

二极管泵浦板条激光介质的二维温度和应力分布*

翟 群 吕百达

(四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都, 610064)

杨成龙

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 成都, 610003)

摘要: 用有限差分法对各种边界条件下二极管侧泵浦板条介质通光截面上的温度和应力二维分布作了数值计算。并对此作了分析, 由此提出了适用于不同泵浦水平二极管泵浦板条激光器的冷却方案。

关键词: 二极管侧泵浦板条激光器 温度分布 应力分布

Two-dimensional temperature and stress distributions in a diode-side-pumped slab laser medium

Zhai Qun, L. Baida

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Yang Chenglong

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Chengdu, 610003)

Abstract: In this paper, two-dimensional temperature and internal stress distributions in a diode-side-pumped slab laser medium have been calculated by using finite difference method. The numerical calculation results have been analyzed, from which suitable cooling schemes for diode-pumped slab lasers at different pumping level have been proposed.

Key words: diode-side-pumped slab laser temperature distribution stress distribution

引 言

高功率固体激光器的一个主要问题是激光介质的光泵浦热效应。近年来迅速发展的二极管泵浦固体激光器(DPL)的主要优点便在于可以大为减小热效应和提高效率。在低泵浦功率下(平均功率 1W 以下)可以不考虑激光工作介质的热效应,但是随着泵浦功率的增大,在高功率 DPL 中工作介质的热效应仍然是一个值得重视的问题。

闪光灯的泵光通过优化的聚光腔到达板条表面被认为是均匀分布的,或基本上是均匀分布的。二极管(LD)泵浦时,LD 线阵发出的光在宽度方向很窄,强度的空间分布可近似为高斯型。LD 的发射波长正对介质吸收峰,在较短的深度内即被介质大量吸收。对 LD 泵浦,将问题简化为沿板条厚度方向的一维温度和应力分布来处理过于近似,应当研究板条通光截面内的二维温度和应力分布。我们从热传导方程出发,在不同边界条件下用有限差分法解出了

* 国家高技术激光技术主题项目资助。

DPL 侧泵时通光截面内的二维温度和应力分布,对此作了分析,并作为设计冷却方案的基础。

一、计算原理

1. 温度分布的计算

在稳态下单面侧泵板条的热传导方程为泊松方程(见图1),

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

式中, k 为热传导率, P 为单位体积泵光功率, ζ 为热参数。而 $f(x, y)$ 为泵浦光配分函数。

方程的边界条件可分为四种情况:

$$(1) \text{ 绝热 } \text{ 假设 } \Sigma \text{ 面为绝热面: } \partial T / \partial n \Big|_{\Sigma} = 0 \quad (2a)$$

n 为面外法向方向矢量。

$$(2) \text{ 传导冷却 } \text{ 已知 } \Sigma \text{ 面上注入或散出的热功率为 } q:$$

$$\partial T / \partial n \Big|_{\Sigma} = q \quad (2b)$$

$$(3) \text{ 强制冷却 } \Sigma \text{ 面用温度为 } T_c \text{ 的冷却剂强制冷却。}$$

$$T + (k/h)(\partial T / \partial n) \Big|_{\Sigma} = T_c$$

$$\text{式中, } h \text{ 为表面热传导系数。当 } h \gg k \text{ 时, } T = T_c \quad (2c)$$

$$(4) \text{ 等温 } \Sigma \text{ 面为等温面, } T_s \text{ 为外界温度 } T \Big|_{\Sigma} = T_s \quad (2d)$$

现在,用有限差分法对二维泊松方程作数值计算,为此,以差商代替微商

$$dy/dx = \Delta y / \Delta x = [y(x + \Delta x) - y(x)] / \Delta x$$

$$d^2y/dx^2 = (1/\Delta x^2)[y(x + \Delta x) + y(x - \Delta x) - 2y(x)] \quad (3)$$

假设 $\Delta x = \Delta y = \Delta$, 代入热传导方程,得到:

$$T(x_i, y_j) = (1/4)[T(x_{i+1}, y_j) + T(x_{i-1}, y_j) + T(x_i, y_{j+1}) + T(x_i, y_{j-1})] + [\Delta^2 P \zeta f(x_i, y_j)] / (4k) \quad (4)$$

相应的边界条件用差分方式可表示如下

$$(1) \text{ 绝热 } T(x_i, y_j) = (1/4)[2T(x_{i+1}, y_j) + T(x_i, y_{j+1}) + T(x_i, y_{j-1})] + [\Delta^2 P \zeta f(x_i, y_j)] / (4k) \quad (5a)$$

$$(2) \text{ 传导 } T(x_i, y_j) = \{2T(x_{i+1}, y_j) + T(x_i, y_{j+1}) + T(x_i, y_{j-1}) + 2(h/k) \Delta T_c + \Delta^2 [q + P \zeta f(x_i, y_j)] / k\} / [4 + 2(h/k) \Delta] \quad (5b)$$

$$(3) \text{ 强制冷却 } (h \gg k) \quad T(x_i, y_j) = T_c \quad (5c)$$

$$(4) \text{ 等温 } T(x_i, y_j) = T_s \quad (5d)$$

对于单侧泵浦板条情况。假设在 y 方向上泵光呈高斯分布,而在 x 方向为正常的吸收衰减,那么,泵光配分函数可写作^[1]:

$$f(x, y) = e^{-2y^2/w^2} e^{-\alpha x} \quad (6)$$

对于双侧对称 LD 泵浦, $f(x, y)$ 则可写为:

$$f(x, y) = e^{-2y^2/w^2} (e^{-\alpha x} + e^{-\alpha(b-x)}) \quad (7)$$

式中, w 为入射在板条处高斯激光束宽, α 为介质吸收系数, b 为板条厚度。

2. 应力分布的计算

由于温度分布的不均匀,工作物质中不同部分的热胀不同而导致热应力,严重时会使工作

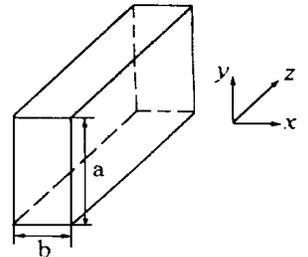


Fig. 1 Diagram of a slab laser medium

物质断裂。所以,搞清楚介质内部的应力分布十分必要。

在稳态下,设已知介质截面相对温度分布为 $T(x, y) = T'(x, y) + T_a$ (T' 为温度变化, T_a 为平均温度, α 为介质中线胀系数)。由于该弹性体内的约束的存在,就产生了热应力,并引起应变。根据平面应力应变问题的处理方法,将应变方程和几何方程代入物理方程得:

$$\begin{aligned} \alpha_x &= E/(1-\mu^2) \cdot [(\partial u/\partial x) + \mu(\partial v/\partial y)] - [E\alpha T'/(1-\mu)] \\ \alpha_y &= E/(1-\mu^2) \cdot [(\partial v/\partial y) + \mu(\partial u/\partial x)] - [E\alpha T'/(1-\mu)] \\ \tau_{x,y} &= E/[2(1+\mu)] \cdot [(\partial v/\partial x) + (\partial u/\partial y)] \end{aligned} \quad (8)$$

解平衡方程得到应力分布为: $\alpha_{x,y} = -[E\alpha/(1-\nu)]T'(x, y)$

$$\alpha_z = \nu(\alpha_x + \alpha_y) - E\alpha T'(x, y) \quad (9)$$

若将一维模型下板条稳态温度分布:

$$T'(x) = T(x) - T_a = [Qb^2/(8k)][(1/3) - (2x/b)^2] \quad (10)$$

代入以上应力分布表达式,则得到 Eggleston 等人的结果^[2]

$$\begin{aligned} \alpha_x = \alpha_z &= \frac{Q}{8M_S} x^2 - \frac{b^2}{12} \\ \alpha_y &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $M_S = (1-\nu)k/(E\alpha)$ 。

二、数值计算

根据上述公式编制了有限差分迭代法程序,对泵浦平均功率在 1W ~ 10W 内的一些典型情况进行了计算。

对于束腰 w 不同的高斯光束泵浦,温度场分布是不同的。图 2a 和图 2b 分别给

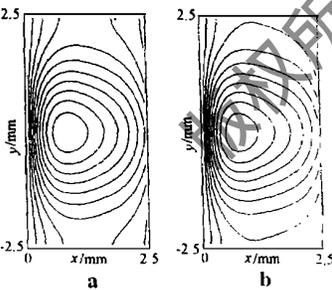


Fig. 3 Isotherm distributions in a slab under different cooling conditions
a—circulating water cooling on the pumped surface b—circulating water cooling on all side surfaces

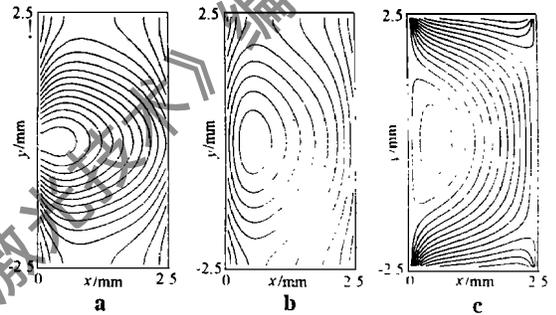


Fig. 2 Isotherm distributions in a slab with different ratios of pump beam width to slab width
a—1:10 b—1:5 c—pumped by a flashlamp

出了板条处于静止空气中泵浦光束腰与板条宽度之比为 1:10 和 1:5 的等温线分布情况。作为比较,图 2c 是平面均匀泵光泵浦时的等温线分布,可以看出束腰较宽时分布较接近均匀泵浦,而窄光束时的情况则很不相同,这时高温区更集中于泵浦光照射的表面区域。

板条 DPL 中,泵浦光只照射板条的单侧或双侧,对板条进行全水冷和只对泵浦面进行冷却对温度分布的影响是不同的。图 3a 所示是窄光束单面侧泵只对泵浦面进行水冷时的等温线分布。图 3b 则是同样条件下对板条进行全水冷时的等温线分布。

对于闪光灯泵浦板条固体激光器对非泵浦侧面进行绝热处理以改善宽度方向的温度分布是一种传统的作法。原因是将这两个面绝热之后,热流将只沿着厚度方向流动。

图 4a, b 分别对应于图 2a, c 条件,对上下侧面作绝热处理,而其它面处于静止空气中时的等温线分布。可以看出对于均匀面泵浦时,对宽度方向的温度分布有明显的改善。但是图 4a 中窄

光束时改善作用是不显著的。因为窄光束泵浦时,热源集中在中间且区域很小,所以对于用光束较窄 LD 泵浦的激光器,作绝热处理的意意义不大。

图 5 分别给出 a 双侧闪光灯泵浦; b 双侧泵浦光宽度与板条宽度比为 1: 10LD 泵浦; c 单侧 1: 5LD 泵浦时的热应力分布。显然, a 中应力分布可近似简化为沿厚度方向的抛物线型分布,这正是 Eggleston 等人一维模型下的结果,这时应力最大值集中在宽度方向的中轴线上;而 b 中看出,当 LD 双侧泵浦时,应力最大值集中在厚度方向的中轴线上,因此,板条设计时 $a/b > 2$ 的原则不再成立,应当根据实际应力分布确定。

从计算模拟结果来看,LD 泵浦板条介质的温度分布

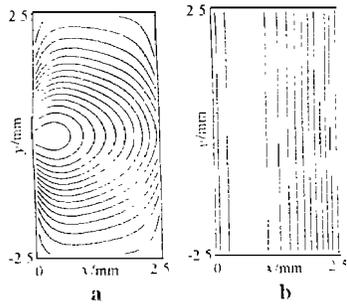


Fig. 4 Isotherm distributions in a slab pumped by a— a diode on one side b—a flashlamp on one side. Both top and bottom surfaces are thermally insulated

和应力分布都不同于闪光灯泵浦。为了降低介质温度和尽量使温度及应力分布均匀,冷却方案应针对 LD 泵浦板条时介质的温度分布和应力分布情况来设计。在本文模拟计算的泵浦功率范围中(平均功率 1W~ 10W, 最大峰值功率 100W)内,我们认为在上下面用热沉传导冷却方案最好,而绝热方式在此情况下并不一定适用。值得注意的是在单侧泵浦时,从泵浦面对面进行冷却会加大介质内温差,不利于改善光束质量。若泵浦功率进一步提高,为了保证冷却效果,则必须使用载热能力更强的流动液体冷却。

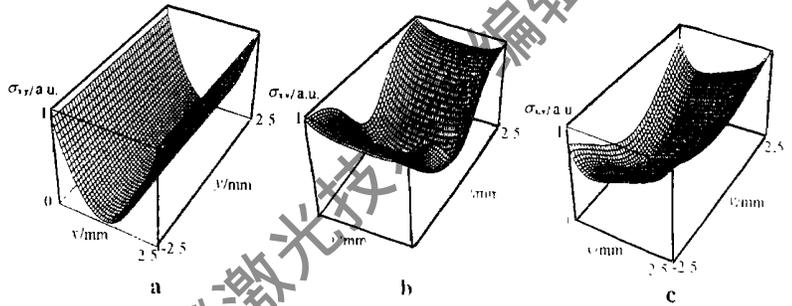


Fig. 5 Stress distributions in a slab pumped by a— flashlamps on two sides b— diodes on two sides c— diode on one side

三、实验研究和分析

我们用 100W 准连续 LD 单侧泵浦矩形 Nd: YAG 矩形板条作了实验,对比了不同热沉布局时介质内的温度分布情况,用 CCD 摄像系统观测板条前后表面对 HeNe 光的反射相干叠加干涉条纹的变化,并采用莫尔条纹法分析干涉条纹。图 6a 中水平细实线为未加泵浦时干涉条纹,带弯曲细实线为有泵浦时条纹,而粗实线为莫尔条纹,即为等光程线,也就是等温线。图 6b 为对应于这种情况的数值计算结果。

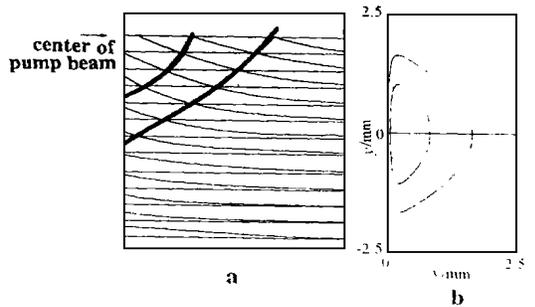


Fig. 6 a— moiré fringe pattern in the experiment b— the numerical calculations result corresponding to the experiment

从图 6a 中看出有两条明显的莫尔条纹,可以估计整个介质温度最高点与最低点之间大约有 3 个多波长的光程差,与理论计算图 6b 符合得较好。

激光冲击对金属材料机械性能的影响*

任乃飞 杨继昌 蔡 兰

张永康

(江苏理工大学机械制造系, 镇江, 212013) (南京大学声学所, 南京, 210093)

摘要: 用高功率钕玻璃激光装置对铝合金 2024T62 进行激光冲击处理, 激光参数: 脉冲宽度 (FWHM) 为 30ns, 单脉冲能量为 16.5~27.5J, 功率密度为 1.1~1.6GW/cm²。试验结果表明: 激光冲击区的表面硬度提高 42%, 激光冲击区表层的晶粒得到细化, 并且大幅度地提高了铝合金的疲劳寿命, 在 95% 置信度下, 激光冲击试件的中值疲劳寿命是未冲击试件的 5.4~14.5 倍。

关键词: 激光冲击处理 机械性能 金属材料 疲劳寿命

Effects of laser shocking on the mechanical properties of metals

Ren Naifei, Yang Jichang, Can Lan

(Machine Building Department, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212013)

Zhang Yongkang

(Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing, 210093)

Abstract: The high power density, neodymium-glass laser is used to laser shock-process aluminum alloy 2024T62. Laser parameters: the duration (FWHM) is 30ns, the single laser pulse energy is 16.5 to 27.5J, the power density is 1.1 to 1.6GW/cm². The test results show that the hardness of laser shocking zone is increased about 42%, the surface grains of laser shocking zone are fined and the fatigue life of aluminum alloy is increased significantly. With 95% confidence, the fatigue life of laser shock-processing specimens is 5.4 to 14.5 times larger than the unprocessed specimens.

Key words: laser shock processing (LSP) mechanical properties metal fatigue life

* 国家教委博士点专项科研基金和机械工业部教育司科技基金资助(96250913)。

四、小 结

我们从 LD 发光形式的特殊性出发, 用有限差分法计算了 DPL 板条介质中的温度和应力的二维分布情况, 以作为高功率 DPL 冷却方案设计的出发点。由于 LD 的光束较窄及发射波长与介质吸收峰匹配, 造成介质内的温度和应力分布都明显不同于闪光灯泵浦。文中仅对平均泵浦功率 10W 以下的情况进行了计算模拟和分析, 当泵浦功率进一步提高时, 值得对此作深入研究, 有关工作正在进行之中, 所得结果将另文报导。

参 考 文 献

- 1 Pfister C, Weber R, Weber H *et al.* IEEE J Q E, 1994; QE-30: 1605
- 2 Eggleston J M, Kane T J. IEEE J Q E, 1984; 20: 3
- 3 亚当斯 J A, 罗杰斯 D F. 传热学计算机分析. 北京: 科学出版社, 1982
- 4 Loza P, Kounetsov D, Ortega R. Appl Opt, 1994; 33: 3831
- 5 Farrukh U O. IEEE J Q E, 1988; QE-24: 2253