

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0098-03

激光棒的自消热透镜现象

赵存华^{1,2,4}, 樊仲维^{3,4}, 毕 勇³, 裴 博^{3,4}, 崔建丰^{1,2,4}, 张 晶^{1,2,4},
牛 岗^{1,2,4}, 石朝辉^{1,2,4}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林, 长春 130033
²中国科学院研究生院, 北京 100039
³中国科学院光电研究院, 北京 100085
⁴北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085

摘要 用端面研磨法来弥补激光棒热透镜效应是一种传统的方法。在推导更为精确的激光棒端面研磨半径公式时,发现了激光棒的自消热透镜效应现象。把激光棒等效为梯度折射率棒,得到了新的热透镜焦距公式。从新的焦距公式出发,理论证明了激光棒自消热透镜效应现象,并详细分析了该效应产生的原因。

关键词 激光技术; 固体激光器; 热透镜; 梯度折射率棒; 自消热透镜

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Self-Compensated Thermal Effect Phenomenon of Laser Rods

ZHAO Cun-hua^{1,2,4}, FAN Zhong-wei^{3,4}, BI Yong³, PEI Bo^{3,4},
CUI Jian-feng^{1,2,4}, ZHANG Jing^{1,2,4}, NIU Gang^{1,2,4}, SHI Zhao-hui^{1,2,4}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanism and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ Academy of Opto-Electrics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
⁴ Beijing Guoke Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China

Abstract Extremity ground (end cap) method is better means to compensate thermal lens effect in laser rod. The self-compensated thermal lens (SCTL) effect phenomenon was found from the deduced equation of radius ground. Based on that the laser rod is equivalent to gradient index rod (GRIN), a new thermal lens focal length expression was achieved. From it the effect of self-compensated thermal lens was found, and analyzed.

Key words laser technique; solid-state laser; thermal lens; gradient index rod; self-compensated thermal lens

1 引 言

半导体二极管激光器(LD)抽运固体激光器由于全固态、光束质量好、寿命长、效率高等优点,发展极其迅速。在半导体二极管激光器侧面抽运固体激光器中,由于抽运光量子与输出激光量子能量差转化成了热量,所以激光棒内热沉是在所难免的^[1,2]。同时热量的沉积和致冷的存在,使激光棒内温度分布不均,产生热应力和受热形变现象,形成热透镜效应^[3]。端面研磨成曲面用于弥补热透镜效

应,是非常有效的方法^[4,5]。本文首先把激光棒等效为梯度折射率棒,得出了新的热透镜焦距公式^[6],进而推导了另一种端面研磨半径,把它与经典的公式进行比较,理论分析了其中差异。

2 激光棒的热透镜效应及传统公式

传统的端面研磨半径公式是基于热透镜焦距 $f = (f_0 + f_r)/2$, 其中 f_0 和 f_r 分别是激光棒环向和径向的热透镜焦距。而只把激光棒前端面研磨成

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2002AA311020)和北京市科学技术委员会重大项目(H020420070110)资助课题。

作者简介: 赵存华(1975—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生,主要从事光学设计和全固态激光器研究。E-mail: zhao.cun.hua@163.com

半径

$$R = (n_0 - 1)f. \quad (1)$$

n_0 为激光棒中心的折射率, 激光棒由于量子效应等产生热量, 为了不在激光棒内导致热累积, 需要对激光棒进行致冷; 同时激光棒内抽运光的不均匀性, 导致热产生率在各点不完全相同。综合以上可以得知, 在激光棒内存在热场分布的不均匀性, 进而产生热应力及热致膨胀现象。使激光棒在宏观上类似一个透镜, 称为热透镜效应。热透镜效应可以分为三个部分: 热致温度梯度、热应力和热膨胀现象^[3]。

值得一提的是, 在热膨胀现象中, 如图 1 所示, 由激光棒的径向伸长量, 可以求得激光运行时附加于棒两端面的曲率为

$$\rho_0 = \frac{l(r)}{r^2} = \frac{\alpha r_0 Q}{4K}, \quad (2)$$

其中 r 为径向坐标, $l(r)$ 为径向 r 处激光棒的伸长量, α 为热膨胀系数, r_0 为激光棒的半径, Q 为激光棒内热耗散功率密度, K 为热传导系数。综合以上三种热效应, 文献^[3] 给出了激光棒热透镜焦距公式

$$f = \frac{KA}{P_a} \left[\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_0^3 + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{l_0} \right]^{-1}, \quad (3)$$

其中 A 为激光棒截面积, P_a 为棒内总耗散功率, dn/dT 为温度折射率系数, l_0 为棒长, n_0 为激光棒中心的折射率, $C_{r,\phi}$ 为与热应力有关的系数。将(3)式代入(1)式即为通常使用的用于弥补热透镜效应的激光棒端面研磨半径。

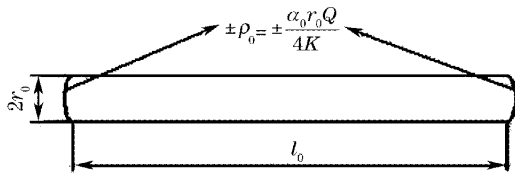


图 1 运行时的激光棒

Fig. 1 Operating laser rod

3 端面研磨法弥补热透镜效应的新的半径公式

端面研磨法弥补热透镜效应是一种常用的方法^[2,3], 由于(3)式本身存在着近似^[3], 而(1)式也作了很大的约算, 所以(1)式的研磨半径就近似很大。用文献^[4]中的公式改造热透镜内的折射率分布式^[3], 可以得到

$$n^2(r) = n_0^2(1 - \beta^2 r^2), \quad (4)$$

其中

$$\beta = \sqrt{\frac{Q}{K} \left(\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\phi} \right)},$$

上述公式的改造前提是非线性因子 $|\beta| \ll 1$, 选用 $K = 0.11 \text{ W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$, $\alpha = 7.9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $C_{r,\phi} = 0.0165$, $n_0 = 1.82$, $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 采用 180 W 三 bars 环绕激光棒进行抽运, 单 bar 能量 60 W, 总耗散功率为 62 W。激光棒为 $\phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 棒。可以算出 $\beta \sim 10^{-4}$ 量级, 满足要求, 可以置于括号内。

对于折射率分布满足(4)式, 长为 l_0 , 两端面半径为 ρ_1, ρ_2 的梯度折射率棒。其光焦度^[7]为

$$\varphi = (n_0 - 1)(\rho_1 - \rho_2) \cos(\beta l_0) + n_0 \beta \sin(\beta l_0) + \rho_1 \rho_2 l_0 \frac{(n_0 - 1)^2 \sin(\beta l_0)}{n_0 \beta l_0}, \quad (5)$$

为了方便, 只研磨激光棒的前端面。因为端面研磨是在激光棒没有运行的情况下进行的, 此时设前端面需研磨半径为 ρ , 则激光棒运行时前端面半径为 $\rho + \rho_0$, 后端面半径保持不变为 $-\rho_0$, 因为消热透镜的条件为 $\varphi = 0$, 把以上参量代入(5)式可得

$$R' = \frac{(n_0 - 1) \cos(\beta l_0) - \rho_0 l_0 \frac{(n_0 - 1)^2 \sin(\beta l_0)}{n_0 \beta l_0}}{2(n_0 - 1) \rho_0 \cos(\beta l_0) + n_0 \beta \sin(\beta l_0)}, \quad (6)$$

其中 R' 为通过(5)式推导的用于弥补热透镜效应需要研磨的端面半径。

4 两个端面研磨半径的比较^[8]

下面比较一下(1)式和(6)式的差异。如图 2 所示, 其中, 实线代表(3)式代入(1)式后的曲线; 虚线代表(6)式的曲线。从图形上可以得到以下结论:

1) 无论在激光棒小耗散功率还是较大耗散功率, 两曲线差别都很大。只在耗散功率为某段时(约 $> 600 \text{ W}$), 两曲线吻合得才比较好。

2) 在激光棒耗散功率约为 450 W 左右, (6)式的曲线出现一个无穷大值, 这说明此时不需要研磨即可使用, 也就是说存在自消热透镜效应点。该点

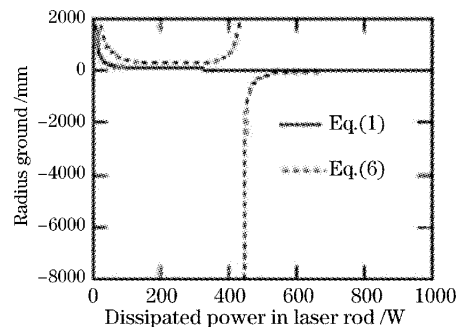


图 2 (1)式和(6)式的对比

Fig. 2 Schematics contrast between Eq. (1) and (6)

满足(6)式分母为零点

$$\rho_0 = -\frac{n_0 \beta}{2(n_0 - 1)} \tan(\beta l_0). \quad (7)$$

出现以上现象主要是由以下原因造成的:

首先,在用(1)式计算时,只是把激光棒等效为一个简单的薄透镜,即平凸透镜进行的计算。而(6)式则把激光棒等效为一个梯度折射率棒,使用(5)式进行计算,这就比单透镜模型有更高的精度。

其次,(1)式在进行等效透镜的过程中,忽略了激光棒的长度,按等效折射率薄板计算,且三种热效应耦合的过程中,采用了直接耦合方式,没有按光焦度耦合方程计算^[3]。

可以看出,(6)式在进行激光棒热效应的弥补方面,明显更精确,更有实用价值和理论价值。

从(5)式出发所得的自消热透镜效应是显然的。我们知道对于梯度折射率介质,光线在里面走正弦曲线,如图3所示。由光纤理论可知,对于不同的 β ,光线在梯度折射率棒内所走的光线轨迹不同。 β 值越大,光线偏折得越厉害,相同长度内,正弦波长的个数越多。入射光和出射光都在正弦线的波峰处(如图3),入射平行光就会出射平行光。对于激光棒,棒内耗散功率达到某个定值时,折射率系数刚好使激光棒成为图3所示的情形,这时激光棒的热透镜焦距就会变成无穷大。



图3 光线在梯度折射率棒中的传播

Fig.3 Ray traverses gradient index rod

5 结 论

详细推导了端面研磨法弥补热透镜效应的公式,并把它与通常使用的公式作了比较,从理论上证实了我们所推的公式有更高的精度。从此公式出发,发现在激光棒内耗散功率满足一定值时,存在热透镜焦距为无穷的点,即自弥补热效应点。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(6): 1457~1459
- 2 Sébastien Chénais, Francois Balébois, Frédéric Druon *et al.*. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium lasers-Part I: Theoretical analysis and wavefront measurements [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(9): 1217~1234
- 3 Walter Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. New York: Springer-Verlag, 1976. 352~353
- 4 Cai Defang, Wang Shiyu, Wen Jianguo *et al.*. Research on laser crystalline thermal effects and coolant technology[C]. *Theses of Chinese Opt-Electron Technology Conferece*, 2000. 253~256
蔡德芳,王石语,文建国等. DPL中激光介质晶体热效应及散热技术研究[C]. 全国光电技术学术交流会议论文集, 2000. 253~256
- 5 M. P. MacDonald, Th. Graf, J. E. Balmer *et al.*. Reducing thermal lensing in diode-pumped laser rods [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **178**: 383~393
- 6 Zhao Cunhua, Fan Zhongwei, Wang Peifeng *et al.*. New thermal lens equation of LD side-pumped solid-state laser rod [J]. *J. of Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(8): 1004~1006
赵存华,樊仲维,王培峰等. LD侧面泵浦固体激光棒新的热透镜焦距计算 [J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(8): 1004~1006
- 7 Qiao Yatian. *Optics of Gradient Index* [M]. Beijing: Science Press, 1991. 293~294
乔亚天. 梯度折射率光学 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 293~294
- 8 Zhao Cunhua, Fan Zhongwei, Wang Peifeng *et al.*. Self-compensated thermal effect points in laser rod[C]. the 89th OSA Annual Meeting, 2005