

文章编号: 1001-3806(2004)02-0177-04

全固态激光器中掺 Nd³⁺ 离子激光晶体热效应的研究

史 彭¹, 李 隆^{2,3}, 甘安生¹, 李东亮¹, 白晋涛³

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055; 2. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049; 3. 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710069)

摘要: 激光晶体吸收激光二极管的泵浦光能量, 产生激光振荡的同时有相当一部分泵浦光能量会转变为激光晶体的热量并耗散在晶体内部, 产生的热效应严重影响到激光器的性能和品质。通过对于激光晶体端面泵浦方式的分析, 利用半解析热分析方法得出了晶体内部温度场和热形变场的计算方法, 并对几种典型的掺 Nd³⁺ 离子晶体的温度场和端面热形变场及其产生差异的原因进行了定量分析。研究方法和得出结果可以应用到内有热源、具有轴对称形式的模型中, 对于激光二极管泵浦的全固态激光器的设计提供基础理论的铺垫。

关键词: 全固态激光器; 温度场和热形变场; 半解析热分析; 端面泵浦; 掺 Nd³⁺ 离子激光晶体
中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Thermal effect research of Nd³⁺ doped laser crystals in end pumped all solid state lasers

SHI Peng¹, LI Long^{2,3}, GAN Ansheng¹, LI Dongliang¹, BAI Jintao³

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Electronic Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Institute of Photonics Phototechnology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: In diode pumped all solid state laser system laser crystal absorbing diode pumped energy will generate laser oscillation, simultaneously quite a part of pump energy will be translated into heat which is dissipated inside crystal. The thermal phenomena induced thermal effects seriously influence laser's performance and quality. According to laser crystal end pumping mode analysis, laser crystal's interior temperature field and thermal distortion field calculation means are obtained by semi-analytical thermal analysis method. Under the same working conditions several typical Nd³⁺ ion doped laser crystal's temperature field and end face thermal distortion field as well as reasons of discrepancy are quantitatively analyzed. The analysis method and research results can also be applied to analyze temperature field and thermal distortion field of inner thermal source with axis-symmetrical profile models. The work will supply theory groundwork for design of diode pumped all solid state lasers.

Key words: all solid state laser; temperature field and thermal distortion field; semi-analytical thermal analysis method; end pumped; Nd³⁺ ion doped laser crystal

引 言

自上世纪 90 年代, 激光二极管阵列的发光功率得到了大幅度的提高, 也促进了与此相关的激光技术的迅速发展。同时期, 新的激光晶体材料和非线性光学晶体材料如雨后春笋般地涌现出来, 再加上日趋成熟的激光频率与波长变换技术, 都使得激光二极管泵浦全固态激光器成为当前固体激光器发展

的主流, 继而迅速演变为新一代激光器件^[1]。

目前, 能够用于激光二极管泵浦的激光晶体材料种类繁多, 其中掺 Nd³⁺ 离子激光晶体以其优越的物理性质和光学特性深受人们喜爱^[2]。常用的掺 Nd³⁺ 离子激光晶体有 Nd:YAG, Nd:VO₄, Nd:GdVO₄, Nd:KGW, Nd:LF 等。

由于不同种类的激光晶体对于激光二极管泵浦光的吸收系数不同, 热传导系数也不同, 因此, 端面泵浦方式以及外部冷却装置在激光晶体内部形成的温度梯度场变不同^[3,4]。而激光晶体温度梯度场引起的热效应影响到激光器的稳定性^[5]。

目前, 对激光介质的温度分析已有很多, 但在方法上或数学处理上都存在一定的问题^[6]。半解析热

作者简介: 史 彭(1956), 男, 教授, 从事强激光器热分析、集成电路热分析等方面的研究工作。

E-mail: pshi56@sohu.com

收稿日期: 2003-07-24; 收到修改稿日期: 2003-08-11

分析方法是国际上近几年出现的一种新方法^[7],它具有解析法的准确度,又有较宽的适用范围^[8,9]。

笔者对单端泵浦几种掺Nd³⁺离子激光晶体的实际工作情况进行了分析,建立了符合工作条件下激光系统的动态温度场模型,并通过热传导方程及晶体的边界条件,利用半解析热分析方法得出了激光晶体内部温度场的半解析解,并分析了影响激光晶体温度场分布的各种因素,得出的结论对单端泵浦的全固态激光器的设计将起到一定的指导作用。

1 激光晶体温度场的半解析解

1.1 单端泵浦方式下激光晶体热模型分析

用二极管激光器单端面泵浦全固态激光器实验结构主要有直腔结构、V型折叠腔结构、Z型折叠腔结构、环形腔结构等,图1为四镜Z型折叠腔激光器实验示意图^[10]。

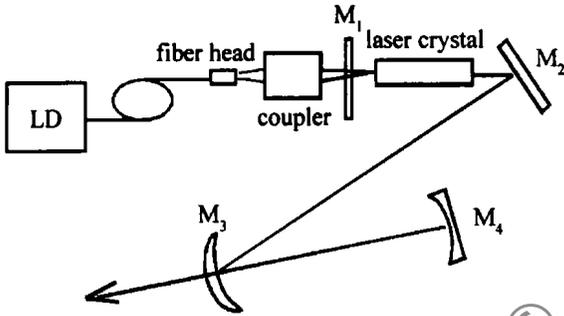


Fig. 1 Experiment schematic of single end-pumped laser crystal in four mirror fold cavity laser

激光晶体是半径为 R 、长度为 L 的圆柱体,周边用循环水或半导体铜制冷却器控制周边温度恒定,其热模型如图2所示。

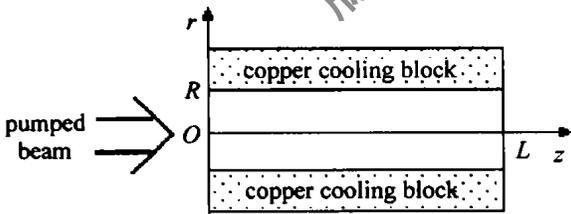


Fig. 2 Schematic diagram of laser crystal thermal model

对热模型进行分析,可以得出以下结论。

(1) 假设泵浦激光光强为高斯分布

对于经光纤耦合且经过平凸透镜组成的光学系统或自聚焦透镜的泵浦光束,其光强分布用高斯函数来近似^[11,12]。设泵浦光平行 z 轴入射到 $z = 0$ 面时,光强 $I(r)$ 分布为:

$$I(r, 0) = I_0 e^{-2\frac{r^2}{w^2}} \quad (1)$$

式中, w 为光束的高斯半径。入射到晶体 $z = 0$ 端面

的功率为 P , 则:

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

得出:

$$I_0 = \frac{P}{2\pi \int_0^\infty e^{-2\frac{r^2}{w^2}} r dr} = \frac{2P}{\pi w^2} \quad (3)$$

激光晶体对泵浦光的吸收系数为 β , 当平行 z 轴的泵浦光传播时,光强由于被吸收而减弱,在晶体 $z =$

z 面的光强为:

$$I(r, z) = I_0 e^{-2\frac{r^2}{w^2}} \cdot e^{-\beta z} \quad (4)$$

(2) 热功率密度

由于晶体荧光量子效应和内损耗吸收泵浦光的能量远大于其它原因晶体吸收的能量,仅考虑晶体由于荧光量子效应和内损耗吸收泵浦光能量发热。在 $z = z$ 面晶体吸收能量产生的热功率密度为:

$$q_v(r, z) = \beta \eta I(r, z) = \beta \eta I_0 e^{-2\frac{r^2}{w^2}} \cdot e^{-\beta z} \quad (5)$$

式中, η 为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数:

$$\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_l \quad (6)$$

式中, λ_p 为激光二极管激光器泵浦光波长 809nm, λ_l 为谐振腔的振荡激光波长 1064nm。

(3) 边界条件

由于晶体周边用紫铜制冷冷却器冷却,紫铜的热传导系数远远大于激光晶体热传导系数(铜的热传导系数是掺Nd³⁺晶体的30多倍),热量主要沿激光晶体的径向向外传导,因此假设热流为径向(r 方向)^[12]:

$$u_r(r, z) = 0 \quad (7)$$

侧面温度保持恒定,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 , 即:

$$u(R, z) = 0 \quad (8)$$

晶体的两个通光端面与空气相接触,从两端面和空气热交换流出的热量远远小于从晶体侧面通过传导流出的热量,因此可假设晶体的两端面绝热,即有:

$$u_z(r, z) |_{z=0} = u_z(r, z) |_{z=L} = 0 \quad (9)$$

1.2 晶体内部温度场的半解析解

由于激光晶体内部有热源,则晶体内部热传导遵守 Poisson 方程:

$$u_{rr} + \frac{1}{r} u_r + \frac{1}{r^2} u_{\varphi\varphi} + u_{zz} + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (10)$$

式中, λ 为晶体导热系数或称为热导率。由于热模型、泵浦光源、激光晶体内部热源均具有轴对称性,其温度场与 φ 无关,即 $u(r, \varphi, z) = u(r, z)$ 。在热流为径向假设下, (10) 式的半解析解为(推导过程略):

$$u = - \frac{\beta \eta I_0}{\lambda} e^{-\beta z} \times$$

$$\left[\ln \frac{r}{R} \int_0^r e^{-2\frac{\rho^2}{w^2}} \rho d\rho + \int_r^R e^{-2\frac{\rho^2}{w^2}} \rho \ln \frac{\rho}{R} d\rho \right] \quad (11)$$

可利用 Mathematica 等软件进行温度场的数值计算。

2 激光晶体热形变场的计算

当激光晶体内部形成稳定温度场后, 由于激光晶体受热膨胀会使得晶体发生热形变, 这种热形变会严重影响激光器的品质。激光晶体轴向热形变是热形变的主要因素, 利用半解析方法得出激光晶体轴向热形变量计算公式为(推导过程略):

$$l = - \frac{\alpha \Gamma_0}{\lambda} (1 - e^{-L\beta}) \times \left[\ln \frac{r}{R} \int_0^r e^{-\frac{\rho^2}{w^2}} \rho d\rho + \int_r^R e^{-2\frac{\rho^2}{w^2}} \rho \ln \frac{\rho}{R} d\rho \right] \quad (12)$$

式中, α 为激光晶体轴向热膨胀系数。

3 几种典型掺 Nd³⁺ 激光晶体的热分析

5 种典型的掺 Nd³⁺ 激光晶体光学、物理特性参量, 如表 1 所示, 其中有 Nd:YAG^[13], Nd:YVO₄^[14], Nd:GdVO₄^[15, 16], Nd:KGW^[17-19], Nd:LF^[20]。

Table 1 Speciality parameters of five type Nd ion doped laser crystals

No.	crystal's name	Nd ion doped concentration / %	absorption coefficient / cm ⁻¹	axial thermal conductivity / (W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹)	thermal expansion coefficient / (10 ⁻⁶ K ⁻¹)
1	Nd:YAG	1.1	9.1	0.13	8.2
2	Nd:YVO ₄	1.1	31.4	0.051	11.37
3	Nd:GdVO ₄	1	174	0.117	7.3
4	Nd:KGW	8	36	0.038	7.3
5	Nd:LF	1	4.5	0.06	—

(1) 掺 Nd³⁺ 激光晶体内部温度场。以 Nd:YVO₄ 激光晶体为例, 调节激光二极管的泵浦功率为 15W, 泵浦光的高斯半径 $w = 0.45\text{mm}$, 晶体半径 $R = 1.5\text{mm}$, 长度 $L = 5\text{mm}$ 。由(11)式计算出 Nd:YVO₄ 晶体内部温度场三维分布如图 3 所示, 等温线如图 4 所示。

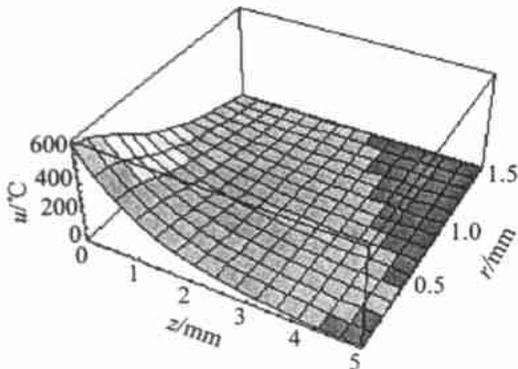


Fig. 3 Three dimension diagram of single end pumped Nd:YVO₄ crystal interior temperature field distribution

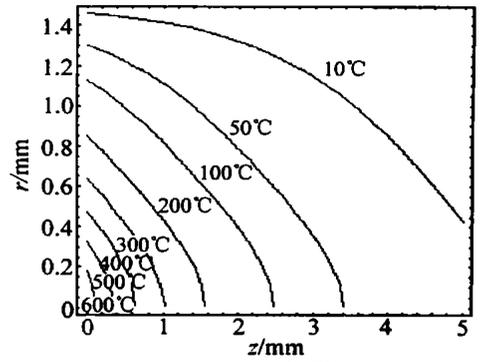


Fig. 4 Isotherm diagram of single end pumped Nd:YVO₄ crystal interior temperature field distribution

从图 3、图 4 中可以看出, 激光晶体入射端面轴附近温度最高, 后端面温升不大。

(2) 几种掺 Nd³⁺ 激光晶体端面温度场比较图。上述条件不变, 利用(11)式计算出掺 Nd³⁺ 激光晶体端面 ($z = 0$) 温度场如图 5 所示。

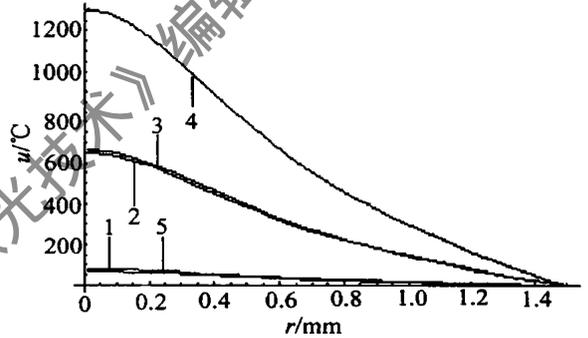


Fig. 5 Comparison diagram of entrance surface temperature fields of five kinds of Nd³⁺ doped laser crystals

激光晶体内部温度场主要取决于晶体吸收系数的大小(单位时间产生热量的多少)和热导率(单位时间导出热量的多少)。从图 5 可以看出, Nd:KGW 晶体在相同条件下, 产生的温度场最高, 虽然它比 Nd:GdVO₄ 晶体的吸收系数小 1 倍左右, 但是它的热导率比 Nd:GdVO₄ 晶体小 5 倍左右, 它应该在低泵浦功率下应用, 以防过热。

(3) 掺 Nd³⁺ 激光晶体端面热形变对比图。由于激光晶体后半部温升很小, 则可以忽略激光晶体后端面的热形变, 即假设激光晶体后端面无热位移。上述条件不变, 利用(12)式计算出几种掺 Nd³⁺ 激光晶体入射端面 ($z = 0$) 热形变场如图 6 所示。

从图 6 中可以看出激光晶体入射端面热形变场近似高斯分布。激光晶体入射端面热形变主要取决于晶体的温度场和晶体的热膨胀系数。从图 6 看出 Nd:KGW 晶体在相同条件下, 产生的热形变最大, 主要是它的温升最高, 热膨胀系数和其它晶体的近似相同。

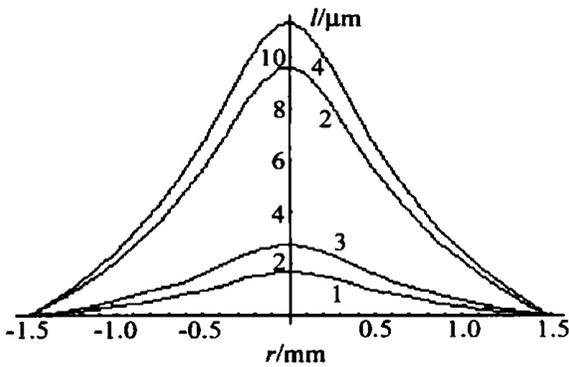


Fig. 6 Comparison diagram of entrance surface thermal distortion of four kinds of Nd^{3+} doped laser crystals

(4) 光强衰减分布图。入射光在晶体内部按指数形式衰减:

$$I(r, z) = I(r, 0) \cdot e^{-\beta z} \quad (13)$$

图7给出了泵浦光在4种晶体内部光强衰减分布图。

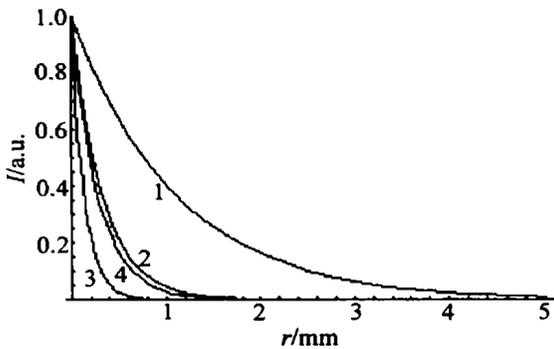


Fig. 7 Intensity reduction distribution diagram of pumping light in four kinds of Nd^{3+} doped laser crystals

入射光在晶体内部光强衰减取决于晶体的吸收系数。从图中可以看出: 由于2, 3, 4号晶体的吸收系数大, 入射光进入晶体后, 很快被吸收。

(5) 掺 Nd^{3+} 激光晶体的透射率。透射晶体后的光强和入射光光强之比为晶体的透射率。表2中给出了激光晶体长度 $L = 5\text{mm}$ 时5种晶体的透射率。

Table 2 Transparency coefficient of five type Nd ion doped laser crystals

	1	2	3	4	5
transparency coefficient	1.1×10^{-2}	1.5×10^{-7}	8.5×10^{-17}	1.5×10^{-8}	6.7×10^{-3}

晶体透射率主要取决于晶体的吸收系数和晶体的长度。晶体透射率的大小反映了激光晶体对泵浦光吸收利用的程度, 晶体透射率过大说明有部分泵浦光能量透射出激光晶体, 未被吸收利用。晶体透射率过小, 说明激光晶体过长, 有部分激光晶体未使用。在设计激光器时, 可参考透射率选用激光晶体长度。

4 总结与分析

分析了在单端泵浦形式下, 掺 Nd^{3+} 离子激光晶体实际情况, 利用半解析热分析方法, 得出了晶体内部温度场和晶体端面热形变场的半解析数值解。计算并绘制了典型激光晶体在单端泵浦形式下的温度分布图, 定量对比分析了多种典型激光晶体在相同条件下产生的温度场和端面热形变场及其产生差异的原因, 也分析计算了泵浦光在几种典型掺 Nd^{3+} 离子激光晶体中吸收情况和透射率情况。

从分析得出, 单端泵浦方式势必会造成激光晶体温度场在轴方向上不对称, 两个端面热形变场严重不对称, 引起较严重的热效应, 制约着激光器的高功率输出, 影响输出激光的品质。本文中所得出的结果可以为发展二极管泵浦全固态激光器的稳定设计提供基础理论依据。

参考文献

- [1] 吕百达. 固体激光器件. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 203~241.
- [2] FAN J Y, BYER R L. IEEE J Q E, 1988, 24(6): 895~912.
- [3] FARRUKH U O, BUONCRISTIANI A M, BYVIK C E *et al.* IEEE J Q E, 1988, 24(11): 2253~2263.
- [4] COUSINS A K. IEEE J Q E, 1992, 28(4): 1057~1069.
- [5] CHEN Y F, HUANG T M, KAO C F *et al.* IEEE J Q E, 1997, 33(8): 1424~1429.
- [6] 余锦. 强激光与粒子束, 2000, 12(1): 27~31.
- [7] JOHN N F, MENGÜC M P, TAGAVI K A *et al.* IEEE Trans Components, Hybrids & Manufacturing Technol, 1992, 15(5): 675~684.
- [8] 史彭, 陈雅妮, 王占民. 电子学报, 2001, 29(8): 1121~1122.
- [9] 史彭, 杜磊. 电子学报, 1997, 26(8): 88~89.
- [10] BAI J T, CHEN G F. Optic & Laser Technology, 2002, 34: 333~336.
- [11] OZYGUS B, ERHARD J A P L, 1995, 67(10): 1361~1362.
- [12] INNOCENZI M E, YURA H T, FRUCHER C L *et al.* A P L, 1990, 56(19): 1831~1833.
- [13] HENRICH B, BEIGANG R. Opt Commun, 1997, 135: 300~304.
- [14] YEITTE M. Neodymium doped yttrium vanadate. <http://www.sino.cera.com/cyv.html>, 2002-06-14.
- [15] LI C, SONG J, SHEN D *et al.* Appl Phys, 2000, B70: 471~474.
- [16] SDIN Corotech Crystal Co. Neodymium doped gadolinium orthovanadate single crystal. <http://www.corotech.com.cn>, 2003-05-28.
- [17] KARLITSCHKE P, HILLRICH G. Appl Phys, 1997, B64: 21~24.
- [18] DEMIDOVICH A A, SHKADAREVICH A P, DANAILOV M B *et al.* Appl Phys, 1998, B67: 11~15.
- [19] STANKOV A. Eodymium-doped potassium-gadolinium tungstate. http://www.alpha-las.com/products/laser_crystals/kgw.html, 2001-08-12.
- [20] PFISTER C, WEBER R, WEBER H P *et al.* IEEE J Q E, 1994, 30(7): 1605~1615.