

管状激光介质的光学性质

朱长虹 李正佳 刘安平 张 昀

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 针对管状激光介质的热透镜效应, 提出“ C_1 判据”和“热感应光线主轴”的观点; 推导了二维光线矩阵和热透镜焦距; 并指出提高光束质量的主要方法。

关键词: 管状激光介质 热感应光线主轴 热透镜效应

Optical properties of tube lasing medium

Zhu Changhong, Li Zhengjia, Liu Anping, Zhang Jun

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The paper puts forward the idea about “ C_1 discrimination” and “thermally induced principal optical axis” for thermal lasing effect in tube lasing medium. The parameter C_1 is a factor of the second term of the temperature distribution expression in the cross section of the tube lasing medium. The positive or negative value of C_1 indicates the direction of the gradient between the inner wall and outer wall, relatively indicates the operating mode of the laser. In the effect of thermal lensing, basically the temperature gradient determines the distribution of refractive index in the radial direction. So it is called “thermally induced principal optical axis”. This paper derives two dimension transfer matrix of ray and the focus length of the thermal lens, meanwhile points out the main method of improving beam quality.

Key words: tube lasing medium thermally induced principal optic axis thermal lensing effect

一、引 言

管状激光介质的泵浦与散热面积比板条和棒状的要大, 能增强冷却效果, 提高介质的热应力破坏阈值, 加大激光平均输出功率。例如采用 Kr 灯内泵浦方式的 Nd: YAG 管状激光器, 单级输出的激光平均功率已达到千瓦量级, 光电转换效率为 7.5%, 是棒状的两倍^[1]。但光束质量尚不尽人意, 限制了这类激光器的推广应用。在高平均功率条件下, 激光介质的光学性质, 在很大程度上与热力学因素有关。因此, 有必要对管状介质的光学性质, 即由温度分布引起折射率变化的热透镜效应进行理论分析。

13 Sepold G. Application of High Power Lasers, 1991; (3): 11~ 17

14 Kutsuna M, Suzuki J, Kimura S *et al.* Welding in the World, 1993; 31(2): 126~ 134

15 铁粉烧结件激光焊工艺. 神户制钢技报, 1993; 43(1): 135

16 Boualf B, Bartzsch J. Welding and Cutting, 1993; (4): 31~ 33

* * *

作者简介: 胡军辉, 男, 1973 年出生。在读硕士。课题方向为激光焊接与表面强化。

二、温场分布与运转模式的判定

设平行端面的管状介质本身是光学均匀和各向同性的。在忽略介质长度方向微小的温度变化和稳态均匀泵浦条件下,求解中心轴对称的热传导方程,可得出介质横截面内温度 T 与径向坐标 r 的通解关系^[2]:

$$T(r) = -Qr^2/(4K) + C_1 \ln r + C_2 \quad (1)$$

式中, Q 为介质内单位体积的发热速率, K 为导热率, C_1 和 C_2 由边界条件确定。

对于棒状介质, $C_1 = 0$, 没有对数项; 对于管状介质, 其横截面是圆环形的复连通区域, 应保留对数项。若管状介质内壁 r_1 处和外壁 r_0 处的温度分别为 T_1 和 T_0 , 可得出:

$$C_1 = \{T_0 - T_1 + [Q/(4K)(r_0^2 - r_1^2)]\} / [\ln(r_0/r_1)] \quad (2)$$

由(1)式可知, $T(r)$ 在管状介质的横截面内是否存在极值, 直接与 C_1 的正负取值有关。

1. 若 $C_1 \leq 0$: 相当于管状介质内、外壁的温差大于或等于 $[Q/(4K)](r_0^2 - r_1^2)$, 内壁温度最高, $T(r)$ 呈单调下降分布。对于折射率温度系数 dn/dT 与空间坐标无关的激光介质而言, 在 $dn/dT > 0$ 的条件下, 其折射率的分布函数与 $T(r)$ 具有同样的形式。由于梯度折射率介质与均匀介质球面镜对光波相位作用的等效性^[3]。当 $C_1 = 0$ 时: 管状介质如同一个空心的三维球面透镜, 其热透镜效应与棒状介质相似, 但对于稳定区内的平行平面腔型, 只要 r_1 大于光束腰 ω_0 , 管状激光器就不可能在基横模状态下运转; 如果 $C_1 < 0$: 保留的对数项使得热透镜焦距是 r 的函数, 管状介质如同一个三维非球面透镜, 球差还导致高阶模式的畸变, 光束质量更差^[4]。总之, $C_1 \leq 0$ 的条件, 使得平行平面腔型的管状激光器运转在高阶横模混合的状态, 相当于在腔内放置了一个“高通滤波器”, 只对光斑半径大于 r_1 的高阶模有增益。因此, 其光束质量比棒状介质要差得多。

2. 若 $C_1 > 0$: 相当于管状介质内、外壁的温差小于 $[Q/(4K)](r_0^2 - r_1^2)$ 。对(1)式求导数并令其为零:

$$-Qr/(2K) + C_1/r = 0 \quad (3)$$

$$\text{解此方程得出极值温度所对应的径向坐标 } r_T: \quad r_T = \sqrt{2KC_1/Q} \quad (4)$$

显然, $T(r)$ 的二阶导数小于零, 所以, $T(r_T)$ 为管状介质内温度分布的极大值, 同样, r_T 处的折射率 $n(r_T)$ 也是极大值。由此可见, $C_1 > 0$ 时管状介质内温场和折射率的分布不同于 $C_1 \leq 0$ 的情形。因此, 管状激光介质内、外壁的温度之差, 即 C_1 的正负取值, 对其光学性质有着重要的影响, 可用于直接对管状激光器的运转模式进行判断。所以不妨称为“ C_1 判据”。

三、折射率分布与光线主轴的确定

在固体激光介质的热透镜效应中, 由温度梯度所产生的折射率径向非均匀分布占主导地位^[5], 在一级近似下, 可忽略光弹性应力双折射和端面效应。以 r_T 处的温度 $T(r_T)$ 和折射率 $n(r_T)$ 为参考值, 管状介质折射率的径向分布函数 $n(r)$ 为:

$$n(r) = n(r_T) + [T(r) - T(r_T)] dn/dT \quad (5)$$

对于 Nd:YAG 激光介质, 通常 dn/dT 为 $7.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

显然, 当 $C_1 > 0$ 时, 温度与折射率同时在 r_T 处有极大值 $T(r_T)$ 与 $n(r_T)$ 。将(1)式和(4)式代入(5)式中可得出:

$$n(r) = n(r_T) \left[1 + \frac{C_1}{2n(r_T)} \left(\ln \frac{r^2}{r_T^2} - \frac{r^2}{r_T^2} + 1 \frac{dn}{dT} \right) \right] \quad (6)$$

由光线方程可知: 在折射率的极值处, 光线的传播行为与其在均匀介质中的情形相同^[6]。

因此,对于平行平面端面的类透镜介质而言,折射率极值的位置就是光线主轴的位置。所以,对于棒状介质,中心温度最高,折射率最大,光线主轴与其几何中心对称轴重合。而管状介质折射率的极大值分布在半径为 r_T 的圆周上,并且扩展成为一个圆柱面。这是管状激光介质与棒状介质的一个重要区别。管状介质的光线主轴分布如图 1 所示。



Fig. 1 Z_T is the thermally induced principal optic axis
a—cross section diagram of the tube laser medium
b—vertical section diagram of the tube laser medium

由以上讨论可知,光线主轴面 Z_T 是由热透镜效应所产生的。因此,可以称 Z_T 为“热感应光线主轴面”。对于棒状介质, Z_T 退化为一条线并与 Z 重合一致,可以不加区分,但前提必须是均匀泵浦条件;而对于管状介质,即使泵浦是均匀的,只要 $C_1 > 0$, Z_T 就演变成 Z 轴以 r_T 为半径的圆柱面分布,有无穷多根。

四、二维光线矩阵与热透镜焦距

在 $C_1 > 0$ 的条件下,管状激光介质的“热感应光线主轴面” Z_T 在其横截面上的径向坐标为 r_T 。因此,在做光学近轴近似时,不能像棒状介质那样,以原点处的几何中心对称轴 Z 为基准;而必须以 r_T 所对应的 Z_T 为基准来处理有关问题。在此基础上,可求出管状介质的二维光线传输矩阵和热透镜焦距的表示。由管状介质的旋转对称性,在任意一个纵切面上, Z_T 附近的近轴光线方程为:

$$\frac{d}{dZ_T} \left(n \frac{dr}{dZ_T} \right) = \nabla n(r) \quad (7)$$

取括号中的 $n \approx n(r_T)$, 并将(6)式代入得:

$$\frac{d^2 r}{dZ_T^2} = \frac{C_1}{n(r_T)} \left(\frac{1}{r} - \frac{r}{r_T^2} \right) \frac{dn}{dT} \quad (8)$$

为了求得解析解并保证有一定的精度,可将非线性项在光轴 r_T 处做幂级数展开:

$$\frac{1}{r} - \frac{r}{r_T^2} = \frac{-2}{r_T^2} (r - r_T) + \sum_{m=2}^{\infty} \frac{(-1)^m}{r_T^{m+1}} (r - r_T)^m \quad (9)$$

上式为近轴条件收敛的幂级数,取线性项相当于对 $n(r)$ 取平方项近似,不会带来大的误差。作坐标平移,即令 $Y = r - r_T$, 代入(8)式得:

$$\frac{d^2 Y}{dZ_T^2} + \frac{2C_1 dn/dT}{n(r_T) r_T^2} Y = 0 \quad (10)$$

解方程,得到以 Z_T 为光轴的管状类透镜介质的二维近轴光线传输矩阵:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta Z_T) & (1/\beta) \sin(\beta Z_T) \\ -\beta \sin(\beta Z_T) & \cos(\beta Z_T) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{式中:} \quad \beta = \left(\frac{2C_1 dn/dT}{n(r_T)} \right)^{1/2} \frac{1}{r_T} \quad (12)$$

在 $dn/dT \ll 1$ 和介质长度 $l \ll 2\pi/\beta$ 的条件下,可得到二维厚透镜的光线矩阵:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - [(\beta l)^2 / 2] & l / [n(r_T)] \\ -n(r_T) \beta^2 l & 1 - [(\beta l)^2 / 2] \end{bmatrix} \quad \text{e1} \quad (13)$$

对角元分别给出两个主平面的位置,由矩阵元 c 及(12)式和(4)式,得出管状介质的二维热透镜焦距 F_T 的表达式:

$$F_T = \frac{r_T^2}{2C_1 l dn/dT} = \frac{K}{Q l dn/dT} \quad (14)$$

如果薄透镜近似条件得以满足,则管状介质可等效为一个二维焦距为 F_T 的三维“环状”球面透镜(3 dimensions toroid lens),其曲率中心在 r_T 处,光轴对应着 Z_T ,呈圆环形分布,平行光线经聚焦后,将在 Z_T 轴的圆柱面上形成半径为 r_T 的圆焦线,而不是像通常的三维球面镜那样,在 Z 轴上形成焦点。关于 $C_1 > 0$ 的二维热透镜焦距为 F_T 的管状介质激光器,其稳定性判断和光场模式分析,可在纵切面上按常规的二维柱面镜腔处理^[7]。须强调的是,应该在热感应光线主轴面 Z_T 附近取波动方程的近轴近似解,得到以 r_T 为中心的二维基横模和其他各阶横模。文献[7]中将光轴定在“均值半径”处是欠缺理论根据的。由(4)式可知,光轴的径向坐标 r_T 与管状介质的温场分布相关。

五、结 论

$C_1 > 0$ 使得管状介质内出现环形分布的光线主轴面,它也是管状激光器实现三维环状基模运转的必要条件。平行平面腔型中,内泵浦方式的管状 Nd:YAG 激光器,虽然光电转换效率较高,但内壁温度也较高,加上管内壁的散热面积相对管外壁要小,易导致 $C_1 \leq 0$,使激光器运转在高阶横模的混合状态。因此,采用内、外泵浦方式相结合,适当控制管壁厚度,尤其加强内壁的冷却措施,尽可能减小管内、外壁的温差,充分满足 $C_1 > 0$ 的条件,是保证管状介质的激光器运转在低阶模状态,提高光束质量的主要方法。

感谢郭振华教授对本文中有关问题的指教与讨论。

参 考 文 献

- 1 Wittrock U, Weber H. Opt Lett, 1991; 16: 1092~ 1093
- 2 方荣生,方德寿. 科技人员常用公式与数表手册. 北京:机械工业出版社,1991:240
- 3 卢亚雄,吕百达. 矩陣光学. 大连:大连理工大学出版社,1989:25
- 4 方洪烈. 光学谐振腔理论. 北京:科学出版社,1981:345
- 5 Koehner W. Solid-state laser engineering. Berlin: Springer-Verlag, 1976: 354
- 6 Ghatak A K, Thyagarajan K. Contemporary optics. New York: Plenum Press, 1978: 10
- 7 Takada Y, Saito H, Fujioka T. IEEE J Q E, 1988; QE-24(1): 11~ 12

作者简介:朱长虹,男,1957年12月出生。副教授。从事激光技术的教学和科研工作。

收稿日期:1996-06-04

• 产品简讯 •

工业用 Nd YAG 激光器

美国密苏里州的 Cutting Edge Optronics 公司推出一种脉冲或连续 80W 二极管泵浦 Nd:YAG 激光器,可选件包括第二次,第三次和第四次谐波,短脉冲模式或调 Q 方式以供工业应用。100mJ 和 200mJ 双脉冲系统也可输出 50W 和 80W 连续脉冲,其应用包括打标,微型机械加工,冲击钻孔,切割、覆层消除,微焊和划割等。

於祖兰,巩马理 供稿