

# LD 侧面泵浦板条激光器热分布研究

郑长波<sup>1</sup>, 吕珍龙<sup>2</sup>

(1. 南阳师范学院物理与电子工程学院, 河南 南阳 473061; 2. 河南科技大学理学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**建立了二极管侧面泵浦板条激光介质模型,给出了相应的热传导方程,应用有限差分法对热传导方程进行求解,得出了介质内的温度分布。分析了不同吸收系数下以及采用单、双侧泵浦时介质吸收的光强分布及温度分布,并讨论了在单、双侧泵浦条件下,泵浦功率变化对介质温度分布的影响。结果表明采用双侧泵浦更利于获得均匀的温度分布,泵浦功率增大时热效应将显著增大。

**关键词:**固体板条激光器;侧面泵浦;热分布;有限差分法

**中图分类号:**TN242      **文献标识码:**A

## Study on the thermal distribution of LD side pumped slab laser

ZHENG Chang-bo<sup>1</sup>, LÜ Zhen-long<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;

2. Math and Physics School of Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:**The diode side pump model of solid slab laser is established. The temperature distribution is given out by solving the thermal conduction equation with finite difference method. The absorbed light power and temperature distribution inside the medium with one side-pump and two side-pump are studied respectively. And the influence of pump power on the temperature distribution is also discussed. The results show that homogenous temperature is easier to obtain with two side-pump model and the thermal deformation increases with the increasing pump power.

**Key words:**solid slab laser;side pump;thermal distribution;finite difference method

### 1 引言

近年来,随着工业领域中诸如激光材料加工等对激光器的需求,及惯性约束核聚变研究的需要,人们对二极管(LD)泵浦的高能及高功率固体激光器进行了大量研究并取得了很大的进展,出现了适用于不同领域使用的各种二极管泵浦固态激光器<sup>[1]</sup>。

与传统闪光灯泵浦固体激光器相比,二极管泵浦固体激光器具有能量转换效率高、输出功率高、光束质量高、结构紧凑及使用寿命长等优点<sup>[2]</sup>。对二极管泵浦固体激光器而言,在低泵浦功率下可以不考虑激光工作介质因吸收泵浦光而产生的热效应,但是随着泵浦功率的增大,激光介质吸收的泵浦光将随之增大,即使在水冷的情况下,也会在介质内部形成一定的温度场分布,进而使介质内部产生热

效应,影响激光器的工作效率<sup>[3]</sup>,所以高功率固体激光器工作介质中的热效应现象是一个值得研究的问题。本文从理论上对二极管侧面泵浦板条激光介质中的光强分布进行分析,采用有限差分法对温度分布等进行数值计算模拟,来探讨介质增益系数及泵浦方式对介质内光强及温度分布的影响,为激光器的设计提供一定的理论参考。

### 2 泵浦模型及热传导方程

泵浦模型如图1所示:板条宽度为 $a$ ,厚度为 $b$ ,板条长度为 $c$ ,泵浦光从左侧垂直 $YZ$ 面入射,四周采用强制制冷条件,使介质边界温度始终恒定在 $T = 293$  K。

作者简介:郑长波(1979-),男,硕士,实验师,主要从事实验技术与光学技术方面的研究。E-mail:13037698114@163.com

收稿日期:2010-09-16;修订日期:2010-11-04

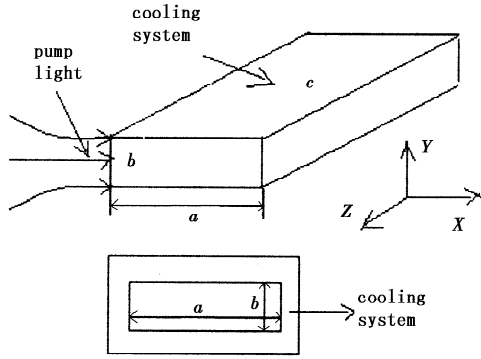


图1 板条介质泵浦模型(图为XY面截面图)

Fig. 1 model of LD side pump slab

(the lower figure is the cross section of XY plane of the slab)

考虑到通常  $c \gg a > b$ , 故可认为  $Z$  方向是无限长, 可以不考虑该方向的热传导效应, 则问题简化为研究  $XY$  面内的二维光强和温度分布, 此时稳态热传导方程可简化为:

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} + \frac{\eta q(x, y)}{k} = 0 \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为介质吸收的光能的热转换率;  $k$  为热传导系数;  $q$  为光空间分布函数。泵浦时, LD 线阵发出的光在宽度方向很窄, 其光强在阵列宽度方向的分布可近似为高斯型分布。单侧泵浦及双侧泵浦并考虑介质吸收时的光强分布可分别表示为<sup>[4]</sup>:

$$q(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{w_y c} \exp\left(-\frac{y^2}{w_y^2} - \alpha x\right) \quad (2)$$

$$q(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{w_y c} \exp\left[-\frac{y^2}{w_y^2} - \alpha(x + (a - x))\right] \quad (3)$$

式中,  $P$  为泵浦光功率;  $w_y$  为泵浦光腰斑半径;  $\alpha$  为介质吸收系数。

### 3 热传导方程的求解

利用数值分析中的差分法求解热传导方程。首先将求导离散转化成微商形式<sup>[5]</sup>, 即将方形域  $R = \{(x, y): 0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b\}$  等间隔的划分成  $N \times M$  个小方形单元, 间隔大小为  $h$ 。假设除边界单元外的某一个节点的温度用  $T_{i,j}$  表示, 则与其相邻的四个节点的温度分别为  $T_{i-1,j}$ ,  $T_{i+1,j}$ ,  $T_{i,j-1}$ ,  $T_{i,j+1}$ , 均可用  $(i, j)$  点的温度展开:

$$T_{i-1,j} = T_{i,j} - h \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i,j} + \frac{1}{2!} h^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{i,j} - \frac{1}{3!} h^3 \left( \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right)_{i,j} + \dots \quad (4)$$

$$T_{i+1,j} = T_{i,j} + h \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i,j} + \frac{1}{2!} h^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{i,j} +$$

$$\frac{1}{3!} h^3 \left( \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right)_{i,j} + \dots \quad (5)$$

当网格划分得很密时, 可忽略上式中的三次项及以上的项, 式(4)、式(5)相加得:

$$h^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{i,j} = T_{i-1,j} + T_{i+1,j} - 2T_{i,j} \quad (6)$$

同理可得:

$$h^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)_{i,j} = T_{i,j-1} + T_{i,j+1} - 2T_{i,j} \quad (7)$$

式(6)、式(7)相加得:

$$h^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{i,j} + h^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)_{i,j} = T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1} - 4T_{i,j} \quad (8)$$

而热传导方程(1)可以离散为:

$$\left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{i,j} + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)_{i,j} + \frac{\eta q(i, j)}{k} = 0 \quad (9)$$

由式(8)和式(9)最后可得边界内热传导方程的离散形式为:

$$T_{i,j} = (T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1} + h^2 \eta q_{i,j} / k) / 4 \quad (10)$$

边界上:  $T_{i,j} = 293 \text{ K}$

### 4 不同条件下介质的光强和温度分布

不同掺杂浓度的 Nd:YAG 板条介质对泵浦光的吸收系数也不同, 本文中采用的吸收系数为  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$  和  $\alpha = 8.0 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[4-5]</sup>, 其他参数分别为  $a = 5 \text{ mm}$ ,  $b = 2.5 \text{ mm}$ ,  $c = 50 \text{ mm}$ ,  $\eta = 0.3$ ,  $P = 80 \text{ W}$ ,  $k = 0.14 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ ,  $w_y = 0.5 \text{ mm}$ , 我们应用上述参数及式(10)对介质吸收的光强和温度分布进行了数值计算。

#### 4.1 单侧泵浦, 吸收系数 $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$ 时的结果

当单侧泵浦, 吸收系数  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$  时, 我们得到了介质内  $XY$  平面各处吸收的光强分布、温度分布及温度分布等高线图, 如图 2(a) ~ (c) 所示。

从光强分布图 2(a) 可以看出, 介质吸收的光强分布正如式(2)所描述的那样: 左侧中部吸收的光强最大, 在  $Y$  方向大致呈高斯型分布, 沿  $X$  方向呈现指数型衰减, 由于吸收系数不太大, 光通过介质后不能完全被吸收, 所以在介质右侧中部附近的光强并不为零, 与文献[6]、[7]中得到的结果相符。由温度分布图 2(b) 可以看出, 这时最高温度处在板条宽度  $a$  方向中部偏左, 沿  $Y$  方向对称分布, 但不是高斯分布, 沿  $X$  方向逐渐减小, 远远偏离指数型衰减分布, 这是因为文中的热传导方程不是线性方程, 加上边界条件后使得求解出的温度分布与光强分布不

同。为了方便后面的讨论,我们同时给出了温度的等高线分布图 2(c)。

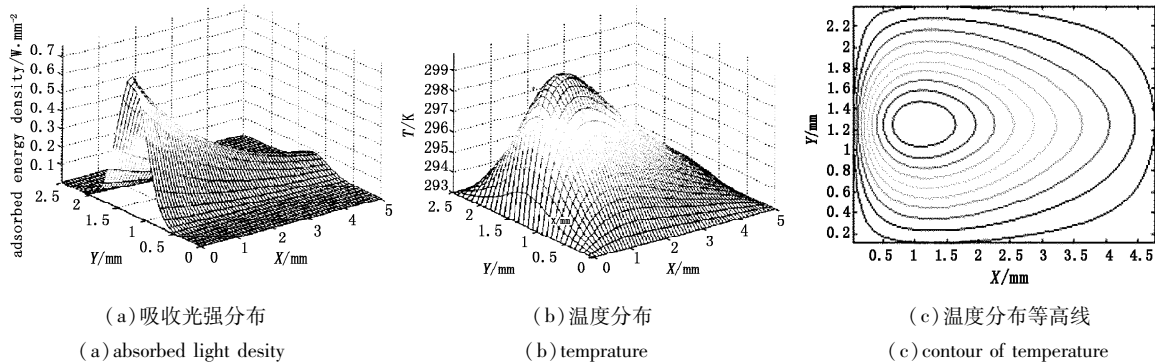


图2 单侧泵浦,  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$  时的吸收光强、温度分布、温度分布等高线

Fig.2 distributions of under one side pump with absorption coefficient  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$

4.2 单侧泵浦, 吸收系数  $\alpha = 8.0 \text{ cm}^{-1}$  时的结果  $\alpha = 8.0 \text{ cm}^{-1}$  时, 介质内 XY 平面各处吸收的光强分布, 温度分布及温度分布等高线图。

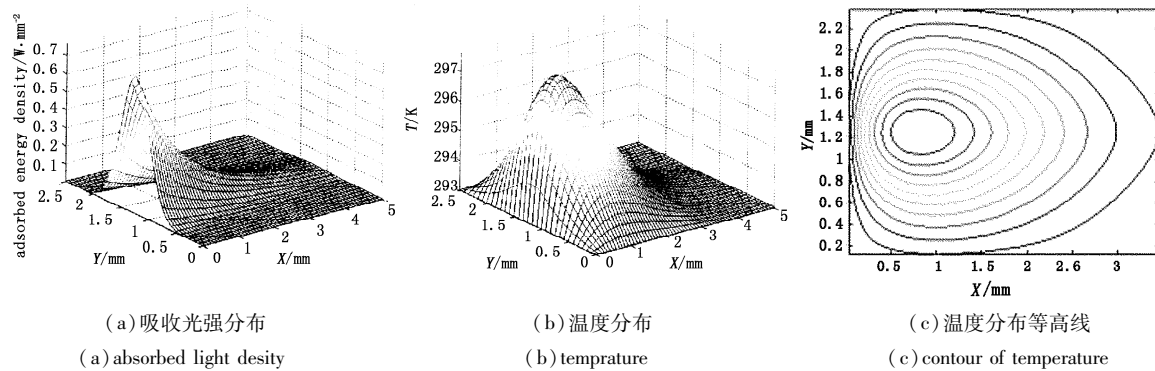


图3 单侧泵浦,  $\alpha = 8.0 \text{ cm}^{-1}$  时的吸收光强、温度分布、温度分布等高线

Fig.3 distributions of under one side pump with absorption coefficient  $\alpha = 8.0 \text{ cm}^{-1}$

由图 3(a) 可以看出, 光强绝大部分被左侧介质吸收, 吸收光强最大处仍在左侧中部, 吸收光强因吸收系数的增大沿 X 方向衰减很快, 而在 Y 方向仍呈现高斯型分布。由图 3(b) 可知, 这时介质内最高温度稍低, 温度在 X 和 Y 方向的变化较快。对比图 2(c) 和图 3(c) 可以看出, 这时温度分布没有吸收系数小时均匀, 这将对激光的光束质量产生大的影响, 一方面光强分布不均匀将影响反转粒子数的分布, 另一方面温度分布的不均匀将改变介质的折射

率, 使其产生热畸变, 使得光线发生偏转。从图 2 可以看出, 即使吸收系数较小时, 这些影响仍然存在, 只不过这时略为减小。

4.3 双侧泵浦,  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$  时的结果

我们也计算了双侧泵浦, 每个泵浦源的泵浦功率均为 80 W, 吸收系数  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$  的情况下, 介质内 XY 平面各处吸收的光强分布, 温度分布及温度分布等高线图, 如图 4(a) ~ 图 4(c) 所示。

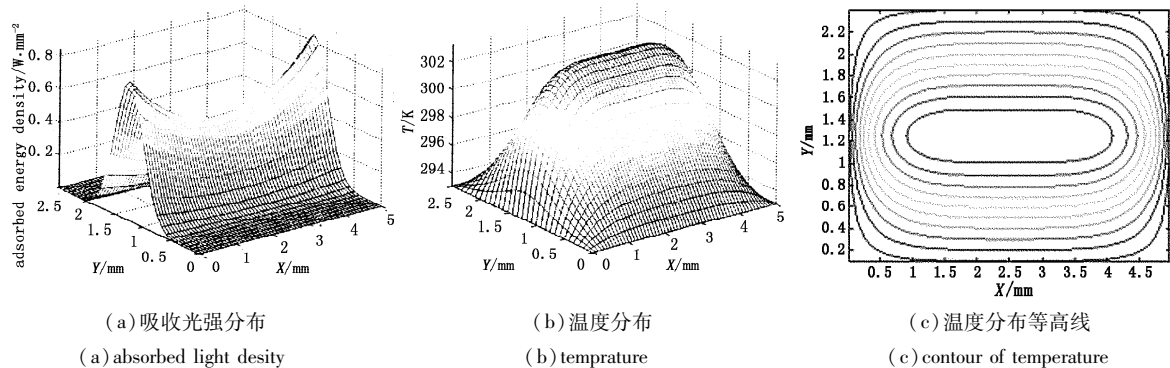


图4 双侧泵浦,  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$  时的吸收光强、温度分布、温度分布等高线

Fig.4 distributions of under two sides pumps with absorption coefficient  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$

由图4(a)可以看出,吸收系数 $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$ ,双侧泵浦时吸收的光强较大处分布介质中部区域,此时光强沿 $X$ 方向和 $Y$ 方向均呈现出对称性。从图4(b)的温度分布可以知道,这时在 $XY$ 面中部温度比单侧泵浦时高,但空间分部间较均匀,从图4(c)能够更加清楚的看到这一点,与文献[7]中类似计算相符。由于此时泵浦光较强,使反转粒子数增多,同时此时光热转化形成的温度分布更均匀,故采用双

侧泵浦有利于光束能量和质量提高。

#### 4.4 不同泵浦方式下泵浦功率对温度分布的影响

为了进一步研究不同泵浦方式下泵浦功率对介质内温度分布的影响,我们计算了吸收系数 $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$ ,泵浦功率分别为 $P = 60 \text{ W}, 80 \text{ W}, 100 \text{ W}, 120 \text{ W}$ 时,单侧泵浦和双侧泵浦情况下, $y = 1.25 \text{ mm}$ 上各点的温度分布,如图5(a)和图5(b)所示。

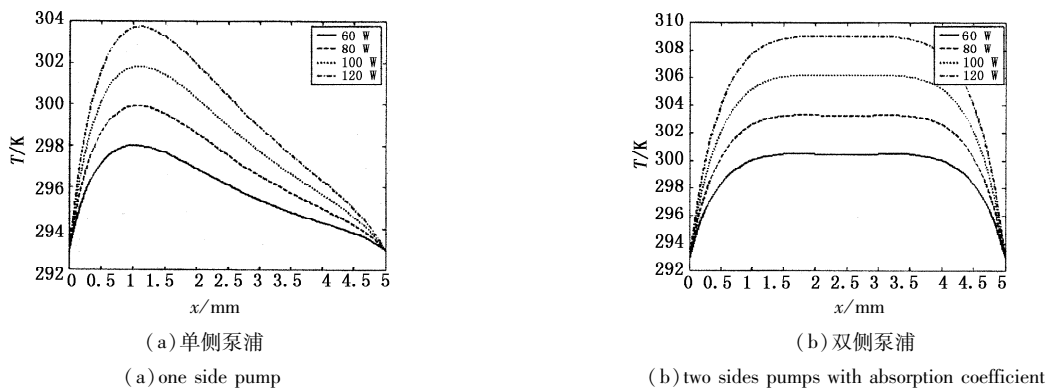


图5  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$ 时,不同泵浦方式下泵浦功率对温度分布的影响

Fig.5 effects of pump powers on temperature distributions, under  $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$

由图5可以看出,无论是单侧泵浦还是双侧泵浦,介质内的温度总体上随泵浦功率的增大而增大,同时两侧边沿处的温度梯度也随之增大。当泵浦功率增大时,对单侧泵浦,温度分布变的更不均匀,温度极大值位置向 $X$ 正方向移动;对双侧泵浦,温度分布的均匀区域变窄。上述现象说明在采用强制制冷条件下,无论是单侧或者双侧泵浦,当泵浦功率增大时,介质吸收的光能将增加,介质边沿温度梯度将增大,会使热畸变效应更显著,不利于获得高光束质量和输出功率,此时可考虑采用圆型激光棒或导热系数大的激光介质来克服这一弱点。

## 5 结论

本文建立了二极管侧面泵浦板条激光介质模型,得到了相应条件下的热传导方程,并用差分法研究了单侧泵浦,吸收系数 $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$ , $\alpha = 8.0 \text{ cm}^{-1}$ 和双侧泵浦, $\alpha = 4.5 \text{ cm}^{-1}$ 时板条介质内吸收的光强分布,温度分布及温度等高线分布图,计算表明,在单侧泵浦时,特别是介质吸收系数高时,介质吸收的光强会很均匀,导致热畸变效应显著,不利于获得高的光束质量,此时在一定的吸收系数下可采用双侧泵浦形式。接下来讨论了不同泵浦方式下泵浦功率对介质内温度分布的影响,结果表明无论是单侧泵浦还是双侧泵浦,介质内的温度总体上随泵浦功率的增大而增大,同时边界处的温度梯度随之增大。

## 参考文献:

- [1] Liu Yuan, Fang Gaozhan, Ma Xiaoyu, et al. High power diode pumped solid state lasers [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(3): 139 - 142. (in Chinese)  
刘媛,方高瞻,马晓宇,等. 大功率二极管泵浦固体激光器[J]. 激光与红外, 2002, 32(3): 139 - 142.
- [2] Lü Baida, Ma Hong. Some novel developments in diode-pumped solid-state lasers [J]. Laser & Infrared, 2000, 30(2): 67 - 70. (in Chinese)  
吕百达,马虹. 二极管泵浦固体激光器研究的一些新进展[J]. 激光与红外, 2000, 30(2): 67 - 70.
- [3] Zhang Shuaiyi, Huang Chunxia, Yu Guolei, et al. Thermal effect of laser crystal by laser diode end-pumped [J]. Chinese Journal of Laser, 2008, 35(3): 333 - 337. (in Chinese)  
张帅一,黄春霞,于果蕾,等. 激光二极管端面抽运激光晶体的热效应[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 333 - 337.
- [4] Wang Chunyu, Zhu Xiaolei, Lu Yutian. Pumping intensity distributions in LDA side pumped solid state lasers [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(6): 961 - 965. (in Chinese)  
王春雨,朱小雷,陆雨田. 侧面泵浦固体激光器泵浦光分布模拟[J]. 光子学报, 2007, 36(6): 961 - 965.
- [5] Cai Zhiqiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi, et al. Simulation

- of absorbed power and temperature distribution in LD side-pumped laser[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(11): 1305 - 1310. (in Chinese)
- 蔡志强, 姚建铨, 温午麒, 等. 侧泵激光器抽运光和温度分布数值研究[J]. 光电子 · 激光, 2004, 15(11): 1305 - 1310.
- [6] Mao Shaoqing, Huang Tao, Wen Zhongyi, et al, Calculation and analyze of homogeneity of side pumped solid state lasers[J]. Laser Technology, 1997, 21(3): 185 - 188. (in Chinese)
- 毛少卿, 黄涛, 温中一, 等. 半导体侧面泵浦激光其均匀性的计算和分析[J]. 激光技术, 1997, 21(3): 185 - 188.
- [7] Ning Jiping, Cai Zhiqiang, Chen Zhiqiang, et al. Study on uniform of pump distributivity in a side-pump Nd:YAG laser [J]. Chinese Journal of Laser, 2004, 31(4): 390 - 394. (in Chinese)
- 宁继平, 蔡志强, 陈志强, 等. 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器抽运均匀性研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 390 - 394.