

文章编号: 1001-3806(2009)04-0337-03

LD角抽运Nd:YAG/YAG复合板条激光器热焦距分析

巩马理,王生利,柳强,黄磊,高松,张海涛

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心 摩擦学国家重点实验室,北京100084)

摘要: 为了研究LD角抽运复合板条激光器的热焦距情况,采用有限元方法求解了LD角抽运Nd:YAG/YAG复合板条晶体的热焦距,得到了该晶体的理论温度分布模型和理论热焦距。此外,采用CCD探测法在未出激光的条件下测量了该复合晶体,得到了实验热焦距,并对实验结果和理论计算结果进行了比较。实验中得到的热焦距变化规律与理论计算基本一致。结果表明,这为进一步改善LD角抽运复合板条激光器输出光束质量,以及提高输出功率提供了必要的理论基础。

关键词: 激光器;角抽运固体激光器;热焦距;CCD探测法;复合板条激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.001

Analysis of thermal focal length in LD corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab lasers

GONG Ma-li, WANG Sheng-li, LIU Qiang, HUANG Lei, GAO Song, ZHANG Hai-tao

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to study the thermal focal length in LD corner-pumped composite slab lasers more clearly, the theoretical temperature distribution and the thermal focal length in a LD corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab were calculated with the finite-element method. Moreover, the thermal focal length of the slab was measured with CCD under non-lasing conditions. A comparison between the theoretical results and the experimental results was made. The result showed that the experimental thermal focal length transformation was in accordance with the theoretical computation.

Key words: lasers; corner-pumped solid-state lasers; thermal focal length; CCD detecting; composite laser

引言

角抽运作为一种全新的抽运方式,在2002年由作者所在实验室的课题小组提出^[1],现在已经实现了最大输出功率为1050W^[2]的连续输出。然而,随着抽运功率的提高,晶体内部会产生大量的热,同时,由于晶体受到冷却装置致冷的限制,晶体内部的温度分布会发生变化,从而引起热光效应^[3],包括热透镜效应和热致双折射效应等,这些热效应是影响激光输出功率和光束质量的重要因素。SHENG等人^[4]对角抽运单晶体固体激光器的热焦距进行了初步分析,但是在计算温度分布时对计算模型进行了1维简化,这本身就引进了很大的误差;XUE等人^[5]对角抽运Yb:YAG/YAG复合板条激光器的热焦距进行了进一步的分析,但仅限于解析解的形式,只适用于特定的边界条件,应用范

围有限。另外,其实验方案也存在有一定的局限性^[6],导致计算结果与实验结果相差也比较大。因此,对角抽运复合板条激光器热焦距的进一步研究就具有十分重要的意义。

笔者在前人研究的基础上,采用有限元解法,给出了Nd:YAG/YAG复合板条晶体内部较为详细的温度分布模型,同时,根据该计算结果,得出晶体在宽度和厚度方向的热焦距。最后,在未出激光的条件下,采用CCD光束分析仪直接测量出探测光束的 M^2 因子及束腰大小,根据混合模类高斯光束的矩阵传输理论计算出复合晶体的实验热焦距。实验结果和理论计算基本相符,很好地验证了理论分析的正确性。

1 理论计算模型及结果分析

1.1 温度分布计算模型

复合板条晶体结构如图1所示。板条采用中心掺杂Nd:YAG、两边键合非掺杂YAG的复合结构,抽运光从晶体的楔形角耦合进去,这样能保证抽运光在板条中心被充分吸收,可以降低热透镜效应和应力双折射效应,避免板条变形,进而保证能够达到更高的抽运

作者简介:巩马理(1959-),男,教授,主要从事光电子与激光技术方面的研究。

E-mail:gongml@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2008-03-12;收到修改稿日期:2008-11-10

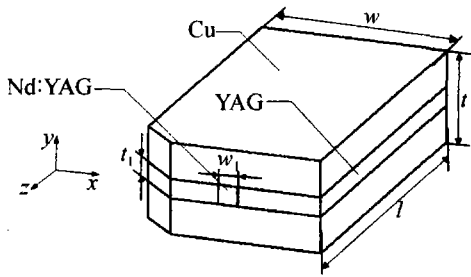


Fig. 1 Structure of the Nd:YAG/YAG composite slab

功率密度和更好的抽运均匀性。中心 Nd:YAG 的尺寸为宽度 w_1 、厚度 t_1 和长度 l ，Nd:YAG/YAG 的总尺寸为宽度 w 、厚度 t_1 和长度 l 。整体计算模型(包含冷却块紫铜)的尺寸为宽度 w 、厚度 t 和长度 l 。定义板条中心为坐标原点，宽度、厚度和长度方向分别定义为 x 轴、 y 轴和 z 轴。复合晶体用铜箔包紧置于紫铜块中，并通过循环水进行冷却。

稳态情况下复合板条晶体的热传导方程为：

$$\kappa \nabla^2 T = \begin{cases} -q(x, y, z), & (-w_1/2 \leq x \leq w_1/2) \\ 0, & (-w/2 \leq x \leq -w_1/2, w_1/2 \leq x \leq w/2) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ ； κ 为晶体热导率，在下面分析中，由于晶体温度在室温范围内变化，可以忽略温度变化对热导率的影响^[7]； $q(x, y, z)$ 是晶体的热功率密度，且有：

$$q(x, y, z) = \frac{P_e \eta_h}{w_1 \times t_1 \times l} \quad (2)$$

式中， P_e 是有效抽运功率， η_h 为热转换系数，在未出激光的情况下测得^[8]： $\eta_h = 0.49$ 。

根据该模型的冷却条件：晶体产生的热量主要通过热沉进行传导并由循环流动的恒温冷却水带走。忽略端面和侧面的空气对流散热，则边界条件为：

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x}(\pm w/2, y, z) = 0 \\ \pm \frac{\partial T}{\partial y}(x, \pm t/2, z) = h(T_c - T|_{y=\pm t/2}) \\ \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, \pm l/2) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中， T_c 是冷却水的温度，是一个恒定值，它的大小只影响晶体内部温度的绝对值，不改变晶体内部的温度分布。 h 是表面热对流传热系数。在假设 YAG 与 Nd:YAG 热接触良好的情况下有：温度分布函数 $T(x, y, z)$ 和 1 阶偏导函数 $\partial T/\partial x$ 在 $x = \pm w_1/2$ 处连续^[5]。

1.2 热焦距计算模型

在角抽运复合板条激光器中，端面效应对晶体热焦距变化的影响可以忽略^[5]。主要考虑由温度梯度变化和热应变光弹性变化导致的热焦距变化。对于沿

z 方向直线传播的光束，其光程由于热透镜效应的改变量为^[9]：

$$\begin{cases} \psi_x(x, y) = \left(\frac{dn}{dT}\right)_{\text{slab}} \int_{-l/2}^{l/2} T(x, y, z) dz - \int_{-l/2}^{l/2} [B_{//} \sigma_{xx} + B_{\perp} (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] dz \\ \psi_y(x, y) = \left(\frac{dn}{dT}\right)_{\text{slab}} \int_{-l/2}^{l/2} T(x, y, z) dz - \int_{-l/2}^{l/2} [B_{//} \sigma_{yy} + B_{\perp} (\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] dz \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\psi_i (i = x, y)$ 是 i 方向上的光程差； $(dn/dT)_{\text{slab}}$ 为热色散系数，在这里有： $(dn/dT)_{\text{slab}} = dn/dT + E\alpha_i B_{\perp}$ ，其中 dn/dT 为晶体固有热色散系数； E 为杨氏弹性模量； α_i 为热膨胀系数； B_{\perp} 为垂直压光系数； $\sigma_{ii} (i = x, y, z)$ 是 i 方向的热应力，且有^[9]：

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = [E\alpha_i / (1 - \nu)] T(x, y, z) \\ \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - E\alpha_i T(x, y, z) \end{cases} \quad (5)$$

式中， ν 为泊松比。

热焦距与光程由于热透镜效应改变量有如下关系^[10]：

$$\begin{cases} \psi(j) = \psi_0 + \psi_1 j + \psi_2 j^2 + \dots + \psi_n j^n \dots, (j = x, y) \\ f_l = -1 / (2\psi_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中， $\psi(j) (j = x, y)$ 为 j 方向上的光程差； ψ_2 为 j 方向的 2 次项系数，与热透镜效应有关。 f_l 为热透镜效应的等效热焦距。

1.3 计算结果及其分析

基于上述理论分析，采用如图 1 所示的计算模型。其中 Nd:YAG 的掺杂 Nd^{3+} 的原子数分数为 0.01， $l = 14\text{mm}$ ， $w_1 = 0.8\text{mm}$ ， $t_1 = 0.8\text{mm}$ 。模型整体尺寸为： $w = 7.8\text{mm}$ ， $t = 6.8\text{mm}$ 。其中冷却水的温度为 $T_c = 283\text{K}$ ，假设水的表面热对流传热系数为： $h = 15000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。其它参量见表 1。

Table 1 Physical properties of Nd:YAG

symbol	description	value
$\kappa^{[11]}$	thermal conductivity	$10.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
E	Young modulus	$3.10 \times 10^{11} \text{ Pa}$
ν	Poisson ratio	0.3
dn/dT	refractive index temperature coefficient	$7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
B_{\perp}	perpendicular stress-optic coefficient	0.34×10^{-12}
$B_{//}$	parallel stress-optic coefficient	-0.91×10^{-12}
α_i	thermal expansion coefficient	$8.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

图 2 中给出了理论计算的温度分布模型： $T(x, 0, 0)$ ， $T(0, y, 0)$ ， $T(0, 0, z)$ 。该结果是在有效抽运功率为 $P_e = 25\text{W}$ 条件下得到的。从图 2 可以看出，在宽度 x 方向和厚度 y 方向温度变化比较大，会出现热透镜

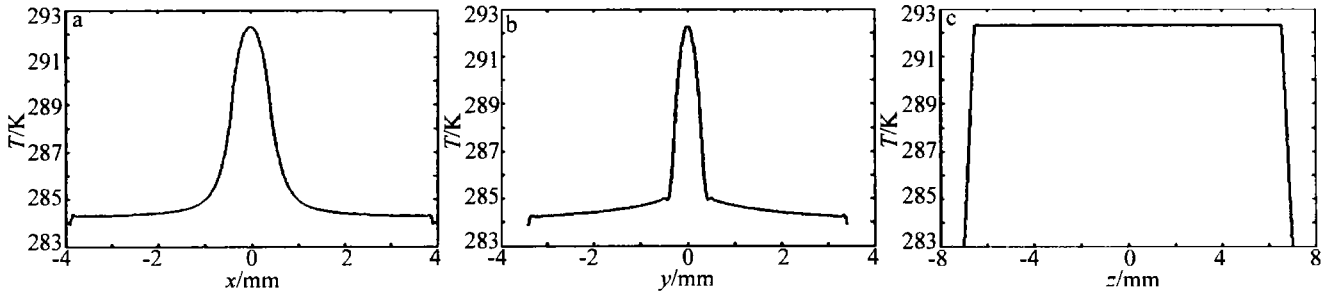


Fig. 2 Calculated temperature distribution for an effective diode-pumped power $P_e = 25\text{ W}$ (non-lasing)
 a— $T(x, 0, 0)$ b— $T(0, y, 0)$ c— $T(0, 0, z)$

效应。而沿长度 z 方向温度分布相当稳定,只在边界部分有比较明显的变化。

图 3 中给出了相应温度分布的热透镜焦距。通

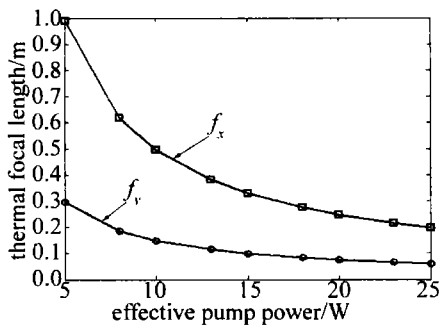


Fig. 3 Thermal focal length dependence on effective pump power (non-lasing)

过图 3 可以明显看到:随着有效抽运功率的增大,热焦距都迅速地变小,即有效抽运功率越高,热透镜效应就越明显。同时也可以发现:在相同抽运功率条件下,厚度方向的热焦距要比宽度方向的小很多。这主要是由于以下两个因素造成的:(1)宽度方向的热物理参量基本相同,温度梯度变化比较小,而厚度方向热物理参量变化比较大;(2)厚度方向采用热沉进行冷却,晶体产生的热量大都通过热沉进行传导。这两个因素共同导致了厚度方向较大的温度梯度变化,进而产生较为严重的热聚焦效应,相应的热焦距就比较小。

2 实验装置以及实验结果分析

实验装置如图 4 所示。在以往的晶体热焦距测量

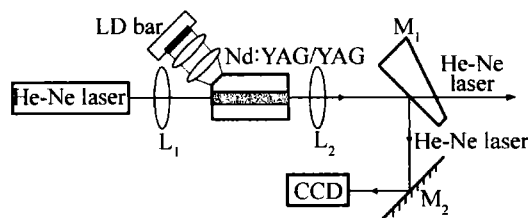


Fig. 4 Measurement setup of thermal focal length (non-lasing)

方案中,实验原理通常都是利用晶体产生的激光进行相关测量和计算,实际上这类方案有两大缺点:(1)晶体在低功率抽运时,热透镜效应不是很明显;(2)由于实验装置本身大小有限的缘故,会产生衍射现象,这就

给读出结果引进了不必要的误差。为此,在未出激光的条件下(热透镜效应更为明显),采用 He-Ne 光作为探测光束进行测量及相关计算,这样就能得到相对准确的结果。

实验原理是:带快轴准直的 LD bar 发出的探测光经过两个带水平方向焦距的柱面镜后耦合到复合晶体中;透镜 L_1 、透镜 L_2 用于调节探测光束的光斑大小; M_1 是楔型分光镜; M_2 是全反平面镜。采用 CCD 光束分析仪 (Spiricon M2-200) 直接测量出探测光束的 M^2 因子以及束腰大小,根据 ABCD 矩阵传输理论^[3],可以计算出相应基模的束腰大小,进而可以求得晶体的热焦距。整个计算过程假定晶体为一薄透镜^[7],由于推导过程比较繁琐,在此略去。

实验过程中晶体的掺杂 Nd^{3+} 原子数分数为 0.01,探测光束的波长为 $\lambda_0 = 632.8\text{ nm}$ 。抽运源是一个 LD 激光器,最大输出功率为 50W,输出激光波长为 808nm。透镜 L_1 距离晶体的前端面为 143mm,透镜 L_2 距离晶体后端面为 61mm,且 L_2 的焦距为 $f_2 = 78.85\text{ mm}$, L_2 距离光束分析仪镜面的距离为 995mm。根据上述参量以及实验原理可以求出实验中所得热焦距,如图 5 所示,给出的是实验结果与理论计算结果的比较。

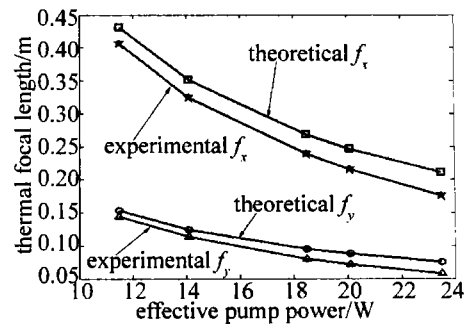


Fig. 5 Dependence of theoretical and experimental thermal focal length on effective pump power (non-lasing)

通过图 5 可以发现,实验中所得结果比理论计算结果要小一点。这主要是因为理论计算过程中忽略了由于端面变形导致的热焦距变化,如果把把这个因素考虑进去,那么理论结果将会与实验所得结果更加一致。

(下转第 343 页)

光的散射损耗等因素)组合钽玻璃饱和吸收系统对噪声信号的处理结果。

前后对比的结果来看,组合钽玻璃饱和吸收系统,对高达 10^{18} W/cm²的主激光脉冲几乎无损耗通过(见图3),而对 10^5 W/cm²量级的噪声信号达到几乎完全吸收(见图4),使激光信噪比大幅度提高。

3 结论

利用速率方程,推导了超短脉冲激光入射下钽玻璃的透过率与入射激光光强之间的关系。并模拟计算了组合钽玻璃系统对超短脉冲激光中噪声信号的吸收过程,结果表明,利用噪声信号与主激光脉冲在频谱上的差异,组合钽玻璃的饱和吸收系统能有效抑制800nm超短脉冲激光中的噪声信号,使得该系统具有实际应用的可能。而钽玻璃的诸多优点(价格便宜、初始透过率任意可调、合适的饱和光强等)也使该系统具有较大实际应用价值。而且,不同的钽玻璃组合还具有吸收中心波长可调谐的特点。对于任意激光工作介质,只要具有合适的上能级寿命、吸收截面、掺杂浓度等,对与抽运吸收带相匹配的激光都具有饱和吸收性,都具有用做饱和吸收体的可能。

参考文献

[1] KEOCHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002: 442-448 (in Chinese).

- [2] GAN F X, DENG P Zh. Laser material [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994: 322-342 (in Chinese).
- [3] OUYANG B, DING Y H, WAN X K, *et al.* Saturable absorption of Cr:YAG and its performance as passive Q-switches [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(12): 1665-1669 (in Chinese).
- [4] HE Sh B, YU H W, WANG Ch Ch, *et al.* Research of measurement of non-activity absorption coefficient in phosphate laser glass [J]. Laser Technology, 2003, 27(1): 62-64 (in Chinese).
- [5] LENG Y X, LIN L H, OUYANG B. Absorption of excited state of Cr⁴⁺:YAG crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(2): 225-227 (in Chinese).
- [6] BURSHTEIN Z, BLAU P, KALISKY Y, *et al.* Excited-state absorption studies of Cr⁴⁺ ions in several garnet host crystals [J]. Quantum Electronics, 1998, 34(2): 292-298.
- [7] WAN X K, LIN L H, OUYANG B. Excited state absorption saturation of Cr⁴⁺:YAG and its passive Q-switch performance [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(11): 1567-1570 (in Chinese).
- [8] CAIRD J A. Passive optical losses in laser glass [C]//UCRL-2100012 LLNL. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1989: 111.
- [9] WANG Q Y, ZHANG W L, WANG Y. Suppress the amplified spontaneous emission of femtosecond chirp pulse laser in the amplification [J]. Science in China, 2000, A30(5): 456-462 (in Chinese).
- [10] WANG Ch Ch, YUAN X D, ZHENG W G, *et al.* Recent advances of XC II high power solid-state laser facility [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 469-471 (in Chinese).
- [11] GAO J Ch, ZHU Ch H, LI Zh J. Study on the thermal effect and the optical pump limit about solid-state laser medium [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 271-274 (in Chinese).
- [12] LI Ch R, SONG L Ch, LI S F, *et al.* Measurement for net gain of Er-doped/Yb:Er-codoped silicate glass with high concentrations [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 535-537 (in Chinese).

(上接第339页)

3 结论

采用有限元解法求解了LD角抽运Nd:YAG/YAG复合板条晶体的热焦距,给出了晶体内部的温度分布模型,同时计算了相应温度分布情况下的热焦距。最后,采用CCD探测法在未出激光条件下测量了该复合晶体的热焦距。实验结果与理论计算结果基本相符,有力验证了理论分析的正确性。这些为进一步改善LD角抽运复合板条激光器的输出光束质量,以及提高输出功率提供了必要的理论基础。

参考文献

[1] GONG M L, LI Ch, LIU Q, *et al.* Corner pumping method for slab geometry lasers and solid-state lasing gain modules: China, 02129485. 2 [P]. 2002-08-23 (in Chinese).

[2] LIU Q, GONG M L, LU F Y, *et al.* Corner-pumped Yb:yttrium aluminum garnet slab emitted up to 1kW [J]. A P L, 2006, 88(10): 101113/1-101113/3.

[3] CHENAIS S, BALEMBOIS F, DRUON F, *et al.* Thermal lensing in diode-pumped ytterbium laser—part I: theoretical analysis and

- wave-front measurements [J]. IEEE J Q E, 2004, 40(9): 1217-1234.
- [4] SHENG D Ch, GONG M L, LIU Q, *et al.* Analysis of thermal effects in corner-pumped slab solid-state lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 86-89 (in Chinese).
- [5] XUE H Zh, LU F Y, XUE M, *et al.* Resonator design and beam quality measurement in Yb:YAG slab lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30(6): 585-588 (in Chinese).
- [6] AMARANDE S A, DAMZEN M J. Measurement of the thermal lens of grazing-incidence diode-pumped Nd:YVO₄ laser amplifier [J]. Opt Commun, 2006, 265(1): 306-313.
- [7] BROWN D C. Ultrahigh-average-power diode-pumped Nd:YAG and Yb:YAG lasers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(5): 861-873.
- [8] PENG X Y, XU L, ASUNDI A. Power scaling of diode-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. IEEE J Q E, 2002, 38(9): 1291-1299.
- [9] KANE T J, EGGLESTON J M, BYER R L. The slab geometry laser—part II: thermal effects in a finite slab [J]. IEEE J Q E, 1985, 21(8): 1195-1210.
- [10] BERMUDEZ G J C, PINTO-ROBLEDO V J, KIRYANOV A V, *et al.* The thermo-lensing effect in a grazing incidence diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. Opt Commun, 2002, 210(1/2): 75-82.
- [11] SATO Y, TAIRA T. The studies of thermal conductivity in GdVO₄, YVO₄, and Y₃Al₅O₁₂ measured by quasi-one-dimensional flash method [J]. Optics Express, 2006, 14(22): 10528-10536.