

文章编号:1002-2082(2009)01-0139-04

端侧面组合抽运DPL热透镜效应研究

杨爱粉¹, 过振², 王石语², 蔡德芳², 文建国²

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;

2. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 通过数值计算发现: 在端侧面组合抽运DPL中, 晶体横截面上的温度分布接近于轴对称分布, 并且端面抽运功率占有率越大, 温度分布越接近于轴对称分布。将端侧面组合抽运DPL中的热效用等效薄透镜近似, 给出了等效热透镜焦距的计算方法, 分析了组合抽运引起的热透镜效应对基横模振荡光的光斑尺寸和衍射损耗的影响。在总抽运功率一定的情况下, 端面抽运功率占有率的变化对热透镜焦距有一定的影响, 占有率越大, 热透镜焦距越长。提高端面抽运功率占有率, 可在一定程度上减小热透镜效应对振荡光束尺寸和衍射损耗的影响。

关键词: 激光技术; 固体激光器; 激光二极管抽运固体激光器; 端侧面组合抽运; 热透镜效应
中图分类号: TN248.1 文献标志码: A

Thermal lens effect in end-and-side pumped DPL

YANG Ai-fen¹, GUO Zhen², WANG Shi-yu², CAI De-fang², WEN Jian-guo²

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The numerical computation for an end-and-side pumped DPL indicates the temperature distribution in the cross section of the crystal is nearly axis symmetric, and the more proportion the end-pumping power occupies, the more axis symmetric the temperature distribution is. The thermal effect in an end-and-side pumped DPL was approximated with an equivalent lens. The calculation method for the focal length of the thermal lens was introduced. The influence of the thermal lens effect caused by combination pump on the spot radius of the fundamental-transverse-mode oscillation beam and the diffraction loss was analyzed. The proportion variation of the end-pumping power has some influence on the focal length of the thermal lens under a given total pumping power. The influences of the thermal lens effect on the oscillation beam radius and diffraction loss can be reduced by increasing the proportion of the end-pumping power.

Key words: laser technique; solid-state laser; diode-pumped solid-state laser; end-and-side pumping; thermal lens effect

引言

激光二极管端侧面组合抽运是将端面抽运方式和侧面抽运方式综合运用的一种新的抽运方式^[1-2]。采用多向对称分布的大功率激光二极管阵

列侧面抽运, 可显著提高抽运功率, 增加模体积, 实现大功率输出。用多根光纤耦合的激光二极管阵列端面抽运, 可实现抽运光束与腔模的良好匹配, 提高激光输出效率和光束质量, 以获得高重复频率、

高光束质量、窄脉宽、大功率和光束质量可控制的激光输出。笔者在文献[1]中首次提出了激光二极管端侧面组合抽运DPL方案,给出了抽运结构,建立了抽运光强分布模型,理论分析组合抽运对振荡模式和输出激光束质量的控制作用,并进行了相关实验研究。在文献[2]中给出一组端侧面组合抽运DPL声光调Q实验结果,依据调Q速率方程,理论分析组合抽运光空间分布对调Q脉冲特性的影响,并进行了数值计算,计算结果与实验结果一致。

热效应研究是DPL研究的一项重要内容,抽运光引起的热效应一方面改变了谐振腔结构,影响了振荡光的空间参数;另一方面热效应引起的热致衍射损耗严重影响了激光振荡模式和光束质量。本文就端侧面组合抽运DPL的热透镜效应进行深入讨论。

1 组合抽运DPL抽运光分布

采用的端侧面组合抽运DPL结构见文献[1]。其中侧面抽运采用三向呈120°分布的线阵LD,其结构形式和抽运光强分布 $I_c(x,y,z)$ 见文献[3]。端面抽运为多根光纤耦合LD,由19根光纤紧密排列成圆形输出,经过短焦距、大数值孔径的组合透镜后输出成为平顶状分布,其抽运光强分布 $I_d(x,y,z)$ 见文献[2]。

设端面抽运光功率为 P_d ,侧面抽运光功率为 P_c ,那么总的抽运光功率 $P_0 = P_d + P_c$ 。在抽运光强远低于Nd:YAG晶体饱和吸收光强时,组合抽运光强分布函数 $I_z(x,y,z)$ 表示为

$$I_z(x,y,z) = \frac{1}{P_0} [P_d I_d(x,y,z) + P_c I_c(x,y,z)] \quad (1)$$

由上式可见,总抽运功率一定时,端面抽运光功率在总抽运功率中所占的比例是影响组合抽运光分布的一个重要因素。本文把端面抽运光功率在总抽运功率中所占的比例定义为端面抽运功率占有率。在端面抽运和侧面抽运结构完全确定的情况下,可以通过调整端面抽运功率占有率来改变抽运光分布,这是单独端面抽运和单独侧面抽运都不具备的性质。

2 组合抽运DPL热透镜效应

2.1 晶体内的温度分布

在稳态条件下,激光晶体的热传导方程^[4]为

$$-K_c \nabla^2 T(x,y,z) = Q(x,y,z) \quad (2)$$

式中: $T(x,y,z)$ 为晶体内的温度分布; K_c 是晶体的热传导率; $Q(x,y,z)$ 是晶体内的热强度,它与晶体内抽运光强分布成正比。在晶体边界温度为定值的情况下,将晶体内抽运光强分布代入热传导方程,求解即可得到晶体内的温度分布。

图1是总抽运功率60W,端面抽运功率10W时晶体横截面上的等温线分布(沿晶体长度方向上平均轴上坐标单位:mm)。图2是总抽运功率60W,端泵功率20W时的等温线分布。图3是总

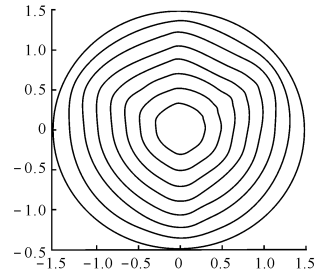


图1 端面抽运功率10W时晶体横截面上的温度分布

Fig. 1 Temperature distribution in cross section of crystal at 10 W of end-pumping power

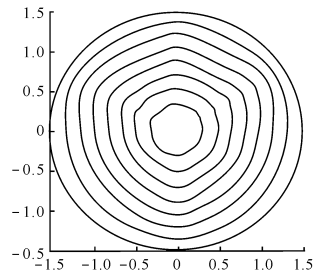


图2 端面抽运功率20W时晶体横截面上的温度分布

Fig. 2 Temperature distributions in cross section of crystal at 20 W at end-pumping power

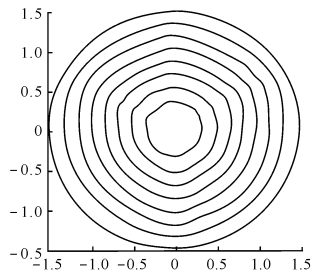


图3 端面抽运功率30W时晶体横截面上的温度分布

Fig. 3 Temperature distributions in cross section of crystal at 30 W of end-pumping power

抽运功率 60 W,端泵功率 30 W 时的等温线分布。由图可见,30 组合抽运时的温度分布接近于轴对称分布,并且端面抽运功率占有率越大,温度分布越接近于轴对称分布,因此可以将组合抽运的热效应用等效薄透镜近似。

2.2 热透镜计算

热流 $h(x, y, z)$ 满足方程:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot h(x, y, z) &= Q(x, y, z) \\ h(x, y, z) &= -K_c \nabla T(x, y, z) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

圆对称抽运时,(3) 式变为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot h(r, z) &= Q(r, z) \\ h(r, z) &= -K_c \nabla T(r, z) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对方程组第一式在一定的体积内积分,可得到热流 $h(x, y, z)$ 的表达式,继而代入第二式,可得到稳态情况下点 (x, y, z) 与点 $(0, 0, z)$ 之间温差 $\Delta T(x, y, z)$ 的完整积分表达式。

当激光晶体内的温度分布接近于轴对称分布时,可以将具有热效应的激光晶体等效为轴对称薄透镜,与其焦距相关的相位 $\Delta\varphi_f(r)$ 延迟为

$$\Delta\varphi_f(r) = \frac{2\pi}{\lambda} r^2 / 2f \quad (5)$$

式中: f 为等效热透镜焦距; λ 为振荡光的波长。总相移 $\Delta\varphi(r)$ 是单程激光通过激光棒的积累:

$$\Delta\varphi(r) = \int_0^l \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(r, z) dz \quad (6)$$

式中: $\Delta n(r, z)$ 为热致折射率变化; l 为激光晶体长度。

在抽运功率较低的情况下,由折射率温度系数 dn/dt 引起的折射率随温度的变化是产生热效应的主要原因,可近似认为

$$\Delta n(r, z) = \Delta n(r, z)_T = \Delta T(r, z) \left(\frac{dn}{dT} \right) \quad (7)$$

式中 $\Delta T(r, z) = T(r, z) - T(0, z)$ 。联立(5) 式和(6) 式可解出等效热透镜焦距。

图 4 是根据以上公式,通过数值计算得出的组合抽运热透镜焦距随端面抽运功率占有率变化的数值计算结果。可见总抽运功率一定时,端面抽运功率占有率变化对热透镜焦距有一定的影响,占有率越大,热透镜焦距越长。

2.3 热透镜效应对振荡光的影响

图 5 是考虑晶体热透镜效应时的等效谐振腔图。腔内的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{d_2}{f} & d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d_1}{f} \end{pmatrix} \quad (8)$$

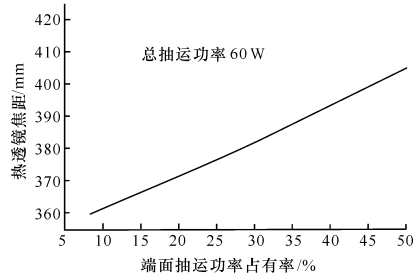


图 4 组合抽运热透镜焦距随端面抽运功率占有率的变化曲线

Fig. 4 Variation of thermal lens focal length with occupancy of end-pumping power

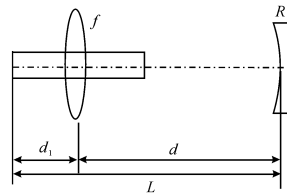


图 5 考虑晶体热透镜效应时的等效谐振腔图

Fig. 5 Equivalent cavity with consideration of crystal's thermal lens effect

谐振腔 G 参数为

$$\begin{aligned} G_1 &= 1 - \frac{d_2}{f}, \quad G_2 = 1 - \frac{d_1}{f} - \frac{b}{R} \\ b &= d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f} \end{aligned} \quad (9)$$

基横模的束腰半径为

$$w_s^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{\sqrt{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)}}{d^2 G_1 + G_2 - 2d G_1 G_2} \quad (10)$$

热透镜对振荡光产生的热致衍射损耗对各阶振荡光的影响有较大差异。根据像差衍射理论,基横模通过晶体时产生的热致衍射损耗表示为

$$\delta_{00} = 1 - \frac{\left| \iint_S e^{ik\Delta\varphi} e^{-(x^2+y^2)/w_s^2} dx dy \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-(x^2+y^2)/w_s^2} dx dy \right|^2} \quad (11)$$

式中: S 表示在晶体横截面内积分; w_s 为基横模振荡光的半径; $\Delta\varphi(x, y)$ 为 (x, y) 处相对于参考球面的波像差; $k = 2\pi/\lambda$ 。

等效热透镜产生的相对于参考球面的波像差 $\Delta\varphi(x, y)$ (双程) 可表示为

$$\Delta\varphi(x,y) = -\frac{x^2 + y^2}{f} \quad (12)$$

图6是总抽运功率60 W时基横模的束腰半径随端面抽运功率占有率的变化曲线。图7是总抽运功率60 W时热致衍射损耗随端面抽运功率占有率的变化曲线。可见在总抽运功率60 W一定的情况下,提高端面抽运功率占有率,可在一定程度上减小热透镜效应对振荡光束尺寸和衍射损耗的影响,这是因为端面抽运光功率越大,抽运光分布越趋向均匀化,热透镜效应越不明显。

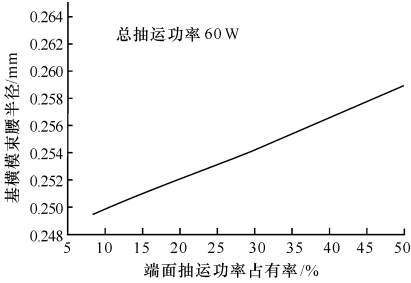


图6 基横模束腰半径随端面抽运功率占有率的变化曲线

Fig. 6 Variation of TEM₀₀'s radius with occupancy of end-pumping power

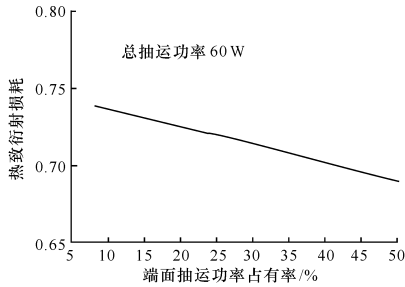


图7 基横模热致衍射损耗随端面抽运功率占有率的变化曲线

Fig. 7 Variation of TEM₀₀'s thermal induced diffraction loss with occupancy of end-pumping power

3 结论

本文介绍了组合抽运结构和相应的抽运光分

布,计算了不同端面抽运功率占有率下晶体内的温度分布,给出了等效热透镜焦距的计算方法,分析了组合抽运引起的热透镜效应对基横模振荡光的光斑尺寸及其衍射损耗的影响。主要结论有两点:

1) 端侧面组合抽运时,晶体横截面上的温度分布接近于轴对称分布,并且端面抽运功率占有率越大,温度分布越接近于轴对称分布,因此将组合抽运的热效应采用等效透镜近似;

2) 总抽运功率一定的情况下,端面抽运功率占有率的变化对热透镜焦距有一定的影响。占有率越大,热透镜焦距越长。提高端面抽运功率占有率,可在一定程度上减小热透镜效应对振荡光束尺寸和衍射损耗的影响。

参考文献:

[1] 杨爱粉,李武军,过振,等. 端面抽运对组合抽运DPL振荡光的控制作用[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2):161-164.
 YANG Ai-fen, LI Wu-jun, GUO Zhen, et al. Control function of the end-pumping light on the oscillation light in an end-and-side-composite-pumped DPL[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2), 161-164. (in Chinese)

[2] 杨爱粉,过振,王石语,等. 组合抽运DPL声光调Q特性研究[J]. 应用光学, 2007, 28(5):593-597.
 YANG Ai-fen, GUO Zhen, WANG Shi-yu, et al. Study on the Q-switching performance in an end-and-side-composite-pumped DPL [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(5):593-597. (in Chinese)

[3] 杨爱粉,卜英华,陈德东,等. 线阵激光二极管侧面抽运Nd:YAG激光器特性研究[J]. 光学学报, 2004, 24(5):633-640.
 YANG Ai-fen, BU Ying-hua, CHEN De-dong, et al. Characteristic of liner LDs side-pumped Nd:YAG laser[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5):633-640. (in Chinese)

[4] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L. Thermal modeling of continuous-wave end pumped solid-state lasers [J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 56(19):1831-1833.