

文章编号: 0258-7025(2010)01-0030-04

# 千瓦级二极管激光侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器

胡 浩 蒋建锋 雷 军 唐 淳 涂 波 吕文强 赵 娜 邬映臣

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 建立了侧面抽运板条激光器的热力学模型, 对千瓦级侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器的温度和应力进行了数值模拟, 并对结果进行了分析。在抽运平均功率 3890 W 时, 侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器获得了 1012 W 平均功率输出, 斜率效率约 31%, 光-光转换效率约 26%。测量了板条侧面的温度, 与数值模拟结果吻合较好。

**关键词** 激光技术; 板条激光器; 千瓦级; 侧面抽运

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103701.0030

## Diode Laser Side Pumped kW-Class Nd:YAG Slab Laser

Hu Hao Jiang Jianfeng Lei Jun Tang Chun Tu Bo Lü Wenqiang  
Zhao Na Wu Yingchen

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The thermodynamic model of side pumped slab laser was established. By numerical simulation, the temperature and the thermal stress of kW-class side pumped Nd:YAG slab laser was obtained. These results were analyzed. In the condition of 3890 watts's average pump power, the average output power of side pumped Nd:YAG slab laser was achieved to 1012 watts, with slope efficiency of 31% and optical to optical efficiency of 26%. The temperature of slab's side was measured and accorded well with the simulating results.

**Key words** laser technique; slab laser; kW-class; side pumped

## 1 引 言

增益介质的高效热管理一直是困扰高平均功率固体激光器发展的关键因素之一, 为解决该问题, 相关科研人员发展了板条、薄片、光纤、热容等技术途径, 并取得了重大进展。2005 年 Northrop Grumman 公司的两路相干合成 Nd:YAG 板条主振荡功率放大器(MOPA)二极管抽运激光(DPL)获得了 27 kW 的平均功率输出, 工作时间达 350 s, 在输出功率 19 kW 时, 光束质量优于 2 倍衍射极限。该激光器的每路放大器链由 4 个传导冷却、端面抽运的 Nd:YAG 板条增益模块组成, 单个板条增益模块在稳腔条件下可以获得 4 kW 的平均功率输出<sup>[1]</sup>。板条激光器作为高平均功率固体激光器发展的有效途径, 受到越来越多的重视。

本文通过理论分析和数值模拟, 分析了侧面抽运板条激光器的温度和热应力。板条增益介质尺寸 103 mm(长)×30 mm(宽)×5 mm(高), 最大输出平均功率 1012 W, 斜率效率约 31%, 光-光转换效率约 26%。

## 2 侧面抽运板条热力学理论模型

图 1 为侧面抽运板条激光器示意图。Nd:YAG 板条增益介质通过上下表面的冷却器进行冷却, 二极管激光器阵列(DLA)发出的抽运光通过耦合系统从板条两个侧面进行抽运。

板条增益介质通过上下表面进行冷却, 假定板条增益介质的热传导只发生在厚度方向, 忽略宽度和长度方向上的热传导。选取直角坐标系使  $x, y$  和

收稿日期: 2008-10-13; 收到修改稿日期: 2008-11-28

基金项目: 国防基础科研项目资助。

作者简介: 胡 浩(1979—), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事激光二极管抽运高平均功率固体激光器方面的研究。

E-mail: haozilpp@sohu.com

$z$  分别沿宽、厚和长的方向。板条厚度为  $t$ 。用  $t/2$  对  $y$  归一化得到沿厚度  $y$  方向的稳态温度分布为<sup>[2,3]</sup>

$$T(y) - T_c = \frac{Qt}{2h} + \frac{Qt^2}{8\kappa}(1 - y^2), \quad (1)$$

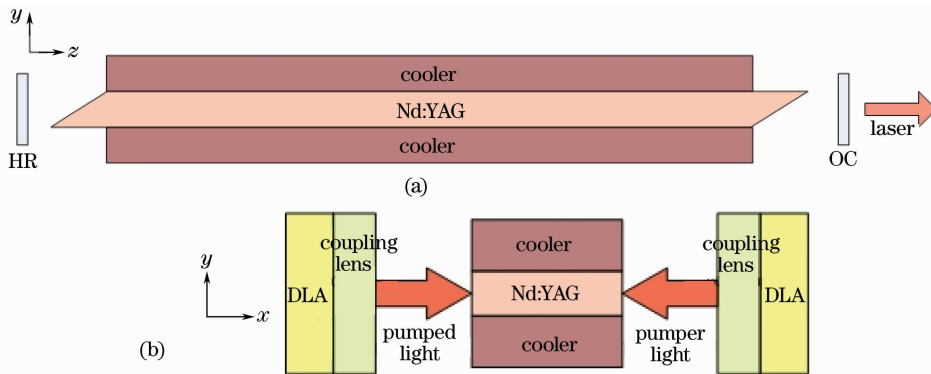


图 1 侧面抽运板条激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of side pumped slab laser

式中  $T_c$  为冷却液温度,  $Q$  为热沉积功率密度,  $h$  为上下表面的表面换热系数,  $\kappa$  为 Nd:YAG 介质的热导率(取  $0.14 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )。

(1)式表明,在板条中心  $y=0$  处温度最高

$$T(0) = T_c + \frac{Qt}{2h} + \frac{Qt^2}{8\kappa}, \quad (2)$$

在板条上下表面  $y=\pm 1$  处温度最低

$$T(\pm 1) = T_c + \frac{Qt}{2h}, \quad (3)$$

板条中心与表面的温差为

$$\Delta T = \frac{Qt^2}{8\kappa}. \quad (4)$$

由热弹性理论,利用(1)式可得热应力沿  $x$ ,  $y$  和  $z$  方向的分量  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  和  $\sigma_{zz}$  为<sup>[2,3]</sup>

$$\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \frac{\alpha EQt^2}{8(1-\nu)\kappa} \left( y^2 - \frac{1}{3} \right), \quad (5)$$

$$\sigma_{yy} = 0.$$

式中  $\alpha$  为热膨胀系数,  $7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;  $E$  为弹性模量,  $3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  $\nu$  为泊松比, 0.28。

在板条表面  $y=\pm 1$  处,板条热应力为

$$\sigma_{xx} \Big|_{y=\pm 1} = \sigma_{zz} \Big|_{y=\pm 1} = \frac{\alpha EQt^2}{12(1-\nu)\kappa}. \quad (6)$$

在板条中心  $y=0$  处,板条热应力为

$$\sigma_{xx} \Big|_{y=0} = \sigma_{zz} \Big|_{y=0} = -\frac{\alpha EQt^2}{24(1-\nu)\kappa}. \quad (7)$$

### 3 数值模拟结果及分析

两个激光二极管阵列从板条两侧抽运,板条增益介质在宽度方向不同位置厚为  $dx$  的微元段的热沉积功率密度分布为<sup>[4]</sup>

$$dP_d(x) = \frac{D_t P_{\text{peak}} \eta_{oc} \eta_n}{2} \times \{ \exp(-\alpha_D x) + \exp[-\alpha_D(l-x-dx)] \} \times [1 - \exp(-\alpha_D dx)], \quad (8)$$

式中  $D_t$  为占空比,  $P_{\text{peak}}$  为抽运峰值功率,  $\eta_{oc}$  为耦合效率,  $\alpha_D$  为吸收系数(取  $1 \text{ cm}^{-1}$ ),  $\eta_n$  为产热比(取 0.35)。

板条增益介质的侧面抽运区域为  $7 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ 。抽运源峰值功率为 28500 W。抽运光耦合效率 85%。在占空比 15% 时,利用(8)式得到的板条宽度方向热沉积功率密度分布如图 2 所示。从图中可看出,热沉积功率密度最大的位置出现在掺杂板条的两侧,最大达到  $184 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

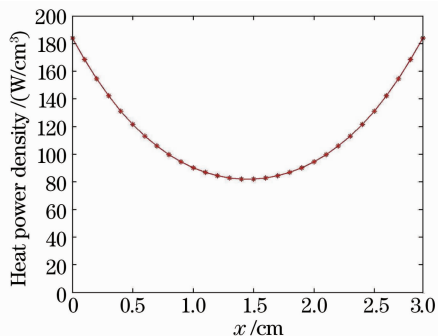


图 2 侧抽运板条宽度方向的热沉积功率密度  
Fig. 2 Heat power density versus width in side pumped slab

假设冷却液温度为 300 K,表面换热系数为  $10 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。在板条两表面,利用(1)式可以得到厚度方向的温度分布,如图 3 所示。厚度方向温度呈抛物线对称分布,在  $y=0$  处温度最高为 343.37 K。

将由(8)式得到的板条宽度方向的热沉积功率密度代入(2)式,得到  $y=0$  处的温度与板条宽度方向位置的关系,如图4所示。图4表明  $y=0$  处的温度与热沉积功率密度成线性关系,因此图4与图2的曲线形状类似。综合图3和图4可得板条的最高温度在板条侧面的中间位置。

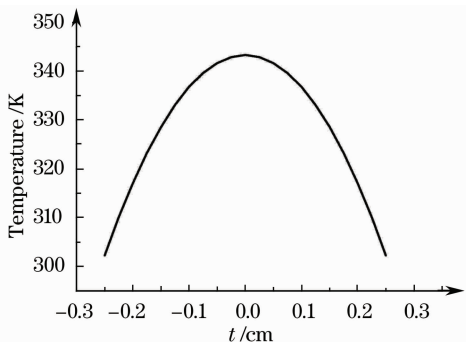


图3 板条侧面厚度方向的温度分布

Fig. 3 Temperature versus thickness at slab's side

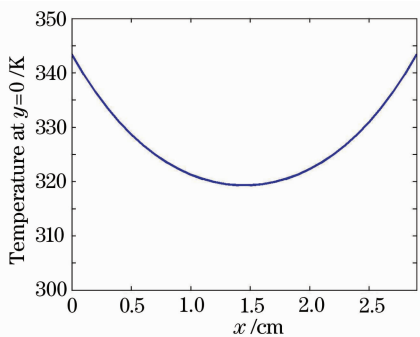


图4  $y=0$  处的温度与板条宽度方向不同位置的关系

Fig. 4 Temperature at  $y=0$  versus width in slab

利用(5)式和得到的板条侧面的热沉积功率密度,可得到板条侧面厚度方向的热应力分量  $\sigma_{xx}$  和  $\sigma_{yy}$  的分布,如图5所示。板条侧面热应力分量  $\sigma_{xx}$  和  $\sigma_{yy}$  的最大值在上下两边,最大值为  $855 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

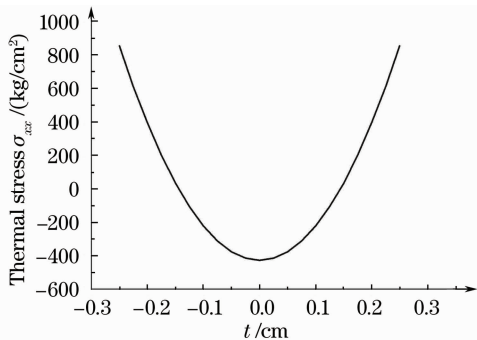


图5 板条侧面厚度方向的热应力  $\sigma_{xx}$  的分布

Fig. 5 Thermal stress  $\sigma_{xx}$  versus thickness at slab's side

将由(8)式得到的板条宽度方向的热沉积功率密度代入(6)式,得到  $y=\pm 1$  处的热应力分量  $\sigma_{xx}$  和

$\sigma_{yy}$  与板条宽度方向位置的关系,如图6所示。从图5和图6可知板条热应力分量  $\sigma_{xx}$  和  $\sigma_{yy}$  的最大值出现在板条侧面和上下表面相交的棱边附近。

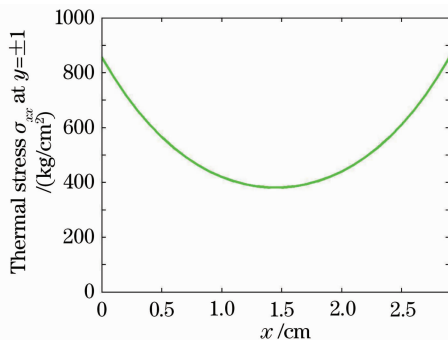


图6  $y=\pm 1$  处热应力  $\sigma_{xx}$  与板条宽度不同位置的关系

Fig. 6 Thermal stress  $\sigma_{xx}$  at  $y=\pm 1$  versus width in slab

采用有限元方法对板条增益介质的温度和热应力进行数值模拟<sup>[4,5]</sup>。建立的有限元模型在板条的上下表面各加了1层2 mm厚的铜导热层,铜导热层的约束对板条的热应力大小和分布有一定影响。在占空比15%时,数值模拟结果如图7和图8所示。板条最高温度为343.5 K,与理论计算的结果很接近。板条的最大等效应力为  $615 \text{ kg/cm}^2$ 。

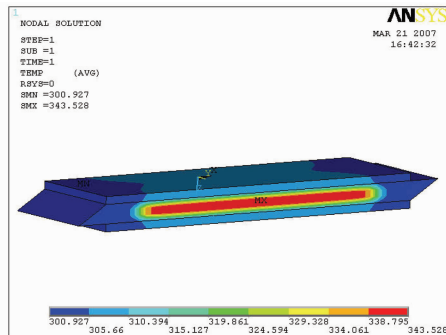


图7 占空比15%时,侧面抽运板条的温度分布

Fig. 7 At duty cycle 15%, temperature distribution in slab

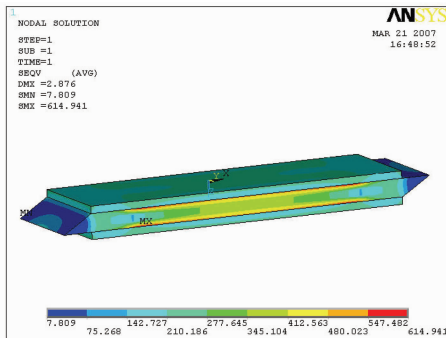


图8 占空比15%时,侧面抽运板条的等效应力分布

Fig. 8 At duty cycle 15%, equivalent stress distribution in slab

## 4 实验研究

图 9 是二极管激光侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器实验装置。板条尺寸为  $103\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ，板条上下表面通过冷却器进行冷却，冷却液温度为  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。两个激光二极管阵列从板条两侧面对板条进行抽运，两个激光二极管阵列在占空比 15%，电流 120 A 时平均功率为 3890 W。谐振腔腔形为平凹腔，全反镜为凹面镜，曲率半径为 5 m；输出镜为平面镜，透过率为 55%；腔长约 15 cm。图 10 为重复频率 500 Hz，脉冲宽度 300  $\mu\text{s}$ ，不同电流下的输出功率。在 120 A 时输出功率为 1012 W，光-光转换效率约 26%，斜率效率约为 31%。

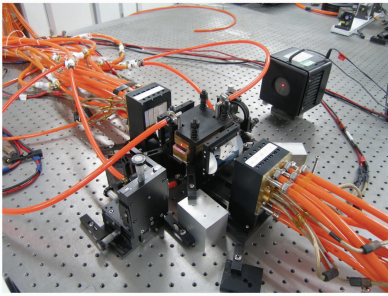


图 9 侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器实验装置

Fig. 9 Photograph of side pumped Nd:YAG slab laser

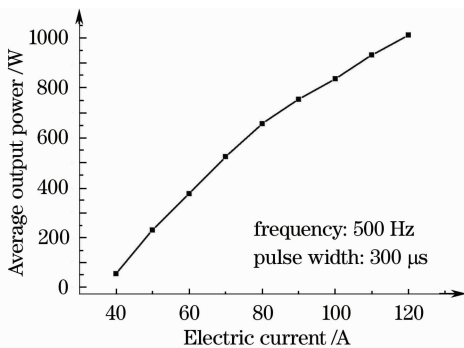


图 10 不同电流下的平均输出功率

Fig. 10 Average output power versus electric current

采用热像仪测量了板条侧面的温度，板条侧面温度最高值为  $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与冷却液温差为  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。数值模拟采用的抽运功率与实际的抽运功率略有差距，模拟得到的温差与实际的温差很接近，说明数值模型基本准确。

## 5 结 论

建立了侧面抽运板条激光器的热力学模型，对千瓦级侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器设计模型的温度和应力进行了数值模拟及分析。在重复频率 500 Hz，脉冲宽度 300  $\mu\text{s}$ ，电流 120 A 时，激光二极管阵列抽运平均功率为 3890 W，获得了 1012 W 的平均功率输出，光-光转换效率约 26%，斜率效率约为 31%。测量了板条侧面的温度，板条侧面温升与数值模拟结果非常接近，验证了热力学模型及数值模拟的可信性。

## 参 考 文 献

- 1 Gregory D. Goodno. 19 kW Phase-locked MOPA Laser Array. www.northropgrumman.com. 2006
- 2 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zhewen, Cheng Guosiang Transl. Beijing: Science Press, 2002. 82  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥等译. 北京: 科学出版社, 2002. 82
- 3 Lü Baida. Solid-State Lasers[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002  
吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002
- 4 Hu Hao, Tu Bo, Jiang Jianfeng *et al.*. Numerical simulation of thermodynamics in laser medium for heat capacity laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(S0): 180~184  
胡浩, 涂波, 蒋建锋等. 热容激光器激光介质的热力学数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(S0): 180~184
- 5 Hu Hao, Cai Zhen, Jiang Jianfeng *et al.*. Numerical simulation of thermodynamics in cooling for heat capacity laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1507~1511  
胡浩, 蔡震, 蒋建锋等. 热容激光器冷却过程的热力学数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1507~1511