

YAG 激光器泵灯聚光腔的改进

翁兴涛¹ 伍建军¹ 聂 辉¹

(1 武汉大学光电信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:设计了一种改型的 YAG 激光器聚光腔,在椭圆柱反射面内加入一玻璃套管,进行准全腔冷却,综合了传统的全腔冷却和分别冷却的优点,但灯、棒需向椭圆柱面焦线内作一位移。为此建立了光线传输的数学模型,经计算机编程运算,找出最佳的灯、棒配置,使灯轴发出的同心光束几乎同心地会聚于棒芯。

关键词:YAG 激光器;泵浦聚光腔;腔冷却;光线追迹
中图分类号:TN12;TN20

YAG 激光器聚光器的作用是将泵浦光源辐射的光能最大限度地聚集到工作物质上,提高泵光密度,以提高泵浦速率;同时要求尽可能地获得均匀的照明度。聚光器设计的好坏直接影响激光器的转换效率和激光性能。

目前,椭圆柱聚光器是采用最多的一种^[1,2,3],因为椭圆柱聚光器内反射面的横截面是椭圆,椭圆长轴上任意一点发出的光经椭圆反射后必相交于长轴上。如果把泵浦灯和激光棒平行于聚光器心轴放置在椭圆长轴上,在泵浦灯和激光棒之间选取恰当的距离,就可以获得比较好的聚光效果和成像质量。

固体激光器的总体效率只有百分之几,绝大部分输入能量都转变为使泵灯、工作物质和聚光器温度升高的热能。因此,聚光腔的冷却是激光器设计中的突出问题,冷却效果的好坏直接影响激光输出和激光性能。目前采用的冷却方式主要有分别冷却和全腔冷却(如图 1),固体激光器泵灯的聚光及冷却方式有:灯、棒分别冷却和聚光腔全腔冷却。采用上述冷却方式时,灯、棒均放置于椭圆柱的两焦轴上,由于椭圆面的特性,在横截面内灯轴发出的同心光束,必将以同心光束形式会聚于棒轴上。在上述两种方式中,后者比前者的冷却效果好,但后者的内反射面容易受损,且反射面是镀金的,十分昂贵。

柱聚光器的里面、灯和棒的外面加上一个石英玻璃套管,冷却液在套管里面流动,这样,聚光器反射面不与冷却液接触,避免了污染,灯和棒与套管之间留有不小于 1~2mm 的间隙,保证了水流畅通;套管截面较大,冷却效果优于分别冷却方式,而且结构简单、紧凑,器件体积也比较适当。

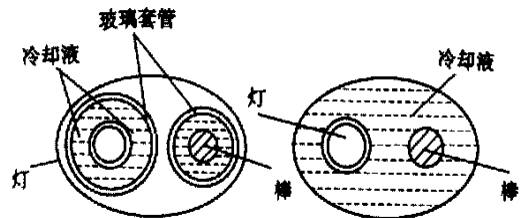


图 1 聚光器的聚光及冷却方式
Fig. 1 Condensing and Cooling Schemes
for Laser Pumping Cavities

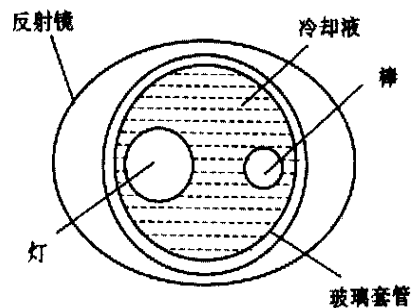


图 2 聚光腔的基本结构
Fig. 2 Basic Configuration of Improved Pumping Cavity

1 改型聚光冷却腔的结构设计

如图 2 所示,新构型的聚光冷却腔是在椭圆

具体参数的选择应权衡以下几个方面:激光棒的尺寸、灯的数目和形状、聚光效率的高低、聚光照明的均匀性、冷却要求、加工成本和工艺简便程度、器件结构的紧凑性等。经综合考虑,选取如下数值:椭圆长轴 $2a = 43.08\text{mm}$, 短轴 $2b = 40\text{mm}$; 焦距 $2c = 16\text{mm}$; 偏心率 $e = 0.372$; 激光棒直径 $d_r = 9\text{mm}$; 泵灯内径 $d_l = 9\text{mm}$, 外径 $d = 14\text{mm}$; 套管内径 33mm , 外径 36mm 。

2 光线追迹的数学描述

由于套管和冷却液的存在,椭圆一焦点上发出的同心光束不再可能是同心地会聚于另一焦点上,因此灯、棒的位置必须通过光线追迹来确定。为此,以聚光椭圆中心为坐标原点,长轴为 x 轴,短轴为 y 轴,建立直角坐标系。则描述各器件的方程如下。聚光器反射面:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

中心位于点 $(x_F, 0)$ 的灯的外圆:

$$(x - x_F)^2 + y^2 = r_1^2 \quad (2)$$

中心位于点 $(x_G, 0)$ 的棒的外圆:

$$(x - x_G)^2 + y^2 = r_2^2 \quad (3)$$

中心位于点 $(m, 0)$ 的玻璃套管内、外壁分别为:

$$(x - m)^2 + y^2 = R_1^2 \quad (4)$$

$$(x - m)^2 + y^2 = R_2^2 \quad (5)$$

因为整个系统上下腔对称,故只需考虑其上半腔的情形。从灯中心发出的光线经套管、聚光器反射面、套管,到达棒的中心,其光路由坐标系中的一些线段 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ 连接而成(如图3)。在建立数学模型的过程中,水、石英玻璃的折射率都用平均折射率,分别以 n_1, n_2 表示。在光线追迹的过程中,分成6部分进行,即

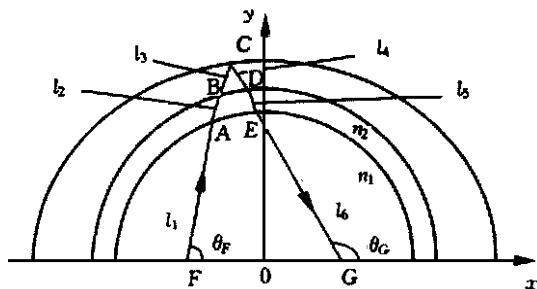


图3 聚光器内单条光线的传播情况

Fig. 3 A Ray Tracing in the Condenser Cavity

$F \xrightarrow{l_1} A \xrightarrow{l_2} B \xrightarrow{l_3} C \xrightarrow{l_4} D \xrightarrow{l_5} E \xrightarrow{l_6} G$
每段光路遵循如下规律:

$$1) F \xrightarrow{l_1} A$$

从 x 轴上点 $F(x_F, y_F)$ 发出的光线 l_1 倾斜角为 θ_F , 则 x_F, y_F, θ_F 三参量是该光线的初始值, 斜率 $k_F = \tan \theta_F$ ($\theta_F \neq 90^\circ$), 则直线方程为:

$$y - y_F = k_F(x - x_F)$$

若 $\theta_F = 90^\circ$, 则直线方程为:

$$x - x_F = 0$$

光线 l_1 与套管内壁 $(x - m)^2 + y^2 = R_1^2$ 的交点为 (x_A, y_A) , 若 $\theta_F \neq 90^\circ$, 联立 $y - y_F = k_F(x - x_F)$ 与 $(x - m)^2 + y^2 = R_1^2$, 求得:

$$y_A = \frac{k_F m - k_F x_F + y_A \pm k_F \sqrt{T}}{1 + k_F^2}$$

式中, $T = 2k_F^2 m x_F - 2k_F m y_F - k_F^2 x_F^2 + 2k_F x_F y_F - y_F^2 - k_F^2 m^2 + R_1^2 + k_F^2 R_1^2$

取 $y_A > 0$, $x_A = \frac{y_A - y_F}{k_F} + x_F$, 若 $\theta_F = 90^\circ$, 则

$$x_A = x_F, y_A = \sqrt{R_1^2 - (x_A - m)^2}$$

过 (x_A, y_A) 的圆法线的斜率为 $y_A / (x_A - m)$, 则法线与 x 轴的夹角为:

$$\alpha_A = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_A}{x_A - m}\right), & x_A > m \\ 90^\circ, & x_A = m \\ \pi - \arctan\left(\frac{y_A}{m - x_A}\right), & x_A < m \end{cases}$$

内壁 A 点处光线的入射角为 $i_A = \alpha_A - \theta_F$ 。

$$2) A \xrightarrow{l_2} B$$

光线在内壁 A 点处发生折射进入套管层, 折射角 r_A 由折射定理 $n_1 \sin i_A = n_2 \sin r_A$ 求出, 其中, n_1, n_2 分别为冷却液和石英玻璃的折射率。

光线 l_2 与 x 轴的夹角 $\theta_A = \alpha_A - r_A$, 与套管外壁 $(x - m)^2 + y^2 = R_2^2$ 的交点为 $B(x_B, y_B)$, 按上述相同的思路, 求出点 B 的坐标。

过 (x_B, y_B) 的圆法线的斜率为 $y_B / (x_B - m)$, 则其倾斜角为:

$$\alpha_B = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_B}{x_B - m}\right), & x_B > m \\ 90^\circ, & x_B = m \\ \pi - \arctan\left(\frac{y_B}{m - x_B}\right), & x_B < m \end{cases}$$

外壁 B 点处的入射角为 $i_B = \alpha_B - \theta_A$ 。

$$3) B \xrightarrow{l_3} C$$

光线在套管外壁 B 点处发生折射进入空气层, 折射角 r_B 由折射定理 $n_2 \sin i_B = n_3 \sin r_B$ 求出, 其中 n_3 是空气的折射率。

光线 l_3 与 x 轴的夹角为 $\theta_B = \alpha_B - r_B$, 则其斜率为 $k_B = \tan \theta_B$ ($\theta_B \neq 90^\circ$), 直线方程为:

$$y - y_B = k_B(x - x_B)$$

若 $\theta_B = 90^\circ$, 则直线方程为: $x - x_B = 0$ 。

光线 l_3 与聚光器反射面 $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ 相交于点 $C(x_C, y_C)$, 若 $\theta_B \neq 90^\circ$, 联立 $y - y_B = k_B(x - x_B)$ 与 $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$, 求得:

$$y_C = [b^2(y_B - k_B x_B) \pm abk_B \sqrt{2k_B x_B y_B + b^2 - k_B^2 x_B^2 - y_B^2 + a^2 k_B^2}] / (b^2 + a^2 k_B^2)$$

取 $y_C > 0$, $x_C = \frac{y_C - y_B}{k_B} + x_B$, 若 $\theta_B = 90^\circ$, 则

$$x_C = x_B, y_C = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x_C^2}$$

过 (x_C, y_C) 的椭圆法线的斜率为 $\frac{a^2 y_C}{b^2 x_C}$, 则倾斜角为:

$$\alpha_C = \arctan\left(\frac{a^2 y_C}{b^2 x_C}\right)$$

聚光器反射面 C 点处的入射角为 $i_C = \alpha_C - \theta_B$ 。

4) $C \xrightarrow{l_4} D$

光线在聚光器反射面 C 点处发生反射, 利用反射原理求出直线 l_4 的倾斜角 $\theta_C = 2\alpha_C - \theta_B$ 。直线 l_4 与套管外壁 $(x - m)^2 + y^2 = R_2^2$ 的交点 $D(x_D, y_D)$, 按与步骤 1) 相同的思路求出 D 点的坐标。

过 (x_D, y_D) 的圆法线的斜率为 $y_D / (x_D - m)$, 则其倾斜角为:

$$\alpha_D = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_D}{x_D - m}\right), & x_D > m \\ 90^\circ, & x_D = m \\ \pi - \arctan\left(\frac{y_D}{m - x_D}\right), & x_D < m \end{cases}$$

外壁 B 点处的入射角为 $i_D = \theta_C - \alpha_D$ 。

5) $D \xrightarrow{l_5} E$

光线在套管外壁 D 点处发生折射进入套管层, 折射角 r_D 由折射定理 $n_3 \sin i_D = n_2 \sin r_D$ 求出。

光线 l_5 与 x 轴的夹角为 $\theta_D = \alpha_D + r_D$, 与套管内壁 $(x - m)^2 + y^2 = R_1^2$ 交于点 $E(x_E, y_E)$, 按与步骤 1) 相同的思路求出点 E 的坐标。

过 (x_E, y_E) 的圆法线的斜率为 $y_E / (x_E - m)$, 则其倾斜角为:

$$\alpha_E = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_E}{x_E - m}\right), & x_E > m \\ 90^\circ, & x_E = m \\ \pi - \arctan\left(\frac{y_E}{m - x_E}\right), & x_E < m \end{cases}$$

套管内壁 E 点处的入射角为 $i_E = \theta_D - \alpha_E$ 。

6) $E \xrightarrow{l_6} G$

光线在套管内壁 E 点处发生折射进入冷却液, 折射角 r_E 由折射定理 $n_2 \sin i_E = n_1 \sin r_E$ 求出。

光线 l_6 与 x 轴的夹角为 $\theta_E = \alpha_E + r_E$, 则其斜率为 $k_E = \tan \theta_E$ ($\theta_E \neq 90^\circ$), 直线方程为:

$$y - y_E = k_E(x - x_E)$$

若 $\theta_E = 90^\circ$, 则直线方程为: $x - x_E = 0$ 。

直线 l_6 与 x 轴的交点为 (x_G, y_G) , 若 $\theta_E \neq 90^\circ$, 则有:

$$y_G = 0, x_G = x_E + y_E / k_E$$

若 $\theta_E = 90^\circ$, 则有:

$$y_G = 0, x_G = x_E$$

灯发出的光并不是都经过聚光器反射面反射而到达棒, 灯的前面有一部分光经聚光器反射面反射后被灯遮挡而不能到达棒, 灯的后面有一部分光被棒挡住而形成直射, 所以, θ_F 的取值范围为 $A < \theta_F < B$, 其中,

$$\sin B = \frac{r_2}{x_G - x_F}, B = \arcsin\left(\frac{r_2}{x_G - x_F}\right)$$

$$k = -\frac{r_1}{\sqrt{(x_G - x_F)^2 - r_1^2}}$$

$$y = [b^2(y_G - kx_G) \pm abk \sqrt{2kx_G y_G + b^2 - k^2 x_G^2 - y_G^2 + a^2 k^2}] / (b^2 + a^2 k^2)$$

取 $y > 0$, $x = (y - y_G) / k + x_G$, $A = \pi - \arctan(y / (x_F - x))$ 。

3 纯净水和石英玻璃的折射率计算

由于泵浦光源(氙灯)的特征谱线为 $0.76\mu\text{m}$ 、 $0.82\mu\text{m}$ 、 $0.9\mu\text{m}$, 而 Nd:YAG 的吸收光谱共有 5 条吸收带, 其中心波长分别为 $0.53\mu\text{m}$ 、 $0.58\mu\text{m}$ 、 $0.75\mu\text{m}$ 、 $0.81\mu\text{m}$ 、 $0.87\mu\text{m}$, 其中, $0.75\mu\text{m}$ 、 $0.81\mu\text{m}$ 两个吸收带吸收最强, 与泵浦灯的特征谱线接近, 因此必须求出水、石英玻璃对 $0.75\mu\text{m}$ 、 $0.81\mu\text{m}$ 两条谱线的折射率。

3.1 水的折射率

由资料^[4]查得 20℃ 时, 纯水对一些谱线的折射率如表 1 所示。

利用科希公式 $n = a + b/\lambda^2 + c/\lambda^4 + d/\lambda^6 + e/\lambda^8$, 由已知的折射率求出 $a = 1.3171$, $b = 0.0081$, $c = -0.0011$, $d = 0.0001$, $e = 0$ 。当 $\lambda = 0.75\mu\text{m}$ 时, $n = 1.3286$; $\lambda = 0.81\mu\text{m}$ 时, $n =$

1.327 2; $\Delta n/n=0.001\ 5$ 。

表 1 20 纯水对一些谱线的折射率表

Tab.1 The Index of Refraction for Pure Water at 20

波长/nm	折射率	波长/nm	折射率
250	1.377 3	486	1.337 1
308	1.356 9	589	1.333 0
359	1.348 0	768	1.328 9
400	1.343 3	1 000	1.324 7
434	1.340 3	1 250	1.321 0

3.2 石英玻璃的折射率

由资料^[5]查得 20 时,石英玻璃对一些谱线的折射率如表 2 所示。

由色散公式

$$n=A+BL+CL^2+D\lambda^2+E\lambda^4$$

式中, $L=1/(\lambda^2-0.028)$ 。可求出 $A=1.458\ 6$,
 $B=-0.000\ 101\ 24$, $C=0.000\ 410\ 04$, $D=-$
 $0.011\ 287\ 58$, $E=0.002\ 992\ 29$ 。

当 $\lambda=0.75\mu\text{m}$ 时, $n=1.454\ 43$; $\lambda=0.81\mu\text{m}$
时, $n=1.452\ 83$; $\Delta n/n=0.001\ 1$ 。

由此可知,无论是水还是石英玻璃,对

$0.75\mu\text{m}$ 、 $0.81\mu\text{m}$ 两条谱线的折射率相差很小,相
对差值不大于 1.5%。因此,只需对波长为
 $0.75\mu\text{m}$ 的谱线进行计算、分析,就能反映出聚光
效果。

表 2 石英玻璃对一些谱线的折射率表

Tab.2 The Index of Refraction for Fused Quartz Glass

波长/nm	折射率	波长/nm	折射率
253.6	1.505 3	546.1	1.460 28
280.3	1.494 2	589.3	1.458 6
312.5	1.484 7	656.3	1.456 57
365.0	1.474 72	766.5	1.454 13
404.6	1.469 8	863.0	1.452 51
434.1	1.467 03	950.8	1.451 26
486.1	1.463 31	1 000.0	1.450 6

4 光线追迹的典型结果

根据上述光线传播的数学模型及所选取的各
种参数,经计算机编程及运算的典型结果如图 4
所示。

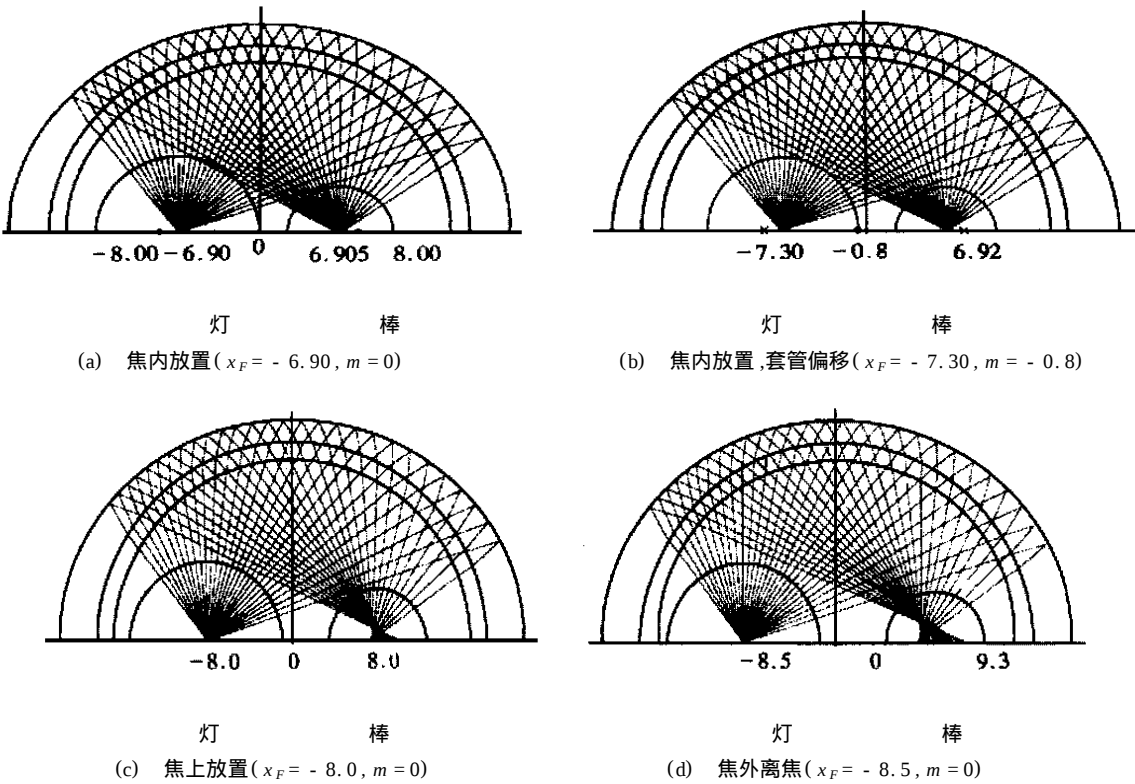


图 4 不同灯、棒配置时的聚光效果

Fig.4 Light Condensed Results for Some Lamp and Rod Locations

以光线 l_6 与 x 轴的交点到 G 点的距离为横
坐标,直线 l_6 的倾斜角 θ_G 为纵坐标,可作出球差
曲线。在选定一个 x_F 并取一系列 θ_F 后,可得到
一条球差曲线。每一条曲线对应于一个 x_G 的最

大值 x_G^M 和最小值 x_G^m 之差,即 $\delta=x_G^M-x_G^m$, δ 的
大小直接反映聚光效果的好坏。变动 x_F ,得到不
同的球差曲线如图 5 所示。在这些曲线中,找出
 δ 值最小的曲线,这时的 x_F 和 x_G 即是要找的最

佳灯、棒配置。在选定的参数下,求得的最佳配置是 $x_F = -6.90\text{mm}$, $x_G = 6.90\text{mm}$, $m = 0$ 。另外,对不同 m 的选取也作了类似的分析,结果表明,当 $x_F = -7.30\text{mm}$, $x_G = 6.92\text{mm}$, $m = -0.80\text{mm}$ 时,也能取得很好的聚光效果。

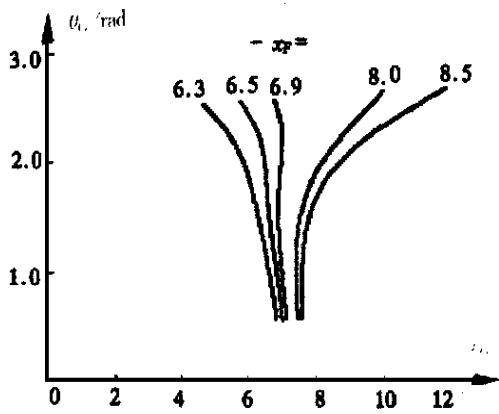


图 5 $m = 0$ 时, x_F 变动时的球差曲线
Fig. 5 The Spherical Aberration Curves when $m = 0$ and x_F Varies

5 结 语

本文介绍了一种新构型的激光器泵灯的聚光冷却腔,保留了国内外普遍采用且工艺成熟的椭圆柱镀金反射面,但在聚光器反射面以内、灯和棒之外加入一圆柱石英玻璃套管,以便冷却液在管内流通,实现准全腔式冷却。而该系统产生的弊病,即椭圆焦点上发出的同心光束不再在另一焦点处同心地会聚,可经光线追迹找出存在于腔内的共轭点,达到近乎同心会聚的效果。

当然,泵灯事实上是一圆柱状发光体,而激光棒也是圆柱状的发光体。全面讨论激光的情况将是十分繁杂的。不过,全腔冷却及灯、棒分冷能得到广泛应用,主要还是利用了椭圆柱激光腔一焦轴上发出的、在垂轴面内的同心光束将会无像差地会聚于另一焦轴上这一几何特性。因此,本文的设计也作相似的讨论以使问题简化。

值得一提的是,讨论中忽略了圆筒套管内外表面上发生的反射。内表面上,因石英玻璃折射率 $n_g \approx 1.45$,水的折射率为 $n_w \approx 1.33$,反射率 $\rho = (\frac{n_g - n_w}{n_g + n_w})^2 = 2 \times 10^{-3}$,实可忽略;外表面则有 $\rho = (\frac{n_g - 1}{n_g + 1})^2 = 0.034$,且在一光线的行进过程中经历两次。因此,如要提高效率并取得较好冷却效果,外表面最好镀上 $0.75 \sim 0.81\mu\text{m}$ 的增透膜,而膜层接触的是空气,其理化性能要求并不因此而提高。

套管形状简单,极易加工,而且石英玻璃成本不高,藉此可保护昂贵的镀金反射面,延长其使用寿命。此次激光器聚光腔的改进设计原理上与原全腔冷却方式相符,实践中也是可行的,并不增加工艺难度。因此,可在实际器件中推广应用,而且文中提到的光线追迹评价方法也适用于类似腔的设计。

需要说明的是,由于缺乏资料,文中只对温度在 20°C 时作了讨论,因而存在一定的局限性。但折射率随温度的变化很小,对结果不会产生根本性的影响。

参 考 文 献

- 1 徐荣甫,刘敬海. 激光器件与技术教程. 北京:北京工业学院出版社,1986
- 2 杨臣华,梅遂生,林钧挺. 激光与红外技术手册. 北京:科技出版社,1990
- 3 赫光生,雷仕湛. 激光器设计基础. 上海:上海科学技术出版社,1979
- 4 杰尔洛夫 N G. 海洋光学. 赵俊生,吴曙初译. 北京:科学出版社,1981
- 5 光学仪器设计手册编辑组. 光学仪器设计手册. 北京:国防工业出版社,1971

作者简介:翁兴涛,教授。现从事光学和激光研究。代表成果:小型氦氖激光器结构参数与稳定性、模体积、输出光束参数间的关系;高斯平面波场狭缝菲涅耳衍射的一些特性;自聚焦光纤中传导模的场分布等。
E-mail:xtweng@wtusm.edu.cn

Improved Pump-condensing and Cooling Cavity of YAG Laser

WENG Xingtao¹ WU Jianjun¹ NIE Hui¹

(1 School of Optics and Electron Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract : An improved type of pumping lamp condenser and cooling cavity for YAG laser is designed and described, where a quartz glass tube is inserted between the elliptically cylindrical mirror cavity and the pumping lamp and laser rod, and the cooling water is flowed through the tube with lamp and rod immersed in it.

This kind of modified configuration has advantage over current cavities. Its cooling efficiency is higher than that of lamp and rod respective cooling structure, and its gold-coated mirror protection is better than that of the full cavity cooling structure.

In the current structure, the pumping lamp and the laser rod are set in the position of two focal axes of the elliptically cylindrical mirror, which are conjugate, without any spherical aberration, according to the geometry. However, this condition is not properly satisfied in the improved configuration and the conjugate should be consulted by computer manipulation. Therefore the mathematical formulae for ray tracing in this special system are derived and the evaluation criterion is determined.

The refraction indices of water and quartz glass are calculated for wavelength and respectively, which are emitted from the pumping lamp and absorbed by YAG laser rod.

The ray tracing program is compiled and the results are investigated. It is concluded that the pumping lamp and the laser rod should be shifted forward to each other from the foci of that mirror and the optimum conjugate can be found so that the concentric beam from the lamp is nearly concentrically converged to the rod.

Key words : YAG laser; pump-condensing cavity; cavity cooling; ray tracing

About the author : WENG Xingtao, professor. He is engaged in optics and laser. His typical achievements are the relationships between the stability, the mode volume, the parameters of output beam and the structure parameters of resonator in a small-sized He-Ne laser; some features of fresnel diffraction fields of Gaussian-plane waves truncated by slit; field distribution patterns of propagation modes in selfoc fiber, etc.
E-mail: xtweng@wtusm.edu.cn