

文章编号 1004-924X(2008)11-2120-07

激光二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 板条的热效应

李 隆^{1,2}, 董武威¹, 史 彭^{1,2}, 甘安生^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 理学院物理系, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 应用物理研究所, 陕西 西安 710055)

摘要:为解决激光二极管阵列侧泵浦激光板条引起的热效应问题,通过对侧泵浦板条温度场与热形变场分布的解析研究以及对激光二极管阵列侧泵浦激光板条工作状态的分析,建立了符合实际情况的热模型,提出了求解 Poisson 方程的新方法,得到了侧泵浦板条温度场与热形变场的一般解析表达式。以 Nd:YAG 板条为例,分析了侧泵浦 Nd:YAG 板条温度场、热形变场的分布情况。并结合全固态激光器的设计需要,定量研究了激光二极管阵列取不同泵浦功率与不同泵浦光斑时 Nd:YAG 板条的温度场分布情况。计算结果表明:使用输出功率为 30 W 的激光二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 板条,若耦合到板条侧面的高斯光斑半径为 150 μm 、板条铈离子掺杂质量分数为 1.0% 时,板条泵浦面具有 102.3 $^{\circ}\text{C}$ 的最高温升,泵浦面与通光端面产生 1.54 μm 和 2.66 μm 的最大热形变量。激光板条温度场解析方法解决了使用数值分析法造成研究精确度不高的问题,该方法还可以应用到激光系统的其他热问题研究中,为减弱激光系统中的热问题提供理论依据。

关键词: 固体激光器; 侧面泵浦; Nd:YAG 板条; 热效应; 解析分析

中图分类号: TN 248.1 **文献标识码:** A

Thermal effect of diode bar side-pumped Nd:YAG slab

LI Long^{1,2}, DONG Wu-wei¹, SHI Peng^{1,2}, GAN An-sheng^{1,2}

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Institute for Applied Physics, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to solve the thermal effect problem of diode bar side-pumped laser slab, a temperature modeling of laser slab according to the practical situation was established based on analysing on the temperature field and thermal distortion field of diode bar side-pumped laser slab and discussing on its working characteristics. A novel solution of the Poisson equation was established and the general analytical solutions of temperature field and thermal distortion field of laser slab were obtained. Then, by taking the Nd:YAG slab as a model, the distributions of temperature field and thermal distortion field were analyzed. And the temperature fields of Nd:YAG slab under different pump powers and coupled radii were quantitative studied by considering on design requirements of all-solid-state lasers. Computational results indicate that when the YAG doped with a mass percent of 1.0% of Nd-ion is side-pumped by a diode bar with output power of 30 W, the Gaussian spot radius coupled on the side-face of laser slab is 150 μm , and the slab can get a maximum temperature rise of 102.3 $^{\circ}\text{C}$, and the

收稿日期:2007-02-06; 修订日期:2007-04-05.

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划资助项目(No. 07JK284);陕西省科学技术厅工业攻关基金项目(No. 2008K05-15)

maximum thermal distortions of $1.54 \mu\text{m}$ and $2.66 \mu\text{m}$ on the side-face and the end-face, respectively. This analytical solution of temperature field can improve the low precision of the numerical analysis method in research of diode laser side-pumped laser slab interior temperature field, and also can be used to analyze other thermal problems in laser systems.

Key words: solid-state-laser; side-pumping; Nd:YAG slab; thermal effect; analytical analysis

1 引 言

高功率固体激光器在机械加工、数据存储、高速摄影、激光制导科学研究等领域有着广泛的应用^[1]。固体激光器采用激光二极管端面泵浦方式,可通过激光介质的自孔径限模,无需在腔内附加其他光学元件,便可获得稳定的 TEM_{00} 模输出并具有较高的光-光转换效率^[2-3]。然而,采用这种泵浦方式,高功率的泵浦能量被聚集在激光介质一个狭小的区域内势必引起激光介质的热效应问题^[4-5]。激光介质热效应产生的光弹效应、热应力双折射、热形变等现象不仅影响了激光器的稳定性,而且限制了激光二极管的泵浦功率^[6-7]。对于大功率激光二极管泵浦的固体激光系统而言,实现端面泵浦较小的圆光斑整形系统比较复杂,相比之下,侧面泵浦简单易行,易于实现激光器的大功率泵浦与高功率输出。因此,在近几年发展的高功率固体激光系统中多采用激光二极管侧泵浦方式^[8-9]。

然而,激光二极管阵列发射的泵浦光能量相对集中,再加上泵浦结构中使用了耦合装置,泵浦光斑被聚焦,激光介质吸收泵浦光能量产生激光振荡的同时,也引起激光板条产生热透镜、热致形变等效应。其热效应破坏了泵浦光与振荡光之间的模式匹配,导致激光器的光-光转换效率降低^[10-12]。

目前对于侧泵浦激光介质温度场的研究已有很多,大多都集中于侧泵激光圆棒温度场的分析,而且研究中采用了泵浦光强的均匀分布或棒内热流线径向等假设,所得结论存在不合理之处^[13-15]。本文通过对激光二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 板条工作特点分析,建立了符合实际特点的物理模型,利用 Poission 方程的一种新求解方法得出

了侧面泵浦 Nd:YAG 激光板条温度场分布以及热形变场的解析解表达式,对影响激光板条温度场、热形变场的各种因素进行了定量分析。研究结果对于解决激光板条热效应、改善激光二极管侧泵板条激光器性能等提供了理论依据。

2 侧泵浦激光板条热效应的解析分析

2.1 侧泵浦 Nd:YAG 板条热模型的建立

激光二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 板条激光器实验装置如图 1 所示。其中 Nd:YAG 板条的钕离子掺杂质量分数为 1.0%,板条尺寸为 $17.4 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 。两个端面切割的楔形角为 6.5° ,抛光后蒸镀 1064 nm 增透膜 ($R < 0.1\%$)。泵浦光经 $17.4 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 面入射 YAG 板条,泵浦面镀 808 nm 增透膜,后表面镀 808 nm 高反膜。其中半波片的作用在于调整泵浦光的偏振状态与激光板条的 c 轴一致。

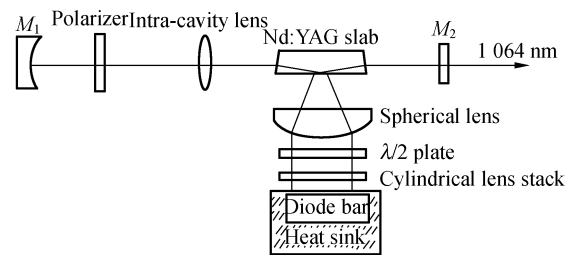


图 1 激光二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 板条激光器简图
Fig. 1 Scheme of diode bar side-pumped Nd:YAG slab laser

在激光板条的上、下两侧面均匀涂抹银粉后垫上钢膜,放于热沉铜块中间,热沉铜块温度可由循环水冷却器控制。Nd:YAG 板条吸收泵浦光能量产生的热量,以热传导方式经上、下两侧面散失。激光二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 板条热模型如图 2 所示,通过实际工作特点分析,建立其热分析模型。

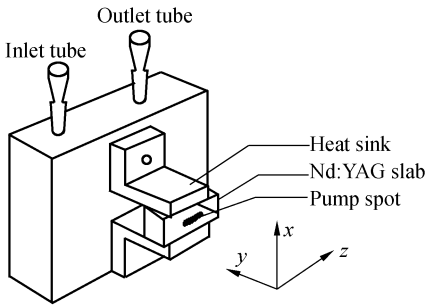


图 2 侧面泵浦激光板条热模型简图

Fig. 2 Thermal model diagram of diode bar side-pumped laser slab

2.1.1 激光板条内泵浦光光强分布

激光二极管阵列发出的泵浦光经过柱面镜准直、球面镜聚焦后入射到激光板条侧面(17.4 mm × 3.0 mm, 即 $y=0$ 面), 由于耦合系统不会改变泵浦光光强分布, 在此假设入射到激光板条 x 方向上泵浦光光强具有高斯分布, 沿 z 方向呈均匀分布^[11]。入射到激光板条泵浦面($y=0$)上的光强为:

$$I_i(x, 0, z) = \begin{cases} I_0 e^{-\frac{2(x-x_0)^2}{\omega^2}} & (z_1 \leq z \leq z_2) \\ 0 & (z < z_1, z > z_2) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: ω 为泵浦光的高斯半径, I_0 为入射泵浦光中心处的光强, x_0 为泵浦光中心点位置坐标。

$$I_0 = \frac{\sqrt{2}P}{\omega(z_2 - z_1)\sqrt{\pi}}, \quad (2)$$

其中: P 为入射到板条侧面($y=0$ 面)泵浦光功率:

$$P(x, 0, z) = \iint_S I_0 e^{-\frac{2(x-x_0)^2}{\omega^2}} dx dz = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{2(x-x_0)^2}{\omega^2}} dx \int_{z_1}^{z_2} dz = I_0 \omega \sqrt{\frac{\pi}{2}} (z_2 - z_1). \quad (3)$$

激光增益介质对泵浦光吸收系数为 β , 按照吸收规律, 沿 y 方向传播的入射泵浦光在介质内部 y 处的光强为:

$$I_i(x, y, z) = I_i(x, 0, z) e^{-\beta y}, \quad (4)$$

其中: $I_i(x, y, z)$ 为入射到 Nd:YAG 板条内 y 处的入射泵浦光强。

由此可得, 泵浦光达到 Nd:YAG 板条后表面的光强为:

$$I_r(x, b, z) = I_i(x, 0, z) \cdot e^{-\beta b}, \quad (5)$$

其中: b 为 Nd:YAG 板条的厚度。

在 Nd:YAG 板条的后表面镀有对泵浦波长 808 nm 的高反膜($R > 98\%$), 这样可以提高对于泵浦光能量的利用率。泵浦光在板条后表面被反射的泵浦光强为:

$$I_r(x, b, z) = \zeta_R I_i(x, b, z) \cdot e^{-\beta \cdot b}, \quad (6)$$

其中: $I_r(x, b, z)$ 为后端面拦截反射的泵浦光强度; ζ_R 为高反射膜的反射率。

Nd:YAG 板条后表面反射回板条内的泵浦光能量, 再次被板条内的激活离子 Nd^{3+} 吸收转换为激光辐射。反射泵浦光 $I_r(x, b, z)$ 在 Nd:YAG 板条内再次被吸收, 在介质内部 y 处的光强为:

$$I_r(x, y, z) = I_r(x, b, z) \cdot e^{-\beta(b-y)}. \quad (7)$$

由以上分析, 在 Nd:YAG 板条内 $y=y$ 面内泵浦光强为入射光与板条后表面反射光在该面光强之和:

$$I(x, y, z) = I_i(x, y, z) + I_r(x, y, z). \quad (8)$$

2.1.2 激光板条内热功率密度

设激光板条内热源只有一种, 并且假设荧光量子效率等于 1 时, 激光介质热效应完全由激光内跃迁损耗引起, 热源密度与泵浦吸收光有相同的形状。在 $y=y$ 面激光介质吸收激光二极管能量产生的热功率密度为:

$$q_v(x, y, z) = \eta \beta I(x, y, z), \quad (9)$$

其中: $q_v(x, y, z)$ 为激光板条内部单位体积内的热功率; η 为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数, 且

$$\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_L, \quad (10)$$

其中: λ_p 为激光二极管泵浦光波长 808 nm, λ_L 为谐振腔内振荡激光波长 1 064 nm。

2.1.3 激光板条的边界条件

激光板条两个端面虽然做了楔形角的切割(切割角为 6.5°), 而且考虑到泵浦光经过了耦合光学系统整形与聚焦后入射到板条泵浦面中心, 并且光斑高斯半径较小($\sim 250 \mu\text{m}$), 长度分布也较窄($\sim 4 \text{ mm}$), 在此可忽略激光板条楔形切割的部分, 将板条视为一个长方体。

激光板条上、下两侧面($x=0, x=a$)与热沉铜块保持了良好的接触, 其温度相对恒定, 设为 u_w , 作为热模型数学处理可设其为 0(相对), 得出温度场后, 再叠加冷却环境温度 u_w 。板条前、后两侧面($y=0, y=b$)与左、右两端面($z=0, z=c$)均与空气相接触, 和空气热交换流出的热量远远小于从上、下两侧面通过热传导流出的热量(约

1%左右),因此假设板条的前、后两侧面和左、右两端面绝热。侧面泵浦激光板条边界条件为:

$$\begin{cases} u(0, y, z) = 0; u(a, y, z) = 0 \\ \left. \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \left. \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial y} \right|_{y=b} = 0 \\ \left. \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \left. \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=c} = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

其中: a, c 为激光板条泵浦侧面的尺寸。

2.2 板条内部温度场的解析表达式

由于激光介质内部有热源,其温度场分布遵循热传导 Poisson 方程:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{q_v(x, y, z)}{\lambda}, \quad (12)$$

$$A_{mnl} = \frac{8I_0 \eta \beta^2 b [(1 - e^{-\beta}) \cos m\pi + \zeta_R e^{-\beta} (e^{-\beta} + \cos m\pi)]}{\lambda a \pi^3 l (\beta^2 b^2 + m^2 \pi^2)} \left(\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \right) \times \left(\sin \frac{l\pi z_2}{c} - \sin \frac{l\pi z_1}{c} \right) \int_0^a e^{-2\frac{(x-x_0)^2}{\omega^2}} \sin \frac{n\pi}{a} x dx,$$

(14)

其中: n, m, l 为正交归一本征函数系所确定的正整数。

2.3 激光板条热形变场的解析分析

当激光板条形成稳定温度梯度场分布后,温升会使得板条产生热致形变,热形变是使激光板条产生热透镜效应的主要因素之一,并严重影响激光器的性能。

激光板条上、下两个侧面与热沉之间有铜箔衬垫。由于铜箔较柔软,激光板条的四周可认为无任何外力约束。激光板条的热膨胀近似为自由热膨胀。

YAG 晶体具有各向热传导同性,为了研究方便,在激光板条内部取一个小长方体,其边长分别为 dx, dy, dz 。长方体原温度为 0(相对),板条达到热平衡后的温度为 $u(x, y, z)$,则该长方体的热形变量为:

$$dl_i = \alpha u(x, y, z) di, \quad (15)$$

其中: α 为晶体的热膨胀系数。 $i = x, y, z$ 。

激光板条内部各点的热应变变量(单位长度上的热形变量)为:

$$\epsilon_i = \frac{dl_i}{di} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \alpha A_{mnl} \sin \frac{n\pi}{a} x \cos \frac{m\pi}{b} y \cos \frac{l\pi}{c} z. \quad (16)$$

其中: λ 为板条的导热系数或称为热导率。

由于 $q_v(x, y, z)$ 和边界条件的复杂性,在此使用了一种新的求解方法:首先,根据边界条件,猜测本征函数的表达式,建构解的具体形式;其次,将本征函数族代入 Poisson 方程,确定其中的待定常数;最后,验证解的唯一性以及正确性。

经过分析,得出激光二极管侧泵浦激光板条温度场分布的解析表达式:

$$u(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} A_{mnl} \sin \frac{n\pi}{a} x \cos \frac{m\pi}{b} y \cos \frac{l\pi}{c} z, \quad (13)$$

其中: A_{mnl} 为待定系数,其表达式为:

3 侧泵浦 Nd:YAG 激光板条热分析

3.1 侧泵 Nd:YAG 板条内部温度场分析

掺钕的钇铝石榴石(Nd:YAG)晶体具有较高的热导率、热畸变小、破坏阈值高、工作范围宽等特点,成为目前应用最广泛的激光晶体之一^[16-17]。对于钕离子掺杂质量分数为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体,其吸收系数为 9.1 cm^{-1} ^[18],热性能如表 1 所示。

表 1 Nd:YAG 晶体的热性能^[19]

Tab. 1 Thermal performance of Nd:YAG crystal

特 性	室温状态(300 K)
热导率($\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.14
比 热($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.59
热漫射率($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.046
热膨胀($\text{K}^{-1} \times 10^{-6}$)	7.5
$\frac{\partial n}{\partial T} (\text{K}^{-1})$	7.3

调节激光二极管的输出功率为 30 W,泵浦光经过耦合光学系统整形后入射到板条泵浦面 x 方向的中心,其高斯半径为 $150 \mu\text{m}$ 。泵浦光位于 z 方向中心处,其分布宽度为 4 mm。由式(13)可以得出侧泵 Nd:YAG 板条泵浦面($y=0$)上三维

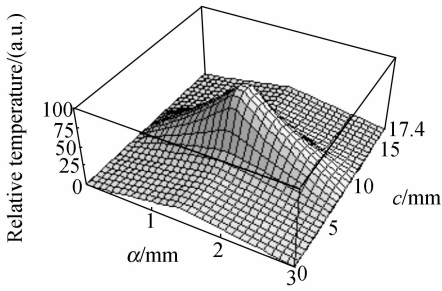


图 3 激光二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 板条的三维温度场分布

Fig. 3 Three-dimensional temperature field distribution of diode bar side-pumped Nd:YAG slab ($y=0$)

温度场分布如图 3 所示,其等温线分布如图 4 所示。

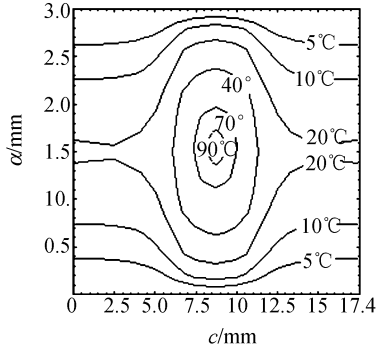


图 4 激光二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 板条的等温线分布

Fig. 4 Isotherm distribution of diode bar side-pumped Nd:YAG slab

图 3 中可以得出,侧面 Nd:YAG 板条泵浦面中心处($x=1.5 \text{ mm}$, $y=0$, $z=8.7 \text{ mm}$)温升较高,其最高温升为 $102.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.1.1 激光二极管阵列不同泵浦功率对于 Nd:YAG 板条温度场的影响

激光二极管阵列泵浦输入功率的变化使得激光介质内温度梯度场分布不同,产生热透镜效应的扰动,严重地影响了激光器的性能^[20-21]。其他条件与图 3 相同,图 4 给出不同泵浦功率下 Nd:YAG 板条泵浦面中心线($x=1.5 \text{ mm}$)上的温度分布图。其中当泵浦功率分别为 15、20、25、30、40 W 时, Nd:YAG 板条泵浦侧面的最高温升分别为 51.2 、 68.3 、 85.2 、 102.3 、 $136.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 5 中可以得出泵浦端面的最高温升与泵浦功率成正比。

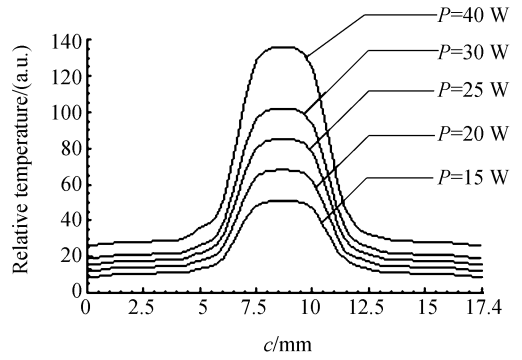


图 5 不同侧泵浦功率下 Nd:YAG 板条泵浦面中心线($x=1.5 \text{ mm}$)上的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along center line ($x=1.5 \text{ mm}$) on pump side-face of Nd:YAG slab under different side-pumped powers

3.1.2 不同泵浦光斑对于 Nd:YAG 板条温度场的影响

要使侧面泵浦的激光器获得较高的光-光转换效率以及具有较高质量的光束输出,泵浦光斑与激光介质内基模的模式存在着最佳的匹配方式^[22-23]。其他与 3 相同条件下,图 6 给出了不同侧泵浦光斑下 Nd:YAG 板条泵浦面中心线($x=1.5 \text{ mm}$)上的温度分布图。

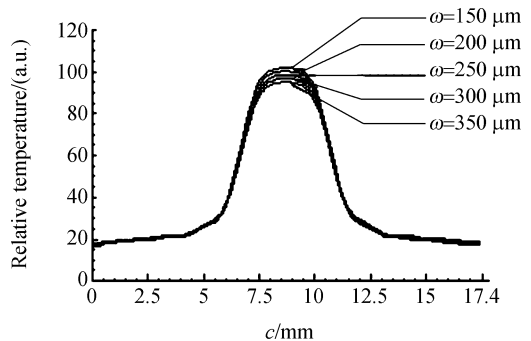


图 6 不同侧泵浦光斑下 Nd:YAG 板条泵浦面中心线($x=1.5 \text{ mm}$)上的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution along center line ($x=1.5 \text{ mm}$) on pump side-face of Nd:YAG slab under different side-pumped radii

图 6 给出若耦合到板条泵浦面的光斑半径分别为 150 、 200 、 250 、 300 、 $350 \text{ } \mu\text{m}$ 时, Nd:YAG 板条泵浦侧面的最高温升分别为 102.3 、 100.3 、 98.6 、 96.8 、 $93.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 侧泵浦 Nd:YAG 板条热形变分析

侧面泵浦激光介质内非均匀温升引起的热膨胀不仅是引起热透镜效应的主要原因,而且也造成了介质内振荡模体积的畸变,严重影响激光器

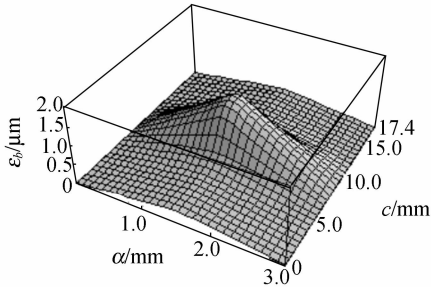


图 7 激光二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 板条泵浦面 ($y=0$) 的热形变分布

Fig. 7 Thermal distortion field distribution on pump-face of diode bar side-pumped Nd:YAG slab ($y=0$)

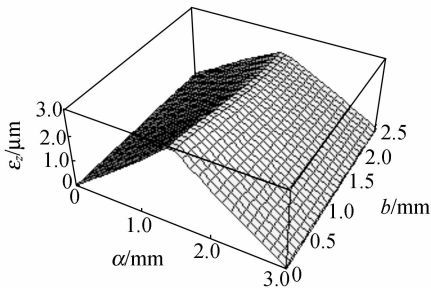


图 8 激光二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 板条通光端面 ($z=0$ 或 $z=c$) 的热形变分布

Fig. 8 Thermal distortion field distribution on end-face of diode bar side-pumped Nd:YAG slab ($z=0$ or $z=c$)

的稳定性。在与图 3 相同的条件下,按式(16)可计算 Nd:YAG 板条产生的热形变量。图 7 给出 Nd:YAG 板条泵浦端面的热形变分布图,图 8 给出 Nd:YAG 板条左、右两个通光端面 ($z=0$ 或 $z=c$) 的热形变分布图。

在与图 3 相同的条件下,图 7 中给出了 Nd:YAG 板条泵浦面的热形变量为 $1.54 \mu\text{m}$ 。图 8 给出由于 YAG 基质的传热作用,同时会引起通光端面的热形变,其热形变量为 $2.66 \mu\text{m}$ 。这两方面的热形变都会影响侧泵板条固体激光器的光-光转换效率以及输出光束质量。

4 结 论

通过对激光二极管板条侧面泵浦激光板条实验装置的分析,建立了符合激光板条工作特点的热分析模型,利用 Poisson 方程的一种新求解方法,得出了板条内部温度场以及热形变场分布的一般解析表达式。同时对于影响激光板条温度场分布的因素进行了定量分析与计算。使用输出功率为 30 W 的激光二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 板条,考虑耦合到板条侧面的高斯光斑半径为 $150 \mu\text{m}$ 、板条铈离子掺杂质量分数为 1.0%,板条泵浦面具有 $102.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的最高温升,泵浦面与通光端面同时发生 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $2.66 \mu\text{m}$ 的最大热形变。研究结论可以用于侧泵板条激光器谐振腔的设计之中,为减小小激光系统的热效应提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 吕百达. 固体激光器件[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2002.
LV B D. *Solid-state Lasers*[M]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication Press, 2002. (in Chinese)
- [2] HE J L, HOU W, ZHANG H L, *et al.*. Continuous-wave output of 5.5 W at 532 nm by intracavity frequency doubling of an Nd:YVO₄ laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, 15(6): 418-419.
- [3] LIU J H, WANG C Q, LV J H, *et al.*. Diode-laser-array single-end-pumped 5 W Nd:YVO₄/KTP continuous-wave solid-state green laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, 16(7): 508-509.
- [4] FARRUCH U O, BUOCRISTIANI A M, BYVIK C E. An analysis of the temperature distribution in finite solid-state laser rods[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, 24 (11): 2253-2264.
- [5] COUSINS A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, 28(4): 1057-1069.
- [6] 申高, 檀慧明, 刘飞. 全固态 355 nm 连续紫外激光器的优化设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 731-735.

- SHEN G, TAN H M, LIU F. Optimization design for all-solid-state 355 nm continuous-wave ultraviolet laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 731-735. (in Chinese)
- [7] PENG X Y, ASUNDI A, CHEN Y H, *et al.*. Study of the mechanical properties of Nd:YVO₄ crystal by use of laser interferometry and finite-element analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(9): 1396-1403.
- [8] 王卫民, 高清松, 罗斌, 等. 二极管侧泵浦高效连续波 10 W 单横模激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 149(1): 1-3.
WANG W M, GAO Q S, LUO B, *et al.*. Study on diode-laser side-pumped CW 10 W TEM₀₀ laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 149(1): 1-3. (in Chinese)
- [9] 杨文是, 秘国江, 孙维娜, 等. LD 阵列面状泵浦 Nd:YAG 板条激光器实验研究[J]. *激光与红外*, 2005, 35(12): 926-928.
YANG W SH, MI G J, SUN W N, *et al.*. The experiment research of Nd:YAG slab laser side-pumped by large-scale diode array[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(12): 926-928. (in Chinese)
- [10] XIE W J, TAM S C, LAM Y L. Thermal and optical properties of diode side-pumped solid state laser rods[J]. *Optics & Laser Technology*, 2000, 32(3): 193-198.
- [11] DAMZEN M J, TREW M, ROSAS E, *et al.*. Continuous-wave Nd:YVO₄ grazing-incidence laser with 22.5 W output power and 64% conversion efficiency[J]. *Opt. Commun.*, 2001, 196(1-6): 237-241.
- [12] GARCIA-LÓPEZ J H, ABOITES V, KIR'YANOV A V, *et al.*. Experimental study and modeling of a diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Opt. Commun.*, 2002, 201(4): 425-430.
- [13] KUNDU P, JOSEPH C S, CHANDRASEKARAN N. High efficiency diode laser side-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 36(1): 65-73.
- [14] FLUCK R, HERMANN M R, HACKEL L A. Energetic and thermal performance of high-gain diode-side-pumped Nd:YAG rods[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, 70(4): 491-498.
- [15] 方爱平, 楼祺洪, 董景星, 等. LD 侧泵浦 Nd:YAG 板条介质温度特性的理论研究[J]. *激光技术*, 2003, 27(3): 248-250.
FANG A P, LOU Q H, DONG J X, *et al.*. Theoretical study on the temperature characteristics of LD side-pumped Nd:YAG laser slab[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3): 248-250. (in Chinese)
- [16] 毕勇, 孙志培, 李瑞宁, 等. 高平均功率腔内和频蓝光 Nd:YAG 激光器[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1): 16-21.
BI Y, SUN ZH P, LI R N, *et al.*. High power blue Nd:YAG laser by intracavity summing frequency[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 16-21. (in Chinese)
- [17] 王加贤, 庄鑫巍. 基于半导体可饱和吸收镜实现闪光灯抽运 Nd:YAG 激光器的被动调 Q 与锁模[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 584-588.
WANG J X, ZHUANG X W. Passive Q-switching and mode-locking in a flashlamp-pumped Nd:YAG laser with semiconductor saturable absorption mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 584-588. (in Chinese)
- [18] 李隆, 史彭, 白晋涛. 单端泵浦激光晶体温度场的半解析热分析[J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(4): 369-372.
LI L, SHI P, BAI J T. Semi-analytical thermal analysis of single end-pumped laser crystal temperature distribution[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(4): 369-372. (in Chinese)
- [19] 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
KOECHNER W. *Solid-state Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [20] AGNESI A, PIRZIO F, TOMASELLI A, *et al.*. Thermal lens characterization of a side-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *SPIE*, 2005, 5777: 753-756.
- [21] BEAT N W, RUDOLF W, HEINZ P W. Thermal lens and beam properties in multiple longitudinally diode laser pumped Nd:YAG slab lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, 32(3): 365-369.
- [22] BERMUDEZ G J C, PINTO R V J, KIRYANOV A V, *et al.*. The thermal-lensing effect in a grazing incidence, diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Opt. Commun.*, 2002, 210(1): 75-82.
- [23] KAROL W, LEONID K, JACOB K, *et al.*. Gain mode and laser mode matching in side-pumped Nd:YVO₄ and Nd:YAG lasers[J]. *Optical Materials*, 2001, 16(1): 163-172.

作者简介: 李隆(1972—), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要从事固体激光技术、超快光谱技术等方面的研究。E-mail: lilong7211@126.com