等条件下双半圆柱激光器可承受的抽运功率更高, 能在更高的重复频率下工作。

把截面的温度分布作为载荷加入到 ANSYS 软件中做圆棒和双半圆柱棒的热应力分析, 得到如图 4~6 所示结果。

图 4~6 为 ANSYS 软件得到的圆棒和双半圆柱棒中轴向、角向和径向的热应力分布。总应力大小为三个方向应力矢量和的大小, 因此若三个方向应力的分布不重叠, 则总应力越小。从图中可以看出, 半圆柱状激光棒中应力较大的区域分布不重叠, 三个方向的应力几乎不叠加; 而圆棒的应力 σ_r 和 σ_θ 的最大值都在表面处, 两者之间的矢量叠加使得总应力较大。通过矢量和计算得到, 圆棒最大应力位于晶体棒表面, 大小为 $\sigma_{\max}=1015.4 \text{ kg/cm}^2$, 而双半圆柱应力最大处位于轴向应力最大处, 大小为 $\sigma_{\max}=588.4 \text{ kg/cm}^2$ 。可见双半圆柱棒的最大应力小于圆棒的 60% 。

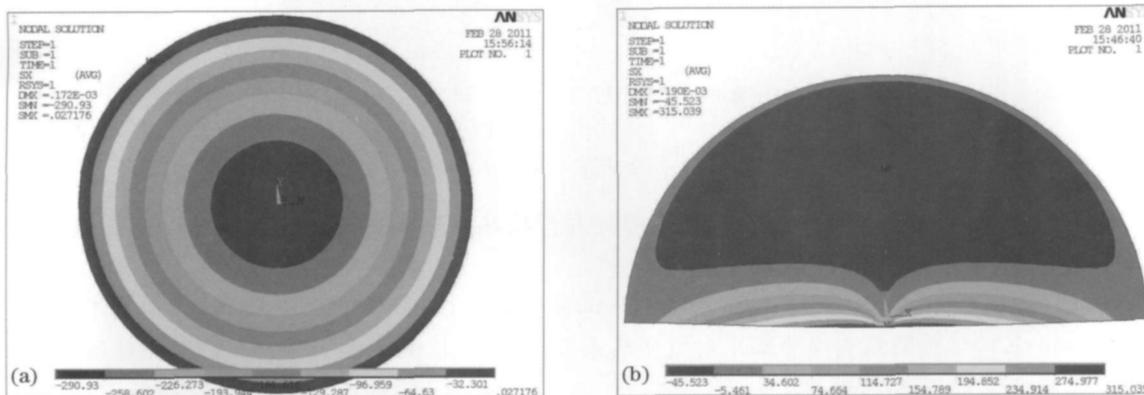


图 4 (a)圆棒和(b)半圆棒横截面的轴向应力分布图

Fig. 4 Axial strain distribution in cross-section of (a) round rod and (b) semi-cylinder rod

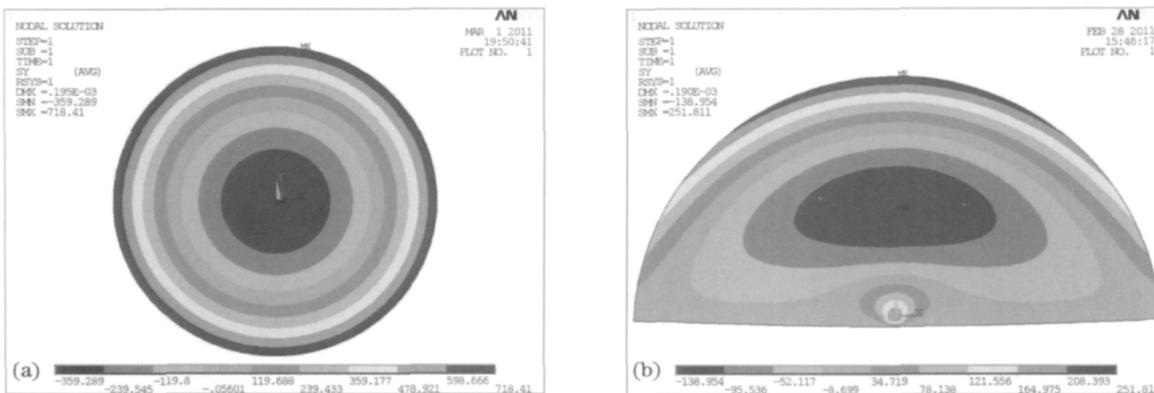


图 5 (a)圆棒和(b)半圆棒横截面的角向应力分布图

Fig. 5 Angular strain distribution in cross-section of (a) round rod and (b) semi-cylinder rod

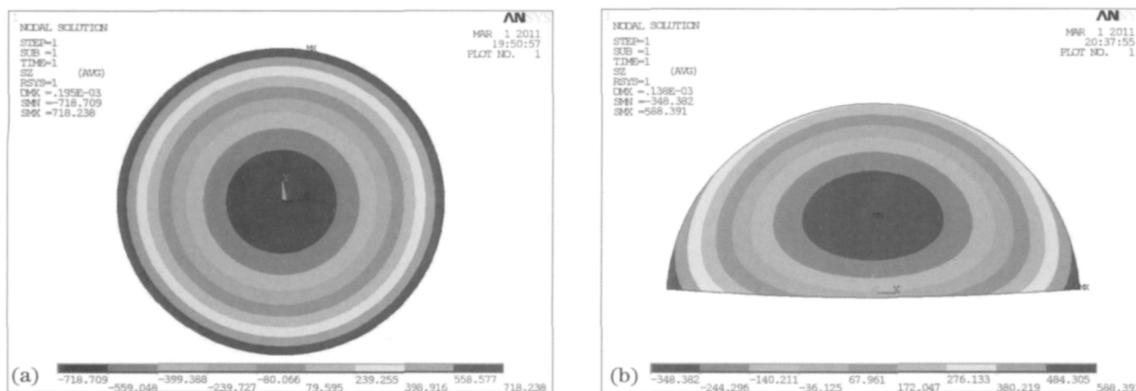


图 6 (a)圆棒和(b)半圆棒的径向应力分布图

Fig. 6 Radial strain distribution in cross-section of (a) round rod and (b) semi-cylinder rod

应力裂纹极限是指使得晶体出现应力裂纹的最小应力,是限定抽运功率大小的一个重要指标。从上面分析可以看出,双半圆柱棒由于最大应力较小而允许抽运功率大大提高,从而使得输出功率提高。而提高夹缝水流速度,可使得双半圆柱激光器内部温度和热应力进一步降低,从而得到更好的热效应。

4 结 论

针对现有的热效应较优越的几种激光器,如板条、管状、盘片激光器难于将光束能量聚焦的缺点及棒状

激光器急于解决的热效应问题设计了一种双半圆柱激光器。用 ANSYS 软件对双半圆柱激光器和棒状激光器进行了热效应分析。温度分析结果显示,双半圆柱激光器最高温度要比圆棒激光器低 2.5℃左右,最大温差低 11℃左右。应力分析结果显示,双半圆柱激光器有各向应力分布不重叠的优点,其最大应力为 588.4 kg/cm²,比棒状激光器的最大应力低了 60%以上。因此,双半圆柱激光器有着更好的热效应,能承受更大的抽运功率,这将有利于激光输出能量和光束质量的提高。

参 考 文 献

- 1 U. Wittrock, H. Weber. Inside-pumped Nd³⁺YAG tube laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14): 1092~1094
- 2 Michael M. Tileman. Thermally Induced aberration in solid-state lasers [C]. *SPIE*, 2010, **7578**: 757816
- 3 T. Kane, J. Eggleston, R. Byer. The slab geometry laser-2: thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **21**(8): 1195~1210
- 4 Beil Kolja, T. Susanne, Thoroton Fredrich *et al.*. Thermal and laser properties of Yb³⁺LuAG for kW thin disk lasers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(20): 20712~20722
- 5 Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Geometric optimization and thermal effect of five-sided slab [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1784~1786
刘 亮, 郭少锋, 陆启生 等. 五边形板条的优化设计及其热效应分析 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1784~1786
- 6 Wu Xing, Shi Xiangchun, Ding Yongkui *et al.*. Analysis of thermal effect intube YAG [J]. *J. Tianjin University*, 2000, **33**(6): 730~735
武 星, 施翔春, 丁永奎 等. 管状 YAG 激光器中热效应的分析 [J]. *天津大学学报*, 2000, **33**(6): 730~735
- 7 Li Zhigang. Study on the Heat Transfer and the Thermal Stress in High-Power Solid-State Lasers [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 1~20
李志刚. 大功率固态激光器中的传热与热应力研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所, 2008. 1~20
- 8 A. Giesen. Results and scaling laws of thin disk lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5332**: 212~227
- 9 Zhang Xiang, Su Likun, Cai Qing. Analysis of thermal effect and experimental test of beam wavefront aberration in all solid-state Nd³⁺YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 804~807
张 翔, 苏礼坤, 蔡 青 等. 全固态 Nd³⁺YAG 激光器热效应及输出光束波前像差分析 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 804~807
- 10 J. K. Manna, H. Weber. Surface heat transfer coefficients heat efficiency and temperature of pulsed solid-state lasers [J]. *Appl. Phys.*, 1988, **64**(3): 1015~1020
- 11 Walter Koehner. Solid-State Laser Engineering[M]. Berlin: Springer, 1999. 356~377