

角抽运复合板条激光器热焦距计算方法

刘 欢¹ 李青华^{1,2,3} 高 松^{1,4} 巩马理^{1*}

¹清华大学精密仪器与机械学系摩擦学国家重点实验室激光与光子技术研究室, 北京 100084
²清华大学工程物理系, 北京 100084
³中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900
⁴中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 针对角抽运复合板条激光器提出了一种新颖的热焦距计算方法。考虑到传统计算方法中一般采用均匀分布或指数衰减分布来表征热源分布, 计算出的热焦距与实验值相差较大, 不利于腔型设计的情况, 采用 Tracepro 光学追迹软件追迹抽运光被耦合进入板条角面后, 经过多次全反射在激光介质内传播的全过程, 得到激光介质内热源的精确分布, 求解稳态温度分布, 再求出热透镜焦距。采用新方法计算出的热焦距与实验结果吻合良好, 精确度明显高于传统方法。新方法简单实用, 普适性强, 可广泛应用于其他各类常见固体激光器。

关键词 激光器; 固体激光器; 角抽运; 复合板条; 热焦距; 二极管抽运

中图分类号 T248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0602008

Theoretical Study on Thermal Focal Length of Corner-Pumped Lasers

Liu Huan¹ Li Qinghua^{1,2,3} Gao Song^{1,4} Gong Mali¹

¹State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

²Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

³Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

⁴Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract A novel method to calculate the thermal focal length of corner-pumped slab lasers is proposed. Traditional methods generally use uniform distribution or exponential decay distribution to characterize the heat distribution, and the difference between calculation results and the experimental value is not small which is against the further cavity design. Tracepro software is used to trace the pump light in the medium so as to get the accurate heat distribution within the gain medium, and then the temperature distribution and thermal focal length is calculated. The calculation results of this method are according with experiments much better than those of the traditional. This method is of general applicability, and is especially suitable for lasers with novel pump ways and special shape gain media.

Key words lasers; solid-state laser; corner-pumped; composite slab; thermal focal length; diode-pumped

OCIS codes 140.3480; 140.3530; 140.3580

1 引 言

角抽运是一种新型的激光二极管(LD)抽运固体激光器的方案,它具有抽运效率高,抽运吸收均匀

的特点。它由清华大学精仪系光电子与激光实验室于2002年提出,并拥有设计专利^[1,2]。其工作原理是,LD抽运光经光学器件整形耦合,从板条晶体的

收稿日期: 2011-12-12; 收到修改稿日期: 2012-03-07

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030208)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)(20110002120054)资助课题。

作者简介: 刘 欢(1980—),女,博士,助理研究员,主要从事全固态激光技术方面的研究。

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

* 通信联系人。E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

切角面进入板条内部,光线在整个板条内进行全反射传播,但只有中间掺杂区域吸收抽运光,从而保证了更高的抽运功率密度和更好的吸收均匀性。用上下两个大面进行冷却,保证了高效率的热管理。采用角抽运方式已实现了 Yb:YAG 板条固体激光器 1030 nm 1050 W 多模连续输出^[3]和 Nd:YAG 板条固体激光器 1064 nm 10 W 级基模输出^[4]。

对于角抽运复合板条固体激光器而言,若要实现更高功率的单模激光输出,需对激光腔进行合理设计,而热焦距计算准确与否是影响激光腔设计的重要因素。本文针对角抽运这一崭新的抽运方式,给出了一种能较精确计算其热焦距的方法。该方法不仅适用于分析角抽运复合板条固体激光器的热效应,还特别适用于分析一些抽运方式新颖、激光介质结构特殊的固体激光器的热效应。

2 理论分析

激光增益介质吸收抽运光后,并非把所有的能量都转化为输出激光的能量,而是有一部分能量由于量子亏损、荧光猝灭以及俄歇复合效应等以热的形式扩散到介质中。热量沉积带来的效应包括热透镜效应、热致应力双折射和退偏效应,统称热效应。其中热透镜效应由以下两部分构成:由于温度分布不均和热应力的存在,介质折射率发生改变,使激光介质变成类透镜介质;由于晶体端面受热发生形变,亦产生光程差。但在角抽运复合板条激光器中,后者对热透镜效应的贡献较小,可以忽略^[5],故只考虑介质折射率发生变化引起的热透镜效应。对于 x 和 y 方向偏振的光波,在其总路径上的光程差表示为^[6]

$$\left\{ \begin{aligned} \Psi_x(x,y) &= \left(\frac{dn}{dT}\right)_{\text{slab}} \int_s T(x,y,z) ds - \int_s [B_{//} \sigma_{xx} + B_{\perp} (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] ds \\ \Psi_y(x,y) &= \left(\frac{dn}{dT}\right)_{\text{slab}} \int_s T(x,y,z) ds - \int_s [B_{\perp} \sigma_{yy} + B_{//} (\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] ds \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中 s 代表沟波路径,热色散系数为 $(dn/dT)_{\text{slab}} = dn/dT + E_{\alpha T} B_{\perp}$, dn/dT 为固有热色散系数, B_{\perp} 为垂直弹光系数, $B_{//}$ 为平行弹光系数, σ 为应力。把光程差进行多项式拟合,其二次项系数的负倒数即热焦距^[7]。由(1)式知,求出介质的三维温度分布是关键。故需求解热传导方程

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -q(x,y,z), \quad (2)$$

式中 k 为热传导系数, $q(x,y,z)$ 为热源功率密度分布,其在非掺杂区为 0。对于角抽运复合板条激光器,其边界条件为板条上下两个大面采用水冷方式,强迫对流换热系数为 15000 W/(m²·K),其他面边界条件均为绝热。当内热源 $q(x,y,z)$ 和边界条件均确定以后,就可以建立有限元差分方程进行数值迭代,求出温度场的稳态分布解。内热源是热透镜效应产生的根源,相同平均功率密度下,热源分布决定了热焦距的大小。考虑到在传统的计算方法中,热源分布一般采用与位置无关的均匀分布^[7~10],或简单的指数衰减分布^[11~15],这样的简化会造成计算出的温度分布不够准确,进而导致热焦距计算不够准确。为了克服传统计算中的这一缺点,首先采用 Tracepro 光学追迹软件追迹抽运光被耦合进入板条角面后,经过多次全反射在激光介质内传播的全过程,得到激光介质内热源的精确分布,然后求解稳态温度分布,最后求出热焦距。

3 理论与实验结果对比分析

对单角抽运 Nd:YAG/YAG 复合板条激光器的热焦距进行计算。板条尺寸为 $L=14$ mm, $W_1=0.8$ mm, $W_2=3.5$ mm, $W_3=3$ mm, $H=0.8$ mm,切角 45°,如图 1 所示。

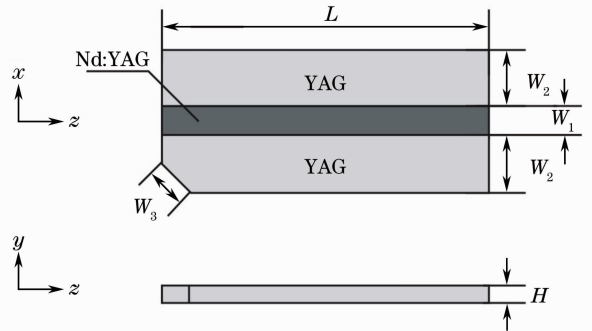


图 1 Nd:YAG/YAG 复合板条示意图
Fig. 1 Schematic diagram of Nd:YAG/YAG composite slab

角抽运 Nd:YAG/YAG 复合板条激光器实验装置如图 2 所示。实验中采用的 808 nm LD Bar 的连续输出功率最高为 50 W,发光面积为 10 mm×0.7 mm,且有一定的发散角,而复合板条切角面的尺寸为 3 mm×0.8 mm,因此需采用光学耦合系统对抽运光进行压缩整形。根据实验中采用的 LD Bar 的各项参数,首先利用 Tracepro 光学追迹软件

设计合适的光学耦合系统。理论分析结果表明,当在快轴方向采用一个焦距为 12.7 mm 的柱面透镜,在慢轴方向采用两个焦距为 30 mm 的柱面透镜时,通过调整各个柱面透镜的位置,可以把抽运光完全耦合到激光介质。图 3 所示的是采用上述光学耦合系统后,抽运光在复合板条入射面上的光斑大小以及功率密度分布,其中抽运光光斑大小约为 2.1 mm×0.25 mm。将 LD Bar 经过光学耦合系统后的光线作为光源,追迹抽运光被耦合进入板条角面后经过多次全反射在板条内传播的全过程。对于掺杂原子数分数 1.0% 的 Nd:YAG/YAG 复合板条,设定掺杂区吸收系数为 0.06 mm⁻¹,非掺杂区吸收系数为 0。追迹后得到抽运光吸收分布如图 4 所示,可见并非传统计算中假设的均匀分布或指

数衰减分布。利用 Tracepro 光学追迹软件,可将设计光学耦合器件与追迹抽运光在板条内的吸收这两部分工作衔接起来,高效而方便。

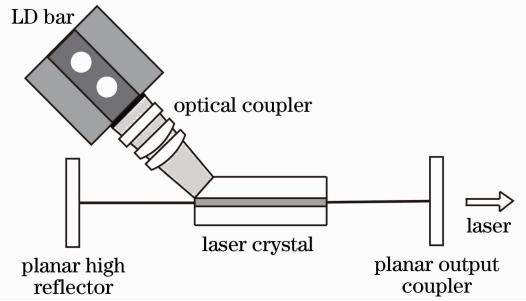


图 2 LD bar 角抽运 Nd:YAG/YAG 复合板条激光器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab laser

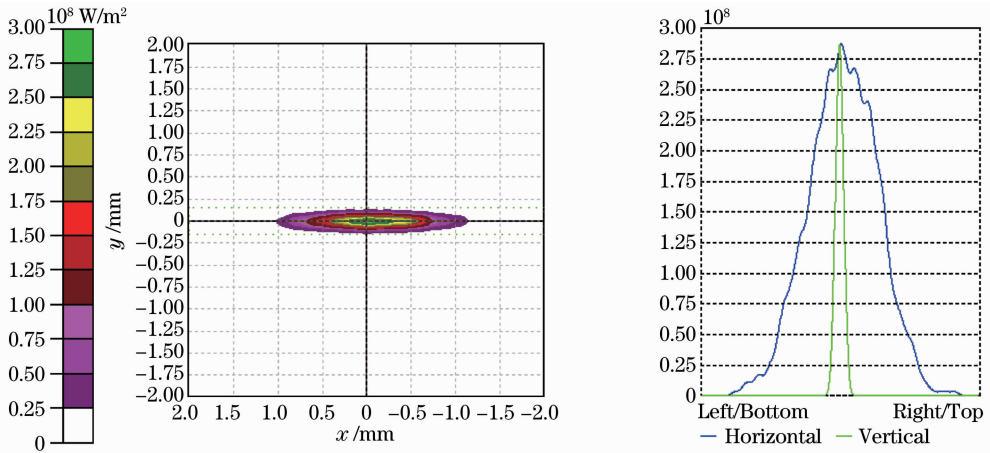


图 3 抽运光经过光学耦合系统整形后在板条入射面的光斑形状

Fig. 3 Facular shape of pumping light on the incident plane of the slab crystal through the optical coupler

将抽运光吸收分布数据从 Tracepro 中导出,然后导入 Fluent 软件进行温度场计算。Fluent 是用于计算流体流动和传热问题的程序,它提供的非结构网格生成程序,对相对复杂的几何结构网格生成非常有效,因此对于任意形状激光介质的模拟都适用。在 Fluent 中设定介质热力学属性、热源分布及边界条件后,便可进行热传导方程的数值求解。得到激光介质中温度的稳态分布,如图 5 所示。可见计算结果与均匀发热模型得到的 x 、 y 方向温度对称分布, z 方向温度不变的温度分布差异较大。导出 x 和 y 方向中间面的温度分布,带入光程求解(1)式得到 x 和 y 方向焦距值。

角抽运 Nd:YAG/YAG 复合板条激光器热焦距的测量方法如图 6 所示。准直后的 He-Ne 激光依

次经过透镜 1、复合板条、透镜 2,然后用 M^2 测量仪 (Spiricon M^2 -200S) 测量其束腰大小和束腰位置。实验装置中 $d_1 \approx 150$ mm, $d_2 \approx 68$ mm, $d_3 \approx 995$ mm,已知透镜 2 的焦距 $f_2 = 78.85$ mm。当无抽运时,用 M^2 仪器测得 $\omega'_{0x} = 0.4886$ mm, $\omega'_{0y} = 0.5832$ mm,根据 ABCD 矩阵的 q 参数计算,可以反推 He-Ne 激光经过透镜 1 聚焦后 x 和 y 两方向束腰直径为 $\omega_{0x} = 0.1296$ mm, $\omega_{0y} = 0.1100$ mm,皆位于为 $l = 140$ mm 处。由于 ω_0 的大小及其位置均与抽运功率无关,故在后面的测量中可把 ω_0 和 l 当作已知的不变量。改变抽运功率测出对应的 ω'_{0x} 、 ω'_{0y} 、 l'_x 、 l'_y ,根据 ABCD 矩阵的 q 参数运算反推出对应的热透镜焦距,见表 1,其中 P_e 为有效抽运功率。

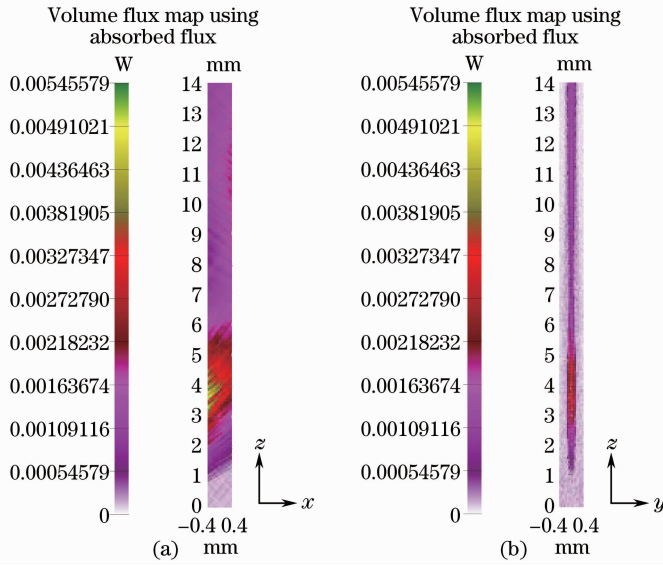


图 4 掺杂区抽运光吸收分布图。(a) xz 平面; (b) yz 平面

Fig. 4 Pump light absorption distribution in the doped area. (a) xz plane; (b) yz plane

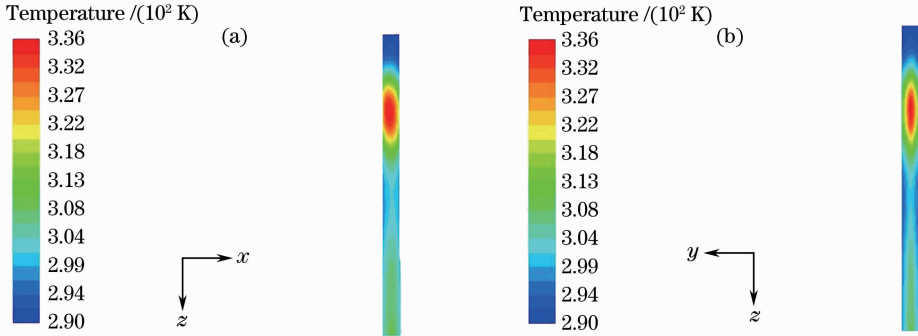


图 5 掺杂区温度分布。(a) xz 平面; (b) yz 平面

Fig. 5 Temperature distribution in the doped area. (a) xz plane; (b) yz plane

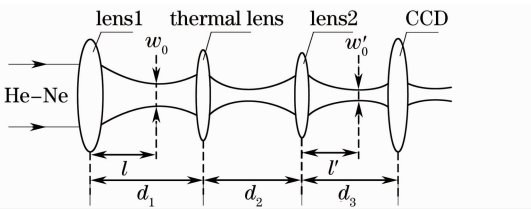


图 6 热焦距测量实验示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup for measuring thermal focal length

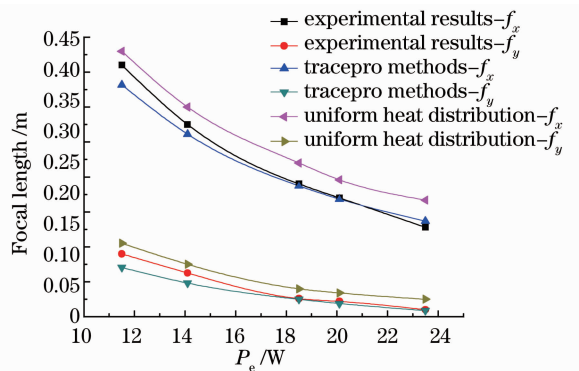


图 7 x 和 y 方向热焦距随有效抽运功率变化曲线
Fig. 7 Thermal focal length in x and y directions versus effective pump power

分别采用均匀发热假设和新方法计算出的热透镜焦距与上述实验测得的热透镜焦距随有效抽运功率(板条吸收的抽运功率)变化的对比曲线如图 7 所示。由图 7 可知采用新方法计算出的板条晶体热焦距与实际测量值非常接近,平均相对误差在 4%,而用均匀热源分布模型得到的焦距平均相对误差在 14%。

4 结 论

针对角抽运复合板条激光器提出了一种简单实用的热焦距计算方法,采用 Tracepro 光学追迹软件

表1 不同有效抽运功率下 x 和 y 方向热焦距实验值Table 1 Experimental results of thermal focal length in x and y directions under various effective pump powers

P_e/W	ω'_{0x}	ω'_{0y}	$d_3-l'_x$	$d_3-l'_y$	f_x/m	f_y/m
11.5	0.2383	0.2679	911.30	916.15	0.411	0.142
14.1	0.2379	0.2624	915.50	923.21	0.325	0.113
18.5	0.2373	0.2588	919.71	937.90	0.239	0.076
20.1	0.2367	0.2519	924.07	941.67	0.221	0.072
23.5	0.2359	0.2493	926.95	957.37	0.178	0.060

得到激光介质内热源精确分布,再进行温度分布和热焦距的计算。计算结果表明,新方法计算出的热焦距与实验结果吻合良好,与实际测量值的平均相对误差仅在4%左右,精准度明显优于传统计算中假设热源呈均匀分布的方法。新方法精确度高、普适性强,对于任意抽运方式任意几何形状激光介质的激光器的热焦距计算均适用,特别适用于分析一些抽运方式新颖、激光介质结构特殊的固体激光器的热效应。

参 考 文 献

- 1 M. Gong, C. Li, Q. Liu *et al.*. Corner-pumping method and gain module for high power slab laser[P]. U. S. Patent, 2008, Patent No. : US 7,388,895 B2
- 2 M. Gong, C. Li, Q. Liu *et al.*. 200-W corner-pumped Yb:YAG slab laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(3): 265~267
- 3 Q. Liu, M. Gong, F. Lu *et al.*. Corner-pumped Yb:yttrium aluminum garnet slab laser emitted up to 1 kW[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(10): 101113
- 4 S. Gao, H. Liu, D. Wang *et al.*. LD bar corner-pumped TEM₀₀ CW composite Nd:YAG laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **17**(24): 21837~21842
- 5 Lu Fuyuan, Gong Mali, Xue Haizhong *et al.*. Analysis on the temperature distribution and thermal effects in corner-pumped slab lasers[J]. *Opt. & Laser in Engng.*, 2007, **45**(1): 43~48
- 6 T. J. Kane, J. M. Eggleston, R. L. Byer. The slab geometry laser—Part II. Thermal effects in a finite slab[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **21**(8): 1195~1210
- 7 Sheng Dacheng, Gong Mali, Liu Qiang *et al.*. Analysis of thermal effects in corner-pumped slab-state lasers[J]. *Laser*

Technology, 2006, **30**(1): 86~89

盛大成, 巩马理, 柳强等. 角抽运板条固体激光器热效应的分析[J]. 激光技术, 2006, **30**(1): 86~89

- 8 G. A. Bufetova, V. F. Seregin, I. A. Shcherbakov *et al.*. Analysis and modeling of a transient thermal lens in pulsed solid-state lasers[J]. *Laser Phys.*, 2000, **10**(2): 424~429
- 9 L. Liu, X. Wang, S. Guo *et al.*. Review of the formula of thermal focal length in side-pumped laser rods [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(5): 1274~1277
- 10 J. Li, M. Guo, W. Fu *et al.*. Heat distortion influence on laser output with different cooling conditions[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(s1): S64~S66
- 11 Y. T. Chang, Y. P. Huang, K. W. Su *et al.*. Comparison of thermal lensing effects between single-end and double-end diffusion-bonded Nd:YVO₄ crystals for ⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2} and ⁴F_{3/2} → ⁴I_{13/2} transitions [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 21155~21160
- 12 F. Song, C. Zhang, X. Ding *et al.*. Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in laser-diode-pumped Nd:YVO₄ lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(12): 2145~2147
- 13 M. P. MacDonald, Th. Graf, J. E. Balmer *et al.*. Reducing thermal lensing in diode-pumped laser rods[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **178**(4-6): 383~393
- 14 Xiang Zhen, Fu Xin, Ge Jianhong. A method for measuring thermal lens focal length of end pumped Nd:GdVO₄ crystals[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3031~3034
- 项震, 付鑫, 葛剑虹. 一种测量端面抽运 Nd:GdVO₄晶体热透镜焦距的方法[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 3031~3034
- 15 Zhu Guangzhi, Zhu Xiao, Zhu Changhong *et al.*. Thermal effect study of LD edge pumped slab lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 37~42
- 朱广志, 朱晓, 朱长虹等. LD侧边抽运板条激光器的热效应[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 37~42

栏目编辑:宋梅梅