

文章编号 1004-924X(2009)12-2931-08

端面泵浦热传导各向异性激光棒的温度场

李 隆^{1,2}, 聂建萍¹, 史 彭¹, 冯小娟¹, 甘安生¹

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055;

2. 中国科学院 物理研究所, 北京 100190)

摘要:为了解决 LD 端面泵浦热传导各向异性激光介质产生的热效应问题,建立了端面绝热、侧面冷却的 Nd:YVO₄ 晶体热模型。考虑到 Nd:YVO₄ 为热传导各向异性材料,而光纤耦合 LD 输出光束有超高斯分布的特点,利用特征函数法和常数变异法得到了超高斯光束端面泵浦热传导各向异性激光介质温度场的一般解析表达式,并定量分析了超高斯泵浦光阶次、泵浦功率以及光斑尺寸对 Nd:YVO₄ 晶体温度场的影响。研究表明,若 LD 输出功率为 50 W,光学聚焦耦合器的传输效率为 82%,用四阶超高斯光束端面泵浦掺钕离子质量分数为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 晶体时,泵浦面可获得 528.95 °C 的最大温升。所得结果可用于 LD 端面泵浦热传导各向异性激光介质全固态激光器热稳腔的设计,对于提高激光器性能具有理论指导作用。

关键词:固体激光器;各向异性介质;激光棒;Nd:YVO₄ 晶体;温度场

中图分类号:TN244 **文献标识码:**A

Temperature field characteristics of thermal conductive anisotropic laser rods by LD end-pumped

LI Long^{1,2}, NIE Jian-ping¹, SHI Peng¹, FENG Xiao-juan¹, GAN An-sheng¹

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

2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: With the aim to solve the thermal effect problem of thermal conductive anisotropic laser media end-pumped by LD, a thermal model of Nd:YVO₄ crystal with adiabatic end faces and a cooling circumference was established. As the Nd:YVO₄ crystal is a thermal conductive anisotropic material and the output beam of the fiber-coupled LD has the characteristics of super-Gaussian distribution, a general analytical temperature field expression of the thermal conductive anisotropic laser medium end-pumped by the super-Gaussian beam was obtained by the methods of eigen-function and constant variation. Meanwhile, the influences of the super-Gaussian beam with different orders, spot radius and powers on the temperature field of the Nd:YVO₄ crystal were quantitatively analyzed. The results show that when the output power of LD is 50 W and the transmission efficiency of the optical focusing coupler is 82%, the end-face of the Nd:YVO₄ crystal (the weight percent of neodymium ion doped in the crystal is 0.5%) end-pumped by the forth order super-Gaussian beam can get a maximum

收稿日期:2009-01-15;修订日期:2009-02-18.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展规划项目(No. 2006CB910300);陕西省工业攻关资助项目(No. 2008K05-15)

temperature rise of 528.95 °C. The results can be applied to the design of thermally stabilized cavity of the all-solid-state laser with thermal conductive anisotropic laser medium end-pumped by LD, and will play theoretically a directional role in improving the performance of lasers.

Key words: solid-state laser; anisotropic medium; laser rod; Nd : YVO₄ crystal; temperature field

1 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态激光器具有结构紧凑、稳定性好、效率高等优点,在工业、医疗、国防、科研等领域有着广泛的应用^[1-2]。在适合于 LD 泵浦的众多激光晶体中掺钕钒酸钇晶体(Nd : YVO₄)具有优良的物理、光学以及机械加工等特性,如:在 1 064 nm 处的受激发射截面约为 Nd : YAG 的 4 倍(超过 $20 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$);在 809 nm 的吸收系数约为 Nd : YAG 的 3.5 倍;吸收带宽为 21 nm,是 Nd : YAG 的 2 倍;对泵浦光波长的微小波动不灵敏^[3]等。然而,激光晶体吸收泵浦光能量产生受激辐射的同时,有相当一部分泵浦光能量转变为晶体的热能,其热效应问题对激光器谐振腔的稳定性、输出功率、输出光束质量等有着直接的影响。

对于激光晶体热效应问题的研究一直是激光器研究的重要课题之一^[4-6]。Nd : YVO₄ 晶体为热传导各向异性材料,其导热系数(也称热导率)为: $\lambda_{//} = 5.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_{\perp} = 5.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。在以往的研究中均将激光晶体按照热传导各向同性材料处理,研究结果与实际温度场之间存在较大的差异^[7-8]。有课题组^[9-10]曾利用差分法将热传导方程转化为代数方程组,得到了 LD 端面泵浦方形 Nd : YVO₄ 晶体温度场的计算方法。差分法是一种离散近似的计算方法,寻求的不是域内的连续函数,而是域内各节点函数的近似值。本课题组^[11-12]也曾构建了一组正交归一的三角函数族,利用热传导方程及边界条件也得到了端面泵浦方形 Nd : YVO₄ 晶体温度场的计算表达式。本文基于各向异性介质传热 Poisson 方程分析,利用特征函数法和常数变易法,推出一种新的各向异性介质热传导方程求解方法。考虑到光纤耦合半导体激光器输出光束具有超高斯分布的特点,得出了超高斯光束端面泵浦、周边冷却 Nd : YVO₄ 圆棒内温度场的一般解析表达式。同时分

析了超高斯泵浦光阶次、泵浦功率以及光斑尺寸对于 Nd : YVO₄ 圆棒温度场的影响。所得结果可应用于 LD 端面泵浦 Nd : YVO₄ 激光器热稳腔的设计^[13],为减小激光晶体热效应、提高激光器的性能提供了理论依据。

2 超高斯光束端面泵浦 Nd : YVO₄ 晶体热分析解析计算

2.1 超高斯光束端面泵浦、周边冷却 Nd : YVO₄ 晶体热模型的建立

采用端面泵浦结构,泵浦光与光学谐振腔共线形成的增益区与谐振腔模体积存在很大的空间交叠,使得激光器具有低的阈值泵浦功率以及较高的斜效率^[14-15]。在高功率泵浦光辐射下,晶体吸收部分泵浦光能量产生热能,在激光晶体工作时,通常采用循环水冷或半导体制冷来控制激光晶体周边环境温度,晶体内的热量主要以热传导的方式散失。

Nd : YVO₄ 晶体是热传导各向异性材料,LD 端面泵浦的 Nd : YVO₄ 圆棒晶体采用 *c* 轴切割^[16]。如图 1 所示为 LD 端面泵浦 Nd : YVO₄ 棒模型简图,其中 *r*、*z* 分别为晶体的径向和轴向坐标,808 nm 泵浦光沿晶体 *z* 轴从端面(*z*=0)泵浦到激光晶体,*R* 为激光棒半径,*L* 为激光棒长

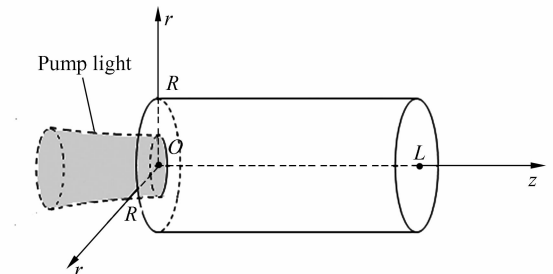


图 1 LD 端面泵浦 Nd : YVO₄ 棒的模型简图
Fig. 1 Schematic diagram of LD end-pumped Nd : YVO₄ rod model

度, 晶体 c 轴沿 z 方向。

通过对入射泵浦光光强分布以及端面泵浦激光棒工作特性的分析, 建立了端面泵浦、周边冷却 Nd:YVO₄ 棒热分析模型:

(1) 激光晶体内部热源分布状态

半导体激光器内设多组巴条, 每一巴条出射的光束经微透镜耦合进入一根光纤连接, 将这些光纤捆扎成束形成尾纤出射激光, 其光强分布应用超高斯函数来描述^[17]。耦合器由两个平凸透镜组合而成, 不改变光束能量的分布状态。因此, 在入射到激光棒端面($z=0$)超高斯光束光强度分布的表达式为^[18]:

$$I_i(r, 0) = I_0 e^{-2\frac{r^2}{\omega^{2k}}}, \quad (1)$$

式中 I_i 为超高斯泵浦光的光强度; I_0 为超高斯泵浦光中心的强度; I_0 表达式为:

$$I_0 = \frac{P}{2\pi \int_0^\infty e^{-2\frac{r^2}{\omega^{2k}}} r dr}, \quad (2)$$

式中 P 为入射到激光棒端面的光功率; ω 为超高斯泵浦光的超高斯半径; k 为超高斯泵浦光的阶次。当阶次 k 为 1 时, 超高斯泵浦光的光强分布便为理想的高斯分布; 当阶次 k 为 4、5、6 时, 其光强分布呈“Top-hat”形状; 而当阶次 k 趋于 ∞ 时, 其光强分布可视为均匀分布。图 2 给出了不同阶次的超高斯泵浦光光强分布强度分布图。

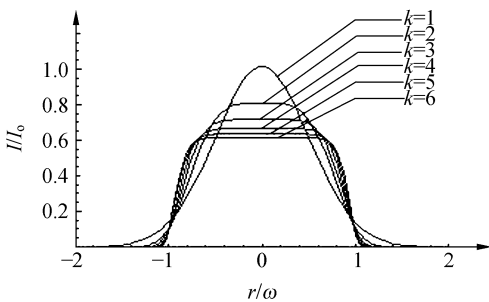


图 2 不同阶次超高斯泵浦光束光强分布对比图
Fig. 2 Comparison of intensity distribution of super-Gaussian pump-light with different orders

设激光晶体对泵浦光的吸收系数为 β , 超高斯泵浦光光强因吸收而减弱, 在传播至激光晶体内部任意位置处超高斯泵浦光的光强为:

$$I_i(r, z) = I_i(r, 0) \cdot e^{-\beta z}, \quad (3)$$

由于激光晶体量子效应和内损耗吸收泵浦光的能量而产生的热量远大于其它原因产生的热

量, 所以这里仅考虑晶体由于荧光量子效应和内损耗吸收泵浦光能量而引起的发热^[19]。在激光棒内超高斯泵浦光产生的热源分布表示为:

$$q_v(r, z) = \eta I_i(r, z) \beta = \eta I_0 \beta e^{-2\frac{r^2}{\omega^{2k}}} e^{-\beta z}, \quad (4)$$

其中 η 为由荧光量子效应和内损耗所决定的热转换系数。 $\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_l$, 其中 λ_p 为激光二极管泵浦光波长 808 nm, λ_l 为谐振腔的振荡激光波长 1 064 nm。

(2) 激光晶体的边界条件

为使 Nd:YVO₄ 棒内产生的热量尽快散失, 在激光器工作时对激光晶体采用了强制冷却的方法。一般将 Nd:YVO₄ 棒放置在热沉夹块中, 用循环水冷却控制热沉的温度(多为 18~20 °C), 如图

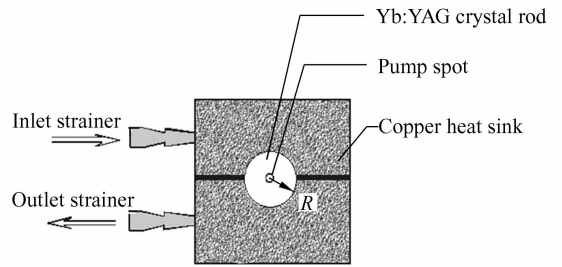


图 3 循环水冷激光棒装置简图
Fig. 3 Schematic diagram of experiment equipment for circular water-cooling laser crystal rod

3 所示为循环水冷激光棒装置简图。为确保激光晶体与热沉有良好热接触, 在晶体侧面涂抹导热硅脂后, 用钢包裹再夹持于热沉中。这样激光晶体侧面温度 u 便保持相对恒定, 作为热模型数学处理可设其为零(相对)。晶体棒的两个通光端面处于空气中, 经端面和空气对流散失的热量远小于从侧面通过热传导与热沉散失的热量, 因此可假设激光晶体两通光端面近似绝热, 可得 LD 端面泵浦激光晶体满足边界条件的数学表达式为:

$$\begin{cases} u(r, z, \varphi) |_{r=R} = 0, & u(r, z, \varphi) |_{r=0} < +\infty \\ \left. \frac{\partial u(r, z, \varphi)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, & \left. \frac{\partial u(r, z, \varphi)}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

2.2 热传导各向异性激光晶体内部温场解析计算

在 LD 泵浦全固态激光器稳定工作时, LD 泵浦光功率和激光棒周边冷却温度均保持不变, 激光棒处于热平衡状态。激光棒内温度场分布遵守热传导方程。

沿激光棒中心轴入射的超高斯泵浦光光强度

分布以及热模型均具有轴对称性,所以棒内温度场分布与 φ 无关,即 $u(r, z, \varphi) = u(r, z)$ 。各向异性介质热传导方程及其边界条件相应地简化为:

$$\lambda_{\perp} \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial r^2} + \lambda_{\perp} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} + \lambda_{\parallel} \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial z^2} = -q_v(r, z), \quad (6)$$

$$\begin{cases} u(r, z) |_{r=R} = 0, u(r, z) |_{r=0} < +\infty \\ \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

其中: λ_{\perp} 为激光晶体沿径向的导热系数; λ_{\parallel} 为激光晶体沿轴向的导热系数。

求解各向异性介质热传导方程(6)的方法如下:

(1)根据热传导方程及其边界条件的特点以及 $J_0(\frac{\alpha_n r}{R})$ 的正交完备性,可以用特征函数法以及

$$u(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} M_{nk} \cdot J_0\left(\frac{\alpha_n r}{R}\right) \cdot \left\{ \alpha_n e^{-\beta z} \sqrt{\frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{\parallel}}} + R\beta \cdot \operatorname{csch}\left(\sqrt{\frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{\parallel}}} \frac{\alpha_n L}{R}\right) \left[e^{-\beta z} \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{\parallel}}} \frac{\alpha_n z}{R}\right) - \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{\parallel}}} \frac{\alpha_n(L-z)}{R}\right) \right] \right\}, \quad (9)$$

其中比例系数 M_{nk} 为

$$M_{nk} = \frac{-2I_{0k}\eta\beta}{[J_0'(\alpha_n)]^2 \alpha_n (\lambda_{\parallel} R^2 \beta^2 - \lambda_{\perp} \alpha_n^2)} \sqrt{\frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}}} \int_0^R r e^{-\frac{r^2}{\omega^2}} J_0\left(\frac{\alpha_n r}{R}\right) dr$$

2.3 超高斯光束端面泵浦 Nd:YVO₄ 棒温场分布特点

Nd:YVO₄ 为四方晶体,锆英石(ZrSiO₄)型结构,属单轴晶系,是一种非常优良的双折射晶体。同时具有受激发射截面大、吸收系数高、吸收带宽,激光诱导破坏阈值高等特点,使得 Nd:YVO₄ 成为一种适用于高功率、高稳定性且费用效能比低的优良激光晶体之一。依据文献[4],掺

分离变量法求解所需求的方程。假设满足边界条件的方程(6)的解为:

$$u(z, r) = \sum_{n=1}^{\infty} G_n(z) J_0\left(\frac{\alpha_n r}{R}\right), \quad (8)$$

这里 $G_n(z)$ 为只与变量 z 有关的待定函数; J_0 为零阶第一类 Bessel 函数; α_n 为零阶第一类 Bessel 函数的第 n 个零点。

(2)将式(8)代入方程(6),并根据边界条件(7),可确定 $G_n(z)$ 的表达式,从而可得到热传导各向异性激光介质内部温度场分布的解析解。

经计算,得出超高斯光束端面泵浦热传导各向异性激光晶体内部温度场分布的一般解析表达式为:

钕离子质量分数为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 晶体对 808 nm 波长泵浦光的吸收系数为 14.8 cm⁻¹。

调节半导体激光器输出泵浦功率为 50 W,耦合器的传输效率为 82%,经耦合器准直聚焦后的超高斯泵浦光光斑半径为 400 μm 时,四阶超高斯光束端面泵浦 Φ3 mm×6 mm Nd:YVO₄ 棒温场分布如图 4,其中 Nd:YVO₄ 棒入射端面的最高温升为 528.95 °C。激光棒内等温线分布如图 5 所示。

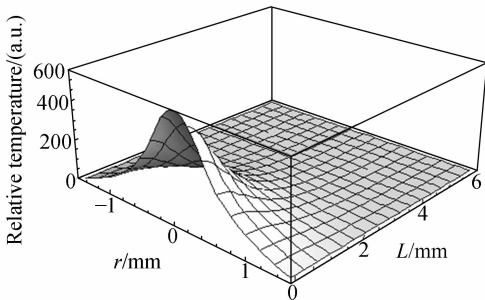


图 4 四阶超高斯光束端面泵浦 Nd:YVO₄ 棒的温度场分布

Fig. 4 Three-dimensional temperature field of Nd:YVO₄ rod end-pumped by forth-order super-Gaussian beam

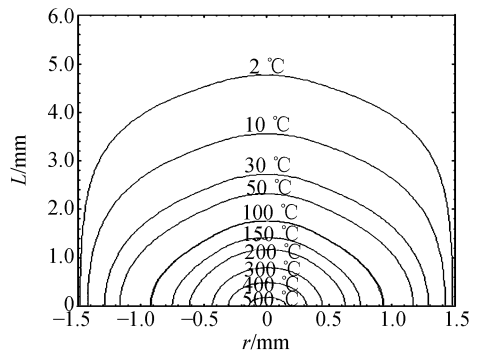


图 5 四阶超高斯光束端面泵浦 Nd:YVO₄ 棒内等温线分布图

Fig. 5 Isotherm distribution of Nd:YVO₄ rod end-pumped by forth-order super-Gaussian beam

2.3.1 超高斯泵浦光光斑尺寸对 Nd : YVO₄ 棒温度场的影响

要使 LD 泵浦的全固态激光器有较高的光—光转换效率和良好的输出光束质量,泵浦光束与激光介质内基模之间的模式匹配至关重要^[20]。另外泵浦光斑的平均尺寸也与固体激光器的阈值泵浦功率、斜效率等有着直接关系^[21]。在与图 4 相同条件下,调整耦合器从而改变泵浦光斑尺寸,图 6 给出了超高斯泵浦光光斑尺寸对 Nd : YVO₄ 棒内温度场的影响。当超高斯光束光斑半径分别为 200、300、400、500、600 μm 时,Nd : YVO₄ 棒端面的最高温升分别为 798.14、629.70、528.95、452.82、393.22 ℃。

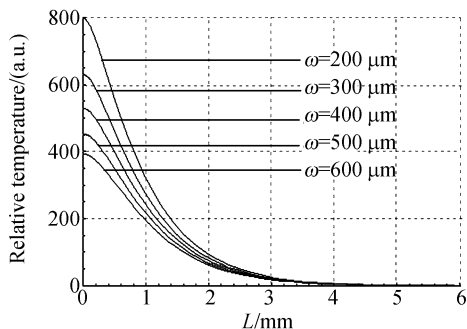


图 6 不同光斑尺寸的超高斯光束端面泵浦 Nd : YVO₄ 棒的温度场分布对比图

Fig. 6 Comparison of temperature field distribution of Nd : YVO₄ rod end-pumped by different super-Gaussian beam radii

2.3.2 超高斯泵浦光功率对 Nd : YVO₄ 棒温场影响

激光输出功率一般随入射泵浦光功率的增加而增加^[22]。半导体激光器输出泵浦光功率的变化,使得晶体棒温度场发生变化,进而改变了激光棒的热透镜焦距,造成激光器输出光束发散角和模体积不稳定和输出功率波动等现象。图 7 给出了超高斯泵浦光功率对 Nd : YVO₄ 棒温度场的影响。当泵浦功率为 20、30、35、40、50 W 时,棒端面最高温升分别为 211.58、317.37、370.26、423.16、528.95 ℃。可以看出:泵浦功率越高,晶体棒内温场的分布越不均匀;而最高温升基本与泵浦光功率成正比。

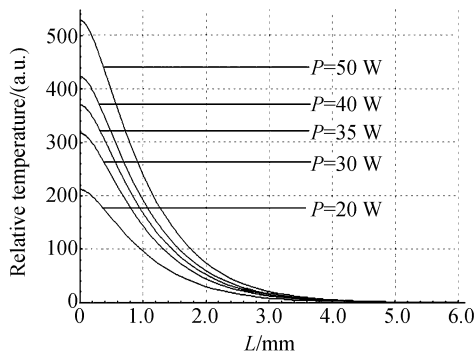


图 7 不同泵浦功率超高斯光束端面泵浦 Nd : YVO₄ 棒的温度场分布对比图

Fig. 7 Comparison of temperature field distribution of Nd : YVO₄ rod end-pumped by different pumped powers

2.3.3 超高斯泵浦光阶次对 Nd : YVO₄ 棒温场影响

若超高斯泵浦光阶次分别取一、二、三、四、五时,Nd : YVO₄ 棒泵浦面的最大温升分别为 540.78、547.26、536.94、528.95、523.16 ℃,如图 8 所示。由图 8 可以得出:不同阶次超高斯光束端面泵浦 Nd : YVO₄ 棒形成的温度场轮廓基本相同,只是在最高温升上有所差异。而二阶超高斯光束在泵浦 Nd : YVO₄ 棒时产生的温升值最大,这是由于二阶超高斯光束光能量的分布要比理想高斯光束相对集中的缘故。

2.4 端泵掺 Nd 离子 GdVO₄ 晶体和 YVO₄ 晶体热效应对比

Nd : GdVO₄ 晶体为同属 ZrSiO₄ 结构的四方晶体,其导热系数为 λ_∥ = 5.23 W/(m · K), λ_⊥ = 11.7 W/(m · K)。掺 Nd³⁺ 质量分数为 1% 的 Nd : GdVO₄ 棒对 808 nm 泵浦波长激光的吸收系数为 57 cm⁻¹^[23-24]。取与 Nd : YVO₄ 相同尺寸,与图 4 相同的泵浦条件,图 9 给出了 Nd : GdVO₄ 棒内的温度场分布,泵浦端面的最大温升为 567.37 ℃。

选取掺 Nd³⁺ 质量分数均为 1% 的 Nd : YVO₄ 棒与 Nd : GdVO₄ 棒进行温度场的对比分析。掺 Nd³⁺ 质量分数均为 1% 的 Nd : YVO₄ 棒对 808 nm 泵浦波长激光的吸收系数为 31.4 cm⁻¹^[25]。在与图 4 相同的泵浦条件下,Φ3 mm × 6 mm 棒内沿中心轴的温度分布对比图如图 10 所示,Nd : YVO₄ 棒与 Nd : GdVO₄ 棒端面最高温升分

别为 793.72 °C 和 567.37 °C。从图 10 中可以看出,虽然 Nd : GdVO₄ 棒的吸收系数较大,但它内部温升量却比 Nd : YVO₄ 棒低很多,原因在于 Nd : GdVO₄ 棒径向热导率较大,可将相当大的一部分热量沿径向传导出。

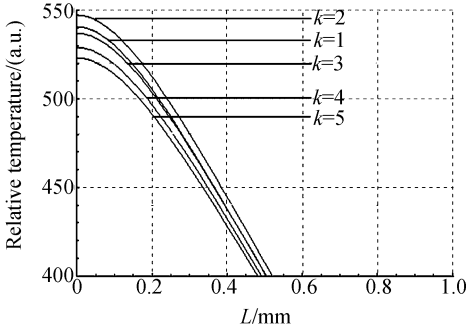


图 8 不同阶次超高斯光束端面泵浦 Nd : YVO₄ 棒
的温度场分布对比图
Fig. 8 Comparison of temperature field distribution
of Nd : YVO₄ rod end-pumped by super-
Gaussian beam with different orders

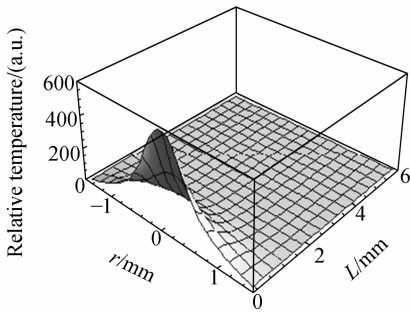


图 9 四阶超高斯光束端面泵浦 Nd : GdVO₄ 棒
的温度场分布
Fig. 9 Three-dimensional temperature field of Nd :
GdVO₄ rod end-pumped by forth-order super-
Gaussian beam

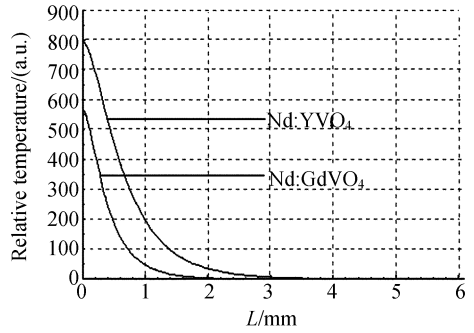


图 10 超高斯光束端面泵浦 Nd : YVO₄ 与 Nd : Gd-
VO₄ 棒沿中心轴线温度分布对比图
Fig. 10 Comparison of temperature field distribution
of Nd : YVO₄ and Nd : GdVO₄ rods end-
pumped by super-Gaussian beam

3 结 论

通过 LD 端面泵浦全固态激光器工作特点的分析,建立了端面泵浦、周边冷却 Nd : YVO₄ 晶体热模型。考虑到 Nd : YVO₄ 为热传导各向异性的晶体材料,而光纤耦合半导体激光器输出光束具有超高斯分布的特点,利用特征函数法和常数变易法,得出了超高斯光束端面泵浦、周边冷却激光晶体内部温度场的一般解析表达式,分析了超高斯泵浦光束阶次、泵浦功率以及光斑尺寸对 Nd : YVO₄ 晶体温度场的影响。研究表明,若 LD 输出功率为 50 W,光学聚焦耦合器的传输效率为 82%,用四阶超高斯光束端面泵浦掺钕离子质量分数为 0.5% 的 Nd : YVO₄ 晶体时,泵浦面可获得 528.95 °C 的最大温升。所得结果可应用于 LD 端面泵浦 Nd : YVO₄ 激光器热稳腔的设计,对于提高激光器的性能具有理论指导意义。

参考文献:

[1] 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)

[2] 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥,译.北京:科学出版社,2002.
WALTER K. *Solid State Laser Engineering* [M]. SHUN W, JIANG Z W, CHENG G X, translate. Beijing: Beijing Science Press, 2002. (in Chinese)
[3] FIELDS R A, BIMBAUM M, FINCHER C L. Highly efficient Nd:YVO₄ diode-laser end-pumped laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(23): 1885-1888.

- [4] CHEN Y F, HUANG T M, KAO C F, *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power; influence of thermal effect [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997,33(8):1424-1429.
- [5] CHEN Y F, LAN Y P, WANG S C. High-power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser; thermally induced fracture versus pumped wavelength sensitivity [J]. *Appl. Phys. B*, 2000,71(6):827-830.
- [6] 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):1396-1402.
- [7] INNOCENZI M E, YURA H T, FRUCHER C L, *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990,56(19):1831-1833.
- [8] 史彭,李隆,甘安生,等. 激光二极管端面抽运圆形截面 Nd:GdVO₄ 晶体的热形变[J]. 中国激光, 2006,33(10):1324-1328.
SHI P, LI L, GAN A SH, *et al.*. Research on thermal distortion of Nd:GdVO₄ crystal with laser diode end-pumped circular section [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006,33(10):1324-1328. (in Chinese)
- [9] 郑义,高明义,姚建铨. LD 端面泵浦各向异性激光介质的热效应研究[J]. 光电子·激光, 2003,14(10):1094-1098.
ZHANG Y, GAO M Y, YAO J Q. Study on thermal effect of anisotropic laser medium by LD end-pumped [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2003,14(10):1094-1098. (in Chinese)
- [10] 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.
ZHANG SH Y, HUANG CH X, YU G L, *et al.*. Thermal effect of laser crystal by laser diode end-pumped [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008,35(3):333-337. (in Chinese)
- [11] 史彭,李隆,陈文,等. 各向异性热参量对 Nd:YVO₄ 晶体热效应的影响[J]. 光电子·激光, 2007,18(2):175-178.
SHI P, LI L, CHEN W, *et al.*. Influence of anisotropic thermal parameter on the thermal effect of Nd:YVO₄ crystal [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007,18(2):175-178. (in Chinese)
- [12] 史彭,陈文,李隆等. 激光分布对抽运 Nd:YVO₄ 晶体热效应的影响[J]. 光学精密工程, 2008,16(2):197-201.
SHI P, CHEN W, LI L, *et al.*. Influence of laser distribution on thermal effect of Nd:YVO₄ crystal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):197-201. (in Chinese)
- [13] GRAF TH, WYSS E, ROTH M, *et al.*. Laser resonator with balanced thermal lenses [J]. *Opt. Commun.*, 2001,190(1):327-331.
- [14] MUKHOPADHYAY P K, ALSOUS M B, RANGANATHAN K, *et al.*. Characterization of laser-diode end-pumped intracavity frequency doubled, passively Q-switched and mode-locked Nd:YVO₄ laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2005,37(2):157-162.
- [15] BROWN D C, RICHARD N, LARRY B. Efficient cw end-pumped, end-cooling Nd:YVO₄ diode-pumped laser [J]. *Appl. Opt.*, 1997,36(3):8611-8613.
- [16] 刘辉兰,王红梅,杨海莲,等. LD 泵浦 Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 锁模激光器的输出特性[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2007,31(6):752-756.
LIU H L, WANG H M, YANG H L, *et al.*. Output characteristic of passive Q-switched and mode-locked Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG solid-state lasers [J]. *Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition)*, 2007,31(6):752-756. (in Chinese)
- [17] NADGARAN H, SABAIA M. Pulsed pump; thermal effects in solid state lasers under super-Gaussian pulses [J]. *Paramana J. Phys.*, 2006,67(6):1119-1128.
- [18] WEN J X, YOUNG KWON, HU W T, *et al.*. Thermal modeling of solid state lasers with super-Gaussian pumping profiles [J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2003,42(6):1787-1794.
- [19] 余锦. 纵向泵浦固体激光介质热透镜效应的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2000,12(1):27-31.
YU J. Theoretical study on thermal beam focusing in longitudinally-pumped solid-state laser rods [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2000,12(1):27-31. (in Chinese)
- [20] 刘均海,吕军华,卢建仁,等. 高功率端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器模匹配的研究[J]. 光学学报,

2000,20(2):186-189.

LIU J H, LU J H, LU J R, *et al.*. Mode matching in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO₄ solid-state lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000,20(2):186-189. (in Chinese)

- [21] 陈浩伟,解慧明,贾森,等. 自聚焦透镜耦合 Nd:YVO₄/LBO 全固态绿光激光器[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2007,37(4):534-538.

CHEN H W, XIE H M, JIA S, *et al.*. High efficient all-solid-state Nd:YVO₄/LBO green laser with self-focus lens[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2007, 37(4):534-538. (in Chinese)

- [22] 吕彦飞,张喜和,檀慧明,等. 全固态连续波 555nm 黄-绿光激光器[J]. 光学精密工程, 2007,15(5):674-677.

LU Y F, ZHANG X H, TAN H M, *et al.*. 555 nm all solid-state continuous-wave yellow-green la-

ser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 37(4):674-677. (in Chinese)

- [23] DESHAZER L. Vanadate crystals exploit diode-pumped technology [J]. *Laser Focus World*, 1994,30(2):88-90.

- [24] WANG C Q, CHOW Y T, REEKIE L, *et al.*. A comparative study of the laser performance of diode-laser pumped Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄ crystals[J]. *Appl. Phys. B*, 2000,70(6):769-772.

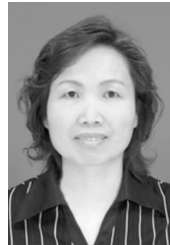
- [25] 史彭,李隆,甘安生,等. 激光二极管侧抽运长方形 Nd:YVO₄ 激光晶体热分析[J]. 中国激光, 2007, 34(2):176-180.

SHI P, LI L, GAN A S, *et al.*. Thermal analysis of rectangular Nd:YVO₄ crystal by laser diode side-pumped [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007,34(2):176-180. (in Chinese)

作者简介:



李 隆(1972—),男,河南正阳人,博士,副教授,于西安交通大学获博士学位,中国科学院物理所访问学者,主要从事全固态激光器及其应用和超快激光光谱特性等研究。E-mail: lilong7211@126.com



冯小娟(1959—),女,陕西咸阳人,博士,教授,主要从事光电信息处理方面的研究。E-mail: xjfeng1959@163.com



聂建萍(1980—),女,山西寿阳人,硕士,主要从事新型全固态激光技术与器件的研究。E-mail: njp803066@126.com



甘安生(1954—),男,江西人,教授,主要从事全固态激光器热效应问题的研究。E-mail: ganans@xauat.edu.cn



史 彭(1956—),男,辽宁抚顺人,教授,主要从事高功率激光系统热问题的研究。E-mail: pshi56@163.com