

平顶光端面抽运 DPL 中热效应对输出功率的影响

杨爱粉^{1,2}, 过振¹, 王石语¹, 蔡德芳¹, 文建国¹

(1 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

(2 西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘要:用平顶光束描述由多根光纤紧密排列耦合并经透镜整形后的抽运光分布,给出了平顶光束的光强分布,对晶体热效应引起的热致衍射损耗随抽运功率和抽运光束半径的变化规律进行了数值计算,讨论了晶体热效应引起的热致衍射损耗对基横模高斯光束输出功率的影响,并实验验证了基横模高斯光束输出功率随抽运功率的变化规律.结果表明:热致衍射损耗使基横模高斯光束输出功率明显降低.随着抽运光束半径的增大,热致衍射损耗减小,对基横模高斯光束输出功率的影响就减小;抽运功率越大,热致衍射损耗越大,对基横模高斯光束输出功率的影响就越大.

关键词:激光技术;固体激光器;激光二极管抽运固体激光器;端面抽运;平顶光束;热效应.

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

0 引言

在激光二极管抽运固体激光器(DPL)中,端面抽运时的抽运光与腔模匹配良好,转换效率高,光束质量好,声光调Q脉冲宽度窄,并且通过改变抽运光分布可以实现对振荡光的控制,因此得到了广泛应用^[1-3].为了提高端面抽运功率,通常用多根光纤紧密排列的耦合方式^[4],此时的抽运光分布是多根光纤输出的高斯光强分布的线性叠加,经耦合透镜整形后的抽运光功率较高,光束半径较大,不再适合用基横模高斯光束描述.(本文将引入平顶光束来描述这种抽运光分布^[4].)

本文从平顶光束光强分布出发,首先对晶体热效应引起的热致衍射损耗随抽运功率和抽运光束半径变化规律进行数值计算,进而讨论平顶光端面抽运DPL中热效应对基横模高斯光束输出功率的影响.

1 抽运光分布

在柱坐标系中,平顶光束归一化的光强分布函数可写成式(1)^[5]

$$I(r) = I_0 \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w_p} \right)^N \right] \quad (1)$$

式中 N 和 w_p 分别为平顶光束的阶数和束腰半径. $N=2$ 时为高斯光束, $N \rightarrow +\infty$ 对应着圆柱光束, $2 < N < +\infty$ 时光束分布是介于圆柱光束和径向高斯光束之间的平顶光分布.本文取阶数 $N=4$,那么式(1)中心最大光强 I_0 为

$$I_0 = \frac{1}{2\pi \int_0^\infty r \exp(-2r^4/w_p^4) dr} = \frac{2^{1.5}}{\pi^{1.5} w_p^2} \quad (2)$$

用该平顶光束抽运吸收系数为 α 、长度为 l 的激光介质,归一化的抽运光强分布函数成为式(3)

$$I(r, z) = \frac{2^{1.5} \alpha}{\pi^{1.5} w_p^2 [1 - \exp(-\alpha l)]} \cdot \exp(-2r^4/w_p^4 - \alpha z) \quad (3)$$

2 热致衍射损耗

假定温度沿晶体轴线方向不变,并设晶体边界温度为定值 $T(r_0)$,那么对棒状Nd:YAG晶体,稳态热传导方程为^[5]

$$-K_c \nabla^2 T(r, z) = Q(r, z) \quad (4)$$

$$T|_{r=r_0} = T(r_0)$$

式中 $T(r, z)$ 为晶体温度分布, K_c 为晶体的热传导系数. $Q(r, z)$ 是晶体内的热强度, $Q(r, z) = \alpha \eta I(r, z)$,这里 η 为抽运功率的热转换系数.

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变化为

$$\Delta \phi_f = k r^2 / 2f \quad (5)$$

式中 f 为等效热透镜焦距, $k=2\pi/\lambda$,为振荡光的波数.另一方面振荡光通过晶体的总相移是单程激光通过激光棒的积累

$$\Delta \phi(r) = \int_0^l k \Delta n(r, z) dz \quad (6)$$

其中 $\Delta n(r, z)$ 为热致折射率变化.在抽运功率较低的情况下,热致折射率变化 $\Delta n(r, z)$ 主要由晶体的折射率温度系数 dn/dt 引起,近似表示为式(7).将式(7)代入式(6)并联立式(5),可解出热透镜焦距

* 国家重点实验室基金(00JS08.1.1.DZ0103)及国家自然科学基金(60078022)资助

Tel: 029-88288211 Email: yaf65@sohu.com

收稿日期: 2006-09-07

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

对确定的谐振腔,非衍射损耗和输出镜损耗对各阶振荡光的影响差别不大,而热致衍射损耗对各阶振荡光的影响则有较大差别.根据像差衍射理论,基横模高斯光束通过晶体时产生的热致衍射损耗为^[7]

$$\delta_{00} = 1 - \frac{\left| \iint_S e^{ik\Delta\varphi} e^{-r^2/w_s^2} r dr d\theta \right|^2}{\left| \iint_0^{2\pi+\infty} e^{-r^2/w_s^2} r dr d\theta \right|^2} \quad (8)$$

式中 S 表示在晶体整个横截面内积分.如果将热的 Nd:YAG 晶体等效为焦距为 f 的薄透镜,那么振荡光两次通过它的波相差为

$$\Delta\varphi(r) = -\frac{r^2}{f} \quad (9)$$

设定晶体边缘温度 $T(r_0, z) = 20^\circ\text{C}$, 晶体尺寸 $\phi 3 \times 10 \text{ mm}$. 将式(3)代入式(4)热传导方程,解出晶体温度差函数 $\Delta T(r, z)$,代入式(7)并联立式(5)和式(6),解出热透镜焦距 f ,再依次用式(9)和式(8)数值计算平顶光束抽运时基横模高斯光束的热致衍射损耗.若将式(3)中的抽运光束用高斯光束表达式,即可数值计算高斯光束抽运时基横模高斯光束的热致衍射损耗,作为与平顶光束抽运时的比较.图1是抽运功率 20 W 时基横模热致衍射损耗

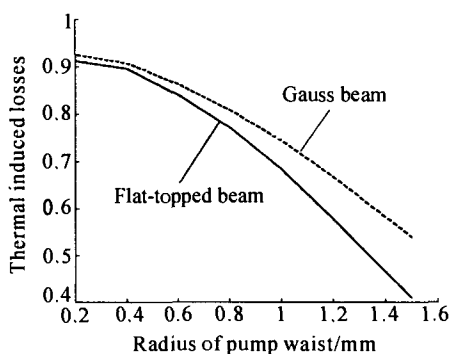


图1 热致衍射损耗随抽运光束半径的变化曲线
Fig.1 Variation of the thermal induced diffraction losses with the radius of pump waist

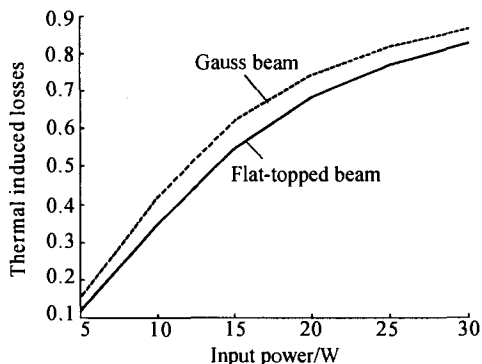


图2 热致衍射损耗随抽运功率的变化曲线
Fig2 Variation of the thermal induced diffraction losses with the pump power

随抽运光束半径的变化曲线,可见随着抽运光束半径增大,衍射损耗减小,并且平顶光束的热致衍射损耗的减小更明显.图2是抽运光束半径 1 mm 时基横模热致衍射损耗随抽运光功率的变化曲线.随着抽运功率的提高,衍射损耗明显增大,并且平顶光束与高斯光束抽运时的变化趋势一致.

3 振荡光特性

基横模高斯光束归一化的光强分布函数 $s_0(r, z)$ 表示如下

$$s_0(r, z) = \frac{2}{\pi w_s^2(z) L} \exp \left[-2 \left(\frac{r^2}{w_s^2(z)} \right) \right] \quad (10)$$

式中 $w_s(z)$ 为振荡光斑半径.由于 z 不大于谐振腔腔长 L , 并且振荡光波长 λ_s 的数量级远小于束腰半径 w_{s0} , 因此 $w_s(z) \approx w_{s0}$.

根据文献[1],基横模近阈值条件下的输出功率 P_{out} 表示为式(11)

$$P_{out} = \eta_p \frac{h\nu_s T J_0^2}{h\nu_p \delta_0 J_1} (P_{in} - P_{th}) \quad (11)$$

η_p 为抽运功率转换为吸收功率的转换系数, h 为普朗克常数, ν_p 和 ν_s 分别为抽运光和振荡光频率, T 为谐振腔输出镜透过率, δ_0 为基横模在腔内的往返损耗, P_{in} 为抽运光功率, $J_0 = \iiint I(r, \theta, z) s_0(r, \theta, z) dV$ 为归一化的抽运光强分布函数和基横模振荡光强分布函数的交迭积分, $J_1 = \iiint I(r, \theta, z) s_0^2(r, \theta, z) dV$. P_{th} 为阈值抽运功率,根据文献[1]可表示为式(12).其中 n_g 为增益介质的折射率, σ 为基横模的受激辐射截面, τ_f 为激光上能级的荧光寿命

$$P_{th} = \frac{h\nu_p n_g \delta_0}{\eta_p 2L\sigma\tau_f J_0} \quad (12)$$

在腔长 50 mm 输出镜透过率 13.4% 的谐振腔中,对在往返损耗 δ_0 中考虑热致衍射损耗和不考虑热致衍射损耗两种情况,分别进行基横模输出功率的数值计算.图3为抽运功率 20 W 时基横模高斯

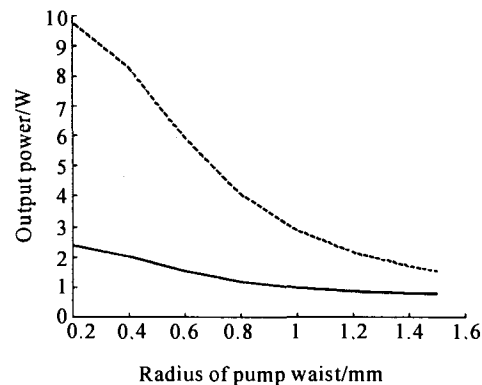


图3 输出功率随平顶抽运光束半径的变化曲线
Fig.3 Variation of the output power with radius of pump waist

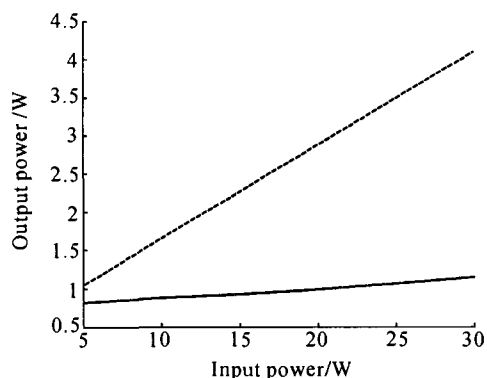


图4 输出功率随平顶抽运光功率的变化曲线

Fig. 4 Variation of the output power with the pump power
光束输出功率随平顶抽运光束半径的变化曲线,图4为平顶抽运光束半径1 mm时输出功率随抽运功率的变化曲线,其中虚线为不考虑热致衍射损耗时的输出功率,实线为考虑热致衍射损耗时的输出功率.可见,热致衍射损耗的存在,使得基横模高斯光束的输出功率明显降低.抽运光束半径越小,热致衍射损耗对基横模高斯光束输出功率的影响越大;抽运功率越大,热致衍射损耗对基横模高斯光束输出功率的影响越大.

在上述谐振腔中采用小孔选模技术,实验验证基横模输出功率随抽运功率的变化.图5是平顶光端面抽运 DPL 结构图,其中平顶光是由十九根光纤按图6结构紧密排列成圆形输出并经耦合透镜整形产生的.图7是在耦合透镜后拍摄的抽运光斑照片及其三维光强分布,可见抽运光分布呈现平顶.图5中 Nd:YAG 晶体左端面 AR 808 nm 激光,HR 1 064 nm 激

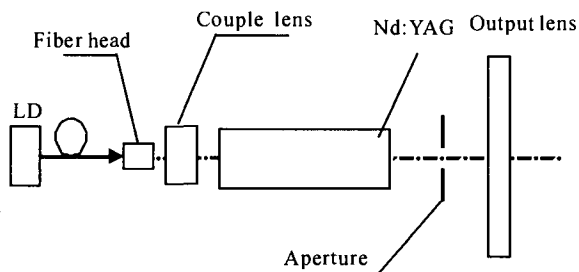


图5 平顶光端面抽运 DPL 结构图

Fig. 5 Schematic diagram of a flat-topped end pumped DPL

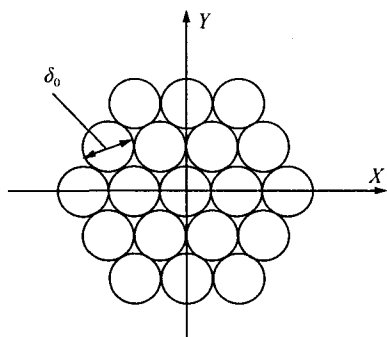
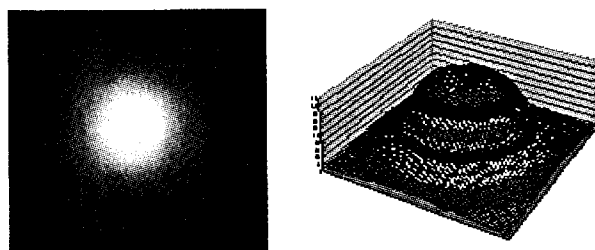


图6 十九根光纤排列结构

Fig. 6 Arrangement of nineteen fibers



(a)Picture of the light

(b)Intensity distribution

图7 抽运光斑照片及其三维光强分布.

Fig. 7 Picture of the pumping light and its three dimensional intensity distribution

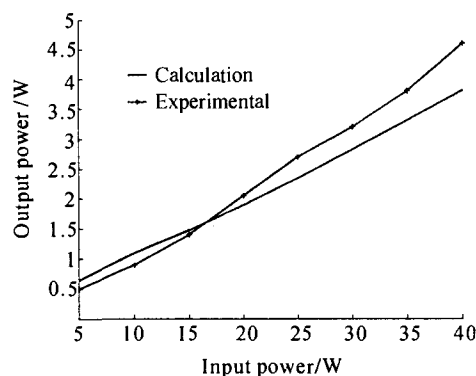


图8 抽运光功率变化时输出功率实验与计算结果的比较

Fig. 8 Comparison of the experimental and calculation results in output power with the variety of the pump power

光,右端面 AR 1 064 nm 激光.谐振腔长 50 mm,晶体尺寸 $\phi 3 \times 10$ mm,输出镜透过率 13.4%,小孔光阑直径 1.2 mm.实验与基横模数值计算结果的比较见图8.可见实验与计算结果接近.抽运功率高于 20 W 时,出现了高阶模,并且抽运功率越高,高阶模所占比例越大,实验测试值越高于计算值.

4 结论

本文用平顶光束描述由多根光纤紧密排列耦合并经透镜整形后的抽运光分布,给出了平顶光束的光强分布,对晶体热效应引起的基横模高斯光束热致衍射损耗随抽运功率和抽运光束半径的变化规律进行了数值计算,进而讨论了平顶光端面抽运 DPL 中热效应对基横模高斯光束输出功率的影响,并进行了相关实验验证.通过数值计算和实验结果看出:热致衍射损耗的存在,使得基横模高斯光束的输出功率明显降低.随着抽运光束半径的增大,衍射损耗减小,热致衍射损耗对基横模高斯光束输出功率的影响越小;抽运功率提高时,热致衍射损耗明显增大.抽运功率越大,热致衍射损耗对基横模高斯光束输出功率的影响越大.显然这些结论与高斯光束抽运时的结论相似,但高斯光束仅比较适合于描述单根光纤耦合的低功率、小半径的抽运光分布,而平顶

光束比较适合于描述高功率、大半径的抽运光分布,因此用平顶光束描述由多根光纤紧密排列耦合并经透镜整形后的抽运光分布,是对常用的用高斯光束描述的单根光纤耦合的低功率、小半径抽运光分布的有效补充。

参考文献

- [1] FAN T Y, BYER R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J Quant Elect*, 1988, **QE-24**(6):895-912.
- [2] WANG Shi-yu, XUE Hai-zhong, TANG Yang-de, *et al.* Study of the effect of the distribution of pumping light on the diode pumped solid-state laser [J]. *Journal of Xidian University*, 2003, **30**(1):75-80.
王石语,薛海中,唐映德,等. 抽运光束空间分布对 DPL 性能的影响[J]. *西安电子科技大学学报*, 2003, **30**(1):75-80.
- [3] ZHENG Jia-an, ZHAO Sheng-zhi, WANG Qing-pu. Influence of the crystal thermal effect on the optimal design of a LD end-pumped solid-state laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(6):724-729.
郑加安,赵圣之,王青圃,等. 晶体热效应对 LD 端面泵浦固体激光器优化设计的影响[J]. *光子学报*, 2001, **30**(6):724-729.
- [4] 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.
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.
- [5] LÜ Bai-da. Laser optics: Beam description, deliver transformation and the light cavity technique physics (version 3) [M]. Peking: Higher education publisher, 2003, **12**:223-225.
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理 (第3版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003, **12**:223-225.
- [6] 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.
- [7] CHEN Y F, KAO C F, WANG C L. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher Power: Influence of thermal effect [J]. *IEEE J Quant Elect*, 1997, **33**(8):1424-1429.

Influence of the Thermal Effect on the Output Power in a Flat-topped Beam End-pumped DPL

YANG Ai-fen^{1,2}, GUO Zhen¹, WANG Shi-yu¹, CAI De-fang¹, WEN Jian-guo¹

(1 Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Received date: 2006-09-07

Abstract: The flat-topped beam is applied to describe the pump profile, formed by multi-fiber compact-arranged coupling and then being reshaped by lens. The pump profile of the flat-topped beam is given. Variation relations of the thermal induced diffraction losses caused by the thermal effect with variations of the pump power and the waist radius of pump beam have been numerically calculated. The influence of the thermal effect on the fundamental transverse mode output power has been discussed further. Experimental test on the variety regulation of the output power with pump power has also been done. The results show that the thermal induced diffraction losses reduce the output power obviously. With increasing of the waist radius of pump beam, the thermal induced diffraction losses and its effect becomes small; The higher the pump power, the bigger the thermal induced diffraction losses, and the stronger the influence on the output power of the fundamental transverse mode.

Key words: Laser technique; Solid-state lasers; Laser-diode-pumped solid-state lasers; End-pumping; Flat-topped beam; Thermal effect.



YANG Ai-fen was born in 1965. She received her M. S. degree in Military Optics from The Chinese Ordnance Academy of Science in 1991. Now she is a senior engineer in Xi'an Institute of Applied Optics. Her research interests are involved in the solid-state laser and its applications. She is also studying for her Ph. D. degree in Xidian University.